

**Diseño de rutas para la recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San  
Juan de Betulia, Sucre, Colombia**

Carlos Daniel Aguas Gómez

Harold de Jesús Rivera Berrio

Juan Camilo Posada Cuaba

Asesor

Ing. Luis Eduardo Gil Castellanos, Msc

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías

Ingeniería Industrial

2024

## Agradecimientos

*"El ser humano puede concebir numerosos proyectos en su mente, pero únicamente los designios del Señor perdurarán"* (Proverbios 19:21). Y así, de esa misma forma, me hallo hoy aquí en el cúmulo del principio de mi formación profesional, con humildad y gratitud hacia Dios.

Hacia mi amada madre, Yasmith Gómez Campo, cuya constante devoción y amor incondicional han sido mi fortaleza, un escudo que protege mi corazón. Sus palabras de aliento y sus oraciones han sido mi sustento en los momentos de incertidumbre y tribulación.

Hacia mi hermosa novia, Mariana Hernández Paternina, fuente de inspiración y motivación en este camino, dedico las palabras del poeta chileno: *"no perteneceré a nadie más que a ti, hasta que mis huesos se conviertan cenizas y mi corazón cese de latir"* (Pablo Neruda, 1924). Tu presencia ha hecho que cada instante de este trayecto sea significativo y valioso.

A mi estimado asesor, Luis Gil Castellanos, Magíster en Ingeniería Industrial que, *"he logrado ver más allá gracias a que me he elevado sobre los hombros de gigantes"* (Isaac Newton, 1676), cuya sabiduría y orientación han sido fundamentales para alcanzar este logro académico.

Gratifico fervientemente sus enseñanzas y liderazgo durante este proceso de investigación.

Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por ofrecerme la oportunidad de realizar mis estudios académicos. Su compromiso con la educación ha sido esencial en mi formación profesional, permitiéndome alcanzar esta etapa de mi vida con éxito. Agradezco sinceramente a toda la comunidad académica y administrativa por su apoyo y dedicación durante mi trayectoria en esta institución.

- Carlos Daniel Aguas Gómez

### **Declaración de Originalidad**

En nuestra calidad de autores del presente proyecto aplicado titulado “*Diseño de rutas para la recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, Colombia*”, deseamos informar a la comunidad académica que los contenidos expuestos son el resultado de nuestro análisis y discusión al diseñar rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en San Juan de Betulia, que minimicen las distancias recorridas.

Declaramos que el documento es de nuestra autoría, es autentico y fue elaborado sin infringir, apoderarse, replicar, variar o violar en común los derechos de terceros autores, de igual forma, declaramos que la obra no fue creada ni parcial ni totalmente por ningún tipo de Inteligencia Artificial.

Las referencias bibliográficas pertinentes están debidamente citadas en la estructura del escrito del proyecto de investigación, según las normas de la séptima edición de la American Psychological Association (APA7).

En virtud de lo anterior, declaramos que este proyecto aplicado y/o de investigación está libre de plagio y cumple con todas las normativas legales actuales referentes a la propiedad intelectual.

## Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad abordar los desafíos en la recolección de residuos sólidos en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, Colombia, mediante el empleo de técnicas de optimización. La recolección eficiente de basura es una preocupación vital para elevar la calidad de vida de los residentes y contribuir a la sostenibilidad ambiental en la región. En este contexto, se propone diseñar rutas de recolección de residuos sólidos que optimicen la eficiencia operativa. La metodología de investigación incluye la recopilación de datos de operación, formulación de un modelo matemático para abordar el problema y la utilización de herramientas de investigación de operaciones para obtener una solución, que ayude a minimizar la distancia recorrida por los vehículos y se adapte a las condiciones locales. Este proyecto no solo constituye una oportunidad para abordar los desafíos en la gestión de residuos sólidos en el municipio de San Juan de Betulia, sino que también tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia de la recolección. Aspiramos a contribuir al desarrollo sostenible de la región y promover prácticas más sustentables en el manejo de residuos sólidos. El diseño de rutas de recolección de basura en este contexto implica una sinergia entre la ingeniería, la gestión de redes de suministros y la responsabilidad social, representando un desafío multidisciplinario y un impacto positivo en la comunidad local.

**Palabras clave:** ruteo de vehículos, optimización de rutas, recolección de basuras, diseño logístico, modelo matemático, residuos sólidos, programación, cartero chino rural, problema del agente viajero.

## Abstract

The present research project aims to address the challenges in solid waste collection in the municipality of San Juan de Betulia, Sucre, Colombia, through the use of optimization techniques. Efficient garbage collection is a vital concern to improve the quality of life of residents and contribute to environmental sustainability in the region. In this context, it is proposed to design solid waste collection routes that optimize operational efficiency. The research methodology includes the collection of operational data, formulation of a mathematical model to address the problem and the use of operations research tools to obtain a solution, which helps minimize the distance traveled by vehicles and adapts to local conditions. This project is not only an opportunity to address the challenges in solid waste management in the municipality of San Juan de Betulia, but also has the potential to significantly improve collection efficiency. We aim to contribute to the sustainable development of the region and promote more sustainable solid waste management practices. The design of garbage collection routes in this context implies a synergy between engineering, supply network management and social responsibility, representing a multidisciplinary challenge and a positive impact on the local community.

**Keywords:** vehicle routing, route optimization, garbage collection, logistics design, mathematical model, solid waste, scheduling, Chinese rural mail carrier, traveling agent problem.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	14
Justificación .....	18
Objetivos .....	21
Objetivo General .....	21
Objetivos Específicos .....	21
Contextualización y Análisis del Problema de Estudio - Fundamentos .....	22
Planteamiento del Problema .....	22
Marco Conceptual y Teórico .....	26
<i>Antecedentes</i> .....	28
<i>Teoría de Grafos</i> .....	32
<i>Problemas de Ruteo</i> .....	35
<i>Investigación de Operaciones (IO)</i> .....	42
<i>Optimización</i> .....	44
<i>Complejidad Computacional</i> .....	45
Metodología .....	54
<i>Fase 1: Descripción del Sistema</i> .....	55
<i>Fase 2: Formulación del Modelo de Optimización de Rutas</i> .....	56
<i>Fase 3: Solución del Modelo Establecido</i> .....	56
<i>Fase 4: Verificación de los Resultados del Modelo Propuesto</i> .....	56

Características e Identificación del Entorno - Descripción del Sistema .....	58
Procedimiento de Recolección de Residuos.....	58
<i>Entidad Encargada del Servicio de Recolección de RSU</i> .....	58
<i>Presentación de Residuos</i> .....	59
<i>Ubicación</i> .....	60
<i>Sitio de Disposición Final</i> .....	62
Criterios y Políticas de Recolección de Basuras .....	62
<i>Políticas de Recolección de Residuos</i> .....	63
<i>Interrogantes de Consideración</i> .....	79
Parámetros Relevantes del Modelo .....	81
<i>Procesamiento de la Información</i> .....	85
Representación Matemática del Problema y Solución del Modelo de Optimización de Rutas -	
Formulación del Modelo de Optimización de Rutas .....	90
Planteamiento Matemático .....	90
Ecuaciones Matemáticas .....	94
- Solución del Modelo Establecido .....	99
Método y Software.....	99
<i>Código Python para TSP de Recolección de RSU</i> .....	103
<i>Solución de Rutas</i> .....	108
Validación de Hallazgos - Verificación de los Resultados del Modelo Propuesto.....	116
Evaluación en Campo de las Rutas Óptimamente Propuestas .....	116

<i>Ruta Óptima - MR1 #181195</i> .....	117
<i>Ruta Óptima - MR2 #181196</i> .....	119
<i>Ruta Óptima - MR3 #181197</i> .....	122
Valoración por Instancias Aleatorias .....	123
Comparación de Indicadores de Ruta Actuales y Propuestas .....	129
Conclusiones y Recomendaciones .....	132
Conclusiones .....	132
Recomendaciones.....	134
Referencias Bibliográficas .....	137
Apéndices.....	155

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Presentación de Residuos</i> .....	60
<b>Tabla 2</b> <i>Marco normativo de la gestión integral de residuos sólidos</i> .....	64
<b>Tabla 3</b> <i>Base Legal Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos</i> .....	65
<b>Tabla 4</b> <i>Estrategias para la Gestión Integral de Residuos</i> .....	71
<b>Tabla 5</b> <i>Principios que rigen La Política Nacional para la GIRS</i> .....	72
<b>Tabla 6</b> <i>Rutas vigentes establecidas</i> .....	84
<b>Tabla 7</b> <i>Recolección y Transporte de residuos no aprovechables</i> .....	84
<b>Tabla 8</b> <i>Ecuaciones matemáticas que representan el problema</i> .....	94
<b>Tabla 9</b> <i>Resultados de pruebas con diferentes nodos en Ins. Aleatorias</i> .....	126
<b>Tabla 10</b> <i>Km Actuales vs Km Propuestos</i> .....	130

## Lista de Ilustraciones

<b>Ilustración 1</b> <i>Imagen Satelital de San Juan de Betulia</i> .....	61
<b>Ilustración 2</b> <i>Sitio de Disposición Final</i> .....	62
<b>Ilustración 3</b> <i>Alcance de la Gestión de Residuos</i> .....	70
<b>Ilustración 4</b> <i>Gestión Diferencial - Aprovechables y Basuras</i> .....	70
<b>Ilustración 5</b> <i>Rutas de recolección de residuos ordinarios en San Juan de Betulia</i> .....	81
<b>Ilustración 6</b> <i>Ruta de recolección de residuos ordinarios MR1 #181195</i> .....	82
<b>Ilustración 7</b> <i>Ruta de recolección de residuos ordinarios MR2 #181196</i> .....	82
<b>Ilustración 8</b> <i>Ruta de recolección de residuos ordinarios MR3 #181197</i> .....	83
<b>Ilustración 9</b> <i>Nodos Ruta MR1</i> .....	87
<b>Ilustración 10</b> <i>Nodos Ruta MR2</i> .....	88
<b>Ilustración 11</b> <i>Nodos Ruta MR3</i> .....	88
<b>Ilustración 12</b> <i>NET Problem Specification</i> .....	104
<b>Ilustración 13</b> <i>Traveling Salesman Solution Method</i> .....	105
<b>Ilustración 14</b> <i>NET Solución ejemplo TSP R1</i> .....	106
<b>Ilustración 15</b> <i>Python Solución ejemplo TSP R1</i> .....	107
<b>Ilustración 16</b> <i>Diagrama de dispersión UTF de MR1</i> .....	110
<b>Ilustración 17</b> <i>Exploración gráfica de nodos óptimos MR1</i> .....	111
<b>Ilustración 18</b> <i>Diagrama de dispersión UTF de MR2</i> .....	112
<b>Ilustración 19</b> <i>Exploración gráfica de nodos óptimos MR2</i> .....	112
<b>Ilustración 20</b> <i>Diagrama de dispersión UTF de MR3</i> .....	113

<b>Ilustración 21</b> <i>Exploración gráfica de nodos óptimos MR3</i> .....	114
<b>Ilustración 22</b> <i>Ruta óptima para MR1</i> .....	118
<b>Ilustración 23</b> <i>Valoración de Ruta óptima para MR1</i> .....	119
<b>Ilustración 24</b> <i>Ruta óptima para MR2</i> .....	120
<b>Ilustración 25</b> <i>Ruta óptima Python para MR2</i> .....	121
<b>Ilustración 26</b> <i>Ruta óptima modificada para MR2</i> .....	121
<b>Ilustración 27</b> <i>Ruta óptima modificada para MR3</i> .....	122
<b>Ilustración 28</b> <i>Valoración por Instancias Aleatorias</i> .....	125

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Grafos</i> .....	33
<b>Figura 2</b> <i>Grafos dirigidos</i> .....	33
<b>Figura 3</b> <i>Camino cerrado</i> .....	34
<b>Figura 4</b> <i>Camino Hamiltoniano</i> .....	34
<b>Figura 5</b> <i>Matriz de adyacencias</i> .....	35
<b>Figura 6</b> <i>Matriz es simétrica</i> .....	35
<b>Figura 7</b> <i>NP-Completo</i> .....	46

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A</b> <i>Matriz de distancia por Macrorutas de recolección propuestas</i> .....	155
<b>Apéndice B</b> <i>Código Python de solución TSP + Nearest Neighbor Heuristic</i> .....	156
<b>Apéndice C</b> <i>Demostración visual de validación en campo de rutas propuestas</i> .....	157
<b>Apéndice D</b> <i>Código Python de validación TSP + Nearest Neighbor Heuristic por Instancias Aleatorias</i> .....	158

## Introducción

La gestión de residuos sólidos plantea desafíos a escala global, con repercusiones en la salud pública, el entorno ambiental y el desarrollo sostenible. El rápido crecimiento poblacional y la industrialización han exacerbado este problema, complicando la logística de recolección de residuos (Ayala Rodríguez & Gonzáles Butrón, 2001) que, en conjunto de las prácticas actuales de diseño de rutas de recolección, a menudo intuitivas y poco sistemáticas, resultan ineficientes y costosas (Márquez Pérez, 2010).

De esta manera, la manipulación de residuos sólidos se ha convertido en un reto de escala mundial en constante expansión. Se proyecta que la generación anual de residuos sólidos comunales debería duplicarse para fines de 2025 (World, 2018a), y para 2050 se espera un aumento drástico hasta alcanzar los 3400 millones de toneladas al año (Kaza et al., 2018). En América Latina y el Caribe, la situación es heterogénea, se generan aproximadamente el 10 % de los residuos sólidos del mundo, con una tasa promedio de 1 kg por habitante por día, y a pesar de tener una cobertura de recolección relativamente alta del 90 %, solo se recicla el 10 % de los residuos generados en la región (United, 2018).

En Colombia, se generan aproximadamente 33,000 toneladas de residuos sólidos diariamente, de las cuales solo se logra aprovechar el 17%. En el caso específico de la capital del país, Bogotá, la cifra asciende a más de 9,000 toneladas al día, destacando la urgencia de adoptar medidas efectivas para mejorar la gestión y el aprovechamiento de estos recursos (López Plazas, 2023).

Cabe destacar que, la gestión integral de residuos sólidos comprende una serie de procesos interconectados, siendo la recolección de basura un componente esencial de este sistema (Smith et al., 2001). La eficiencia en la recolección no solo beneficia la calidad de vida

de los habitantes, sino que también impacta positivamente en la sostenibilidad ambiental y en el progreso hacia los objetivos de desarrollo sostenible.

La optimización de las rutas de recolección de basura emerge como una estrategia fundamental para mejorar la gestión operativa de los servicios de limpieza urbana, ya que permite reducir costos operativos, incrementar la productividad y optimizar la calidad del servicio (Betanzo-Quezada et al., 2016). También, contribuye a prevenir riesgos sanitarios, minimizar la contaminación ambiental y reducir el impacto visual y olfativo en las comunidades (Minga Quezada & Zhiminaycela León, 2019). La eficiente gestión de los residuos sólidos es una preocupación global y un componente vital para la calidad de vida de las comunidades locales y la protección del medio ambiente (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). Alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, en particular el ODS número 11, que busca ciudades y comunidades sostenibles, la gestión eficaz de los residuos sólidos contribuye a la disminución de la contaminación medioambiental, la promoción de la salud pública y la optimización de los recursos naturales (United, 2015).

La acumulación de residuos sólidos plantea uno de los principales desafíos para la humanidad y el ecosistema, con un impacto directo en las problemáticas ambientales en aumento durante las últimas décadas (González, 2016). Se identifican los residuos sólidos urbanos (RSU) como una preocupación social emergente, derivada principalmente de los centros urbanos en crecimiento (Barradas Rebolledo, 2009). La recolección de estos residuos generalmente reincide en las jurisdicciones municipales, que buscan implementar operaciones que optimicen el destino final de los desechos desde una perspectiva económica y ambiental (André García & Cerdá Tena, 2006).

La recolección de residuos sólidos urbanos es un proceso que abarca varias etapas, desde la recogida hasta su disposición en instalaciones de eliminación o tratamiento (Bel, 2006). Esta fase es fundamental en el ciclo de vida de los residuos sólidos y requiere una cuidadosa planificación y aplicación de tecnologías adecuadas para garantizar su eficacia (Fuentes et al., 2008). La gestión de residuos sólidos urbanos, una tarea multifacética, tiene ramificaciones sociales, económicas, tecnológicas y ambientales que requieren una atención minuciosa tanto de la sociedad como de las autoridades locales (Betanzo-Quezada et al., 2016).

En el municipio de San Juan de Betulia, ubicado en el departamento de Sucre, Colombia, se identifican desafíos importantes en la gestión operativa de la recolección de residuos sólidos, donde la falta de planificación adecuada y la ausencia de estudios sistemáticos han llevado a la adopción de enfoques empíricos en el diseño de rutas de recolección de basura, lo que resulta en ineficiencias logísticas, posibles mayores costos operativos y la acumulación de residuos, además, la limitación de recursos financieros ha obstaculizado la inversión en la optimización de estas rutas, lo que agrava la situación. Ante este panorama, surge la necesidad imperativa de diseñar rutas de recolección de residuos sólidos que sean eficientes y sostenibles en San Juan de Betulia con el objetivo principal de minimizar las distancias recorridas por los vehículos de recolección y mejorar la calidad del servicio de gestión de residuos en el municipio.

Para alcanzar este objetivo, se plantea una metodología que comprende cuatro fases principales. En la primera fase, se recopila información detallada sobre el sistema actual de recolección de basura, identificando los parámetros relevantes y estableciendo criterios y políticas de recolección. La segunda fase implica la formulación de un modelo matemático que represente el problema de recolección de residuos sólidos, definiendo variables de decisión, función objetivo y restricciones. Es esencial destacar que la implementación de modelos

matemáticos para diseñar y evaluar rutas óptimas de recolección de basura es crucial en este contexto (Muro Chafloque et al., 2019). Dichos modelos permiten adaptar las soluciones a las características y necesidades específicas de cada municipio, promoviendo así una gestión eficiente y sostenible de los residuos sólidos (Schimmer, 2020).

Una vez formulado el modelo, se procede a la tercera fase, donde se busca la solución utilizando herramientas de optimización, generando rutas de recolección eficientes y se visualizan los recorridos para su análisis. Finalmente, en la cuarta fase, se verifica la validez y eficacia del modelo propuesto, comparando los resultados obtenidos con las rutas actuales y estableciendo indicadores de desempeño para evaluar su impacto.

Finalmente, se verifica la validez y eficacia del modelo propuesto comparando los resultados obtenidos con las rutas actuales y estableciendo indicadores de desempeño para evaluar su impacto, se emplea la validación por campo como herramienta de corroboración de la información obtenida en la fase anterior con el propósito de establecer diferencias entre ambos sistemas y verificar si se cumple con los objetivos planteados en relación con la minimización de las distancias y coherencia de las rutas óptimas al implementarlas en el municipio, por ende se instauran ajustes al sistema que logren aumentar la cobertura de la estructura al igual que suplir determinadas falencias técnicas relacionadas con las normativas de movilidad vehicular dentro del municipio. De igual manera para esta fase se pretende validar la efectividad del código de solución propuesto en Python, por lo que se realizan pruebas basadas en instancias aleatorias que toman valores  $x$  para constituir un patrón de soluciones óptimas con diferentes tiempos computacionales relacionados con la cantidad de nodos evaluados, logrando determinar si el código es totalmente funcional.

## Justificación

La gestión eficiente de residuos sólidos es un desafío universal y un componente crucial para la calidad de subsistencia de las comunidades locales y la conservación del entorno ambiental (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). Además, se ajusta directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. En particular, el ODS número 11, llamado "Ciudades y comunidades sostenibles" pretende afianzar que las urbes y los establecimientos poblacionales sean integrales, invulnerables, resilientes y sustentables. La gestión de residuos sólidos eficiente es esencial para lograr este objetivo, ya que coopera a la disminución de la contaminación medioambiental, la promoción de la salud pública y la optimización de los recursos naturales (United N., 2015). Por lo que es importante destacar la magnitud del desafío que implica la gestión de residuos sólidos en la actualidad. Según estadísticas realizadas por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en su informe sobre gestión de residuos sólidos, la generación de residuos urbanos ha experimentado un aumento sustancial en las últimas décadas en la región. Se estima que en América Latina y el Caribe se generan alrededor de 541 kilogramos de residuos sólidos por persona al año (CEPAL NU., 2021). Estas cifras muestran la creciente presión sobre los sistemas de gestión de residuos y la necesidad imperante de encontrar soluciones efectivas y sostenibles. En este contexto, la optimización de las rutas de recolección de basura se convierte en un componente esencial para enfrentar este desafío, ya que puede contribuir significativamente a la reducción de costos operativos, la mejora de la calidad de vida de la población y la conservación del entorno ambiental.

La gestión integral de residuos sólidos comprende una serie de procesos interconectados, siendo la recolección de basura uno de los componentes esenciales de este sistema. Como señala

Smith et al., (2001), la recolección efectiva de residuos sólidos es la primera etapa en el ciclo de gestión de residuos, y su eficiencia repercute directamente en el éxito general de la gestión, esto se debe a que la recolección de basura es el punto de contacto más visible y directo entre la comunidad y el sistema de gestión de residuos. Cualquier mejora en la recolección de basura no solo beneficia la calidad de subsistencia de los pobladores, sino que también tiene un impacto significativo en la sostenibilidad ambiental y en la capacidad de una ciudad para avanzar hacia los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas.

La importancia de optimizar las rutas de recolección radica en su impacto directo en la calidad de vida de los habitantes del municipio (Cointreau S., 1982). Una recolección eficiente reduce los riesgos sanitarios al minimizar la acumulación de residuos, mejorando así la salud pública y el bienestar de la comunidad (Ferronato & Torretta, 2019). En el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, se ha identificado la necesidad urgente de mejorar la gestión de residuos sólidos, puesto que presentan problemas como las rutas de recolección ineficientes, los altos costos operativos y la acumulación de residuos en áreas urbanas y rurales. Esta optimización contribuye a la sostenibilidad ambiental, ya que disminuye la contaminación del suelo y del agua, así como las emisiones de gases de efecto invernadero (UNEP NU., 2018).

La optimización de las rutas de recolección de basura es una estrategia clave para mejorar la gestión operativa de los servicios de limpieza urbana, ya que permite reducir los gastos afiliados al consumo de combustible, al mantenimiento de los vehículos y al personal requerido, así como aumentar la productividad y la calidad del servicio (Betanzo-Quezada et al., 2016). Además, al optimizar las rutas se logra disminuir el tiempo de exposición de los residuos en las calles, lo que contribuye a prevenir la proliferación de vectores de enfermedades, los malos olores y la contaminación visual (Minga Quezada & Zhiminaycela León, 2019). Por otro lado, al

minimizar la distancia recorrida y el número de viajes necesarios para la recolección, se reduce también el impacto ambiental generado por las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, lo que favorece la mitigación del cambio climático y la conservación de los recursos naturales (Schimmer M., 2020). Por estas razones, es necesario implementar modelos matemáticos que permitan diseñar y evaluar rutas óptimas de recolección de basura, adaptadas a las características y necesidades específicas de cada municipio (Muro Chafloque et al., 2019).

Por otro lado, la implementación de rutas de recolección optimizadas es una forma de lograr eficiencia operativa en los servicios de limpieza urbana, lo que reducirá los costos operativos asociados a la gestión de basuras (Toro et al., 2016), más en un contexto donde los recursos financieros son limitados y las demandas de servicios públicos aumentan, especialmente en un municipio que representa la cultura de la sabana Sucreña y que está en proceso de desarrollo, como lo es San Juan de Betulia. Este enfoque eficiente no solo permite el uso más efectivo de los recursos financieros, sino que también puede liberar fondos para otras áreas críticas de desarrollo comunitario, como la mejora de infraestructuras o servicios sociales (Toro et al., 2016). Además, la disminución de los costos operativos puede traducirse en una menor carga fiscal para la comunidad, al tiempo que garantiza la prestación continua y sostenible de servicios de gestión de residuos sólidos (European Environment Agency, 2018). Esto resulta en una conservación más efectiva de los recursos naturales y en un impacto positivo en la mitigación del cambio climático (Malakahmad et al., 2014).

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar rutas para la recolección de basura en el municipio San Juan de Betulia, Sucre, utilizando un enfoque de investigación de operaciones para la minimización de las distancias recorridas.

### **Objetivos Específicos**

Identificar los parámetros, criterios y políticas para la recolección de basura en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre, a través de la recopilación de datos e información de fuentes primarias.

Formular un modelo matemático que represente el problema de recolección de residuos sólidos en San Juan de Betulia, Sucre, utilizando técnicas de programación matemática.

Validar el modelo matemático para la recolección de residuos sólidos mediante la aplicación de datos reales obtenidos en el municipio de San Juan de Betulia.

## **Contextualización y Análisis del Problema de Estudio - Fundamentos**

En primera instancia, se destaca sobre este capítulo inicial la representación de los componentes conceptuales, perceptivos e informativos de este proyecto aplicado en base a los resultados y secciones correspondientes a su propuesta de trabajo de grado, de manera que, destaquen elementos en noción de la estructura investigativa, tales como, planteamiento del problema, marco conceptual/teórico, y metodología.

Donde los primeros elementos de: planteamiento del problema, justificación, marco conceptual y teórico, yace la intención de exhibir el entorno y las circunstancias desde una vista general-global hasta el estudio específico-municipal que se pretende abordar, es decir, brindar una trascendencia contextualizada sobre la temática de investigación al lector, soportada por medio de indagaciones semejantes a través de los años pasados. Por último, objetivos y metodología, exponen las expectativas de la investigación, estableciendo la manera en que se logrará el resultado deseado y facilitando la toma de decisiones informadas respaldadas por evidencia.

### **Planteamiento del Problema**

La gestión de residuos sólidos es un desafío mundial que infringe el bienestar humano, el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Según el informe de Kaza et al., (2018), Si no se implementan medidas urgentes, se proyecta que para 2050 los desechos a categoría global aumentarán en un 70 % en comparación con los rangos actuales, alcanzando 3400 millones de toneladas. Los desechos sólidos son una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, así como de contaminación del suelo y del agua. Además, la mala gestión de los desechos repercute negativamente en el bienestar de las comunidades, especialmente las más desfavorecidas y vulnerables (World B., 2018a).

El incremento rápido de la población en los últimos años, junto con el proceso de industrialización, ha resultado en un aumento significativo en la generación de residuos, lo cual ha complicado la logística de recolección (Ayala Rodríguez & Gonzáles Butrón, 2001). Según el World B., (2018b), en el año 2016, el 5 % de las emisiones globales procedían de la gestión de residuos sólidos, excluyendo el transporte. Encontrar una ruta óptima que garantice la cobertura de todas las cuadras de un sector es un caso específico del problema de planificación de rutas para los camiones municipales encargados de la recolección de residuos, las cuales tradicionalmente han sido diseñadas de forma manual (Thimbleby H., 2003). Debido a lo mencionado anteriormente, Márquez J., (2010) sostiene que, en la mayoría de las circunstancias, las rutas se diseñan de manera intuitiva, lo que conlleva a un aumento en los tiempos y costos, como, por ejemplo, el gasto en combustible.

También, la generación de residuos sólidos a nivel mundial ha aumentado en proporción al acrecentamiento de la humanidad. Se valora que la fabricación anual de desechos sólidos para los asentamientos urbanos sea aproximadamente 1.3 millones de toneladas, y se prevé que este número se duplique para finales de 2025 (World B., 2018a). Y para el año 2050, se proyecta que el mundo genere aproximadamente 3,400 millones de toneladas de residuos al año, lo cual representa un aumento significativo en comparación con los 2,010 millones de toneladas actuales (Kaza et al., 2018).

En América Latina y el Caribe, la situación de la gestión de residuos sólidos es heterogénea y presenta grandes desafíos para los territorios de la región. Según el informe de la United N., (2018), la región genera alrededor del 10 % de los residuos sólidos del mundo, con una tasa promedio de 1 kg por habitante por día. Sin embargo, existe una gran variabilidad entre los países, tanto en la cantidad como en la composición de los residuos. La región tiene una

cobertura de recolección relativamente alta (90 %), pero solo recicla el 10 % de los residuos generados. La mayor parte de los residuos terminan en rellenos sanitarios (54 %) o en vertederos a cielo abierto (34 %), lo que implica riesgos sanitarios y ambientales. La región enfrenta problemas como la falta de planificación, financiamiento, infraestructura, tecnología, regulación y participación social para un desarrollo integral y sostenible de los desechos (BBC News Mundo, 2019).

El municipio de San Juan de Betulia, situado en el departamento de Sucre, Colombia, enfrenta desafíos significativos en la gestión operativa de recolección de residuos. En primera instancia, las rutas de recolección de basuras fueron establecidas de manera manual y empírica, careciendo de un estudio sistemático que garantice la eficiencia de las rutas establecidas, de manera que resalta la falta de conocimiento técnico y especializado en la planificación de rutas de recolección de basura, esta carencia de capacitación y práctica en logística y dirección de residuos pudo contribuir a la adopción de enfoques empíricos. También, la limitación de recursos financieros o la ausencia de fondos suficientes para invertir en la planificación y mejora de rutas de recolección de basura puede ser una causa principal. Cointreau S., (1982), señala que, en muchos municipios, especialmente en naciones de ingresos medianamente bajos, la gestión de residuos sólidos se ve forzada por la falta de recursos financieros adecuados.

De acuerdo con Derigs et al., (2012), la optimización de rutas de recolección de residuos sólidos es fundamental para mejorar la eficiencia y reducir costos en la gestión de residuos. Cuando las rutas se planifican y optimizan de manera adecuada, se reduce la duplicación de esfuerzos y se minimiza la distancia de recolección recorrida por los vehículos. Pero esta deficiencia de planificación adecuada ha llevado a ineficiencias logísticas, mayores costos operativos y un impacto ambiental negativo debido al consumo innecesario de recursos (Melo et

al., 2017). Estos efectos negativos se deben a la descoordinación en la recolección de basura, lo que resulta en una asignación ineficiente de recursos y un aumento en los gastos operativos, lo cual impacta negativamente el presupuesto municipal.

Por otro lado, la acumulación de basura puede aumentar los riesgos sanitarios al atraer plagas y vectores de afecciones que afectan directamente en el bienestar de la localidad (Ferronato & Torretta, 2019). La optimización de rutas de recolección de residuos sólidos es un desafío crucial para mejorar la eficiencia de estos servicios (Figueira et al., 2016). De lo contrario, genera emisiones innecesarias de carbono y se consume más combustible de lo necesario, lo que contribuye al cambio climático y a la degradación ambiental.

En este contexto, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo diseñar rutas de recolección de residuos, basado en métodos de optimización con el potencial de ayudar en la minimización de los costos operativos, pudiendo definir cuál es la mejor ruta de recolección de residuos en San Juan de Betulia. Esto implica la minimización de la distancia recorrida, el tiempo empleado y los recursos utilizados. El problema de rutas de recolección de basuras es un desafío complejo que ha sido abordado en la literatura desde diversas perspectivas (Repoussis et al., 2007).

De acuerdo con lo anterior, se origina la siguiente pregunta problema:

¿Cómo diseñar rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en San Juan de Betulia, qué minimicen las distancias recorridas?

## **Marco Conceptual y Teórico**

La fundamentación de esta investigación nos permite adentrarnos en el entramado conceptual y teórico que sustenta nuestro enfoque hacia la gestión eficiente de residuos sólidos, específicamente, en el diseño de rutas para la recolección de basuras municipales, efectuando un estudio de operación para la minimización de las distancias recorridas. Identificar estos parámetros y criterios a través de la compilación de datos e información de fuentes primarias, ayudará a concebir la formulación un modelo matemático que represente el problema de recolección de residuos sólidos por medio de métodos de programación matemática, de manera que se pueda validar mediante la aplicación de datos reales obtenidos en el municipio San Juan de Betulia (Sucre, Colombia).

En Colombia la noción de residuos sólidos desde su inclusión en el derogado decreto 2104 de 1983 ha tenido una evolución a causa de la ambigüedad conceptual y los lineamientos para el manejo de desechos establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Montes Cortés, 2018). Actualmente el Decreto 1713, (2002), establece que, un residuo sólido o desecho se define como cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido que resulta del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios; abandonados, rechazados o entregados por el generador pudiendo ser apto de lucro o renovación en nuevos bienes con utilidad económica, o bien ser destinados a la disposición final al ser clasificados en aprovechables y no aprovechables según su potencial para ser reutilizados o reciclados.

La acumulación de residuos sólidos ha generado uno de las primordiales dificultades que aquejan a la sociedad a través del tiempo y que tiene un impacto directo en las problemáticas ambientales que han venido en ascenso en los últimos dos decenios del siglo XX y los iniciales

del XXI (González J., 2016). Dentro de la singularidad de los residuos sólidos existe una clasificación de la cual encontramos los residuos sólidos urbanos (RSU) que comúnmente se le conoce como “basura” las cuales provienen de los centros urbanos en expansión como un problema social (Barradas Rebolledo, 2009). Por lo general la recolección de los residuos sólidos urbanos se encuentra a cargo de la Municipalidad, quienes son los delegados de la dirección de los Servicios Comunes, entre ellos la función de limpieza municipal (Colomina A., 2005). Los impactos generados por los residuos sólidos urbanos se presentan como un reto para la gestión municipal (Bartra Gómez & Delgado Bardales, 2020), que buscan implementar, según André García & Cerdá Tena, (2006), un cúmulo de procedimientos dirigidos a dar a los residuos generados en un espacio específico el destino más apropiado desde el punto de vista económico y ambiental, considerando sus particularidades, volumen, origen, potencial de recuperación y venta, costos de tratamiento y cumplimiento normativo.

La recolección de residuos sólidos urbanos hace parte de los servicios públicos e incluyen diferentes fases: que abarcan desde *“recogida en el entorno urbano hasta el depósito en instalaciones de eliminación o tratamiento”* (Bel G., 2006), está presente en cada etapa del ciclo de vida de los residuos sólidos e implementa diferentes tecnologías enfocadas en el diseño, planeación y puesta en marcha de sistemas de recolección, transferencia, recuperación y eliminación de residuos sólidos (Fuentes et al., 2008). Tchobanoglous et al. (1982), define que *“un residuo sólido abarca tanto la masa heterogénea de desechos de la comunidad urbana como la acumulación más homogénea de residuos agrícolas, industriales y minerales”*. La gestión de residuos sólidos urbanos representa un trabajo complicado con implicaciones sociales, económicas, tecnológicas y ambientales tanto para la comunidad como para las regencias locales (Betanzo-Quezada et al., 2016).

En Colombia los requerimientos y especificaciones para el manejo de diferentes corrientes de residuos en la sociedad están establecidos en la política para gestión integral de residuos sólidos (GIRS) y abordados mediante la jerarquización de los residuos (Rodríguez Herrera, 2012), la planificación de (GIRS) deben contemplar cada constituyente del servicio de limpieza entre los cuales encontramos el diseño Operacional del Sistema de Recolección y Aprovechamiento su principal objetivo consiste en *“diseñar rutas de recolección de residuos que se alineen con la distribución de puntos de mayor generación y que abarquen todo el casco urbano, estableciendo horarios y frecuencias adecuadas”* (Macdonald M., 2017).

### ***Antecedentes***

En una reciente publicación para la revista científica cultura, comunicación y desarrollo, Pérez & Díaz, (2023), realizan un estudio de optimización del ruteo de vehículos para la recolección de desechos sólidos municipales en la provincia de Cienfuegos para su aplicación formula una variación del problema original CPP el cartero chino rural (RPP) para poder minimizar la distancia total se plantea el modelo matemático el cual combina un algoritmo determinístico del tipo Ramificación-Acotación (Taha H., 2012), con el algoritmo de Hierholzer (Yordá Pérez, 2014), para consiguiente trazar un circuito que recorre todas las cuadras iniciando y terminando en el mismo punto con respecto a las restricciones planteadas en el modelo matemático y formulado en el modelo de programación lineal (enteros) Modelo CPLEX PLE, de manera que se puede concluir que su aplicación fue un éxito y dentro de sus principales resultados se obtuvo una *“disminución de casi 10.000 km al mes y más de 100.000 km, lo que representa un ahorro mensual superior a los 10.000 litros de combustible”*

De igual manera (Braier et al., 2015), llevan a cabo una implementación del problema del cartero rural a la recogida de residuos reciclables en Argentina para la municipalidad de Morón,

aplicando en particular el problema del cartero rural (RPP) abierto en grafos mixtos e implementan un enfoque simple fundado en planos de corte para solucionar el modelo de programación entera para este estudio mediante el Solver SCIP para la combinación de subtours. Dentro de sus principales resultados se encuentran; mayor alcance en todas las cuadras disminuyendo la distancia total del recorrido en algunos sectores aumentó levemente, antes de la implementación se saltaban hasta 60 cuadras generando inconformidad y reclamos estas han disminuido considerablemente.

Arias Hernández, (2015), analiza e implementa una metaheurística basada en el algoritmo genético de Chu-Beasley (AGCB) para solucionar el problema del agente viajero (TSP) y su variación, el problema de rutas de vehículo (VRP). Dentro de los productos adquiridos en el progreso de esta investigación se logra concluir que el algoritmo Chu-Beasley generó soluciones óptimas acordes a las distintas pruebas realizadas, finalizando de esta manera con la reducción de las distancias recorridas y la minimización del tiempo de recorrido.

Así mismo Silva Rodríguez & Ramírez Gil, (2019), ejecutan un modelo de recolecta de residuos sólidos fundamentado en el Problema del Cartero Chino formulando un modelo matemático en programación lineal entera mixta para realizar el diseño de la red de logística inversa de residuos sólidos domésticos en el municipio de Samacá Boyacá Para la ejecución del modelo emplean el software especializado de investigación de operaciones LINGO pero este arroja resultados en forma de matriz binaria por ende emplean un programa sienta sus bases en el algoritmo de Hierholzer (Yordá Pérez, 2014), que se desarrolla en un software MATLAB para ordenar la matriz y establecer la secuencia correspondiente a la ruta óptima Entre los hallazgos principales, se destaca una reducción del 23.45% en la distancia global recorrida, reducción de costos diferentes a los de capacitación y socialización en el modelo.

Manrique Ortega, (2020)), optimiza el sistema de recolección de residuos sólidos domiciliarios en el distrito de Pocollay de la de ciudad de Tacna basados en el problema del agente viajero realiza el procesamiento de trazado de nuevas rutas por medio de la ubicación y representación de las rutas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) georeferenciando las locaciones en el mapa empleando herramientas como AutoCAD y ArcGIS en la que por medio de la programación de esta última herramienta ArcGIS se logra trazar y determinar la ruta más óptima, entre los resultados clave, se estableció la reducción del consumo de combustible de 180 galones semanales a 95,3 galones por semana disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> anuales en un 47% y fueron disminuidos 85 min del tiempo de recorrido de 158,84 km diarios siendo un resultado aceptable.

González Restrepo & Gómez Veloza, (2020), implementaron una solución al problema de ruteo vehicular con entregas y recogidas o VRPPD por sus siglas en inglés (Vehicle Routing Problem with Pickup And Delivery), para una empresa logística en la ciudad de Bogotá, donde buscaron la solución por medio de una heurística híbrida, utilizando la combinación del algoritmo de pétalos mejorado con la heurística del vecino más cercano y programados bajo el lenguaje de Visual Basic en Excel, con el fin de mejorar la asignación de clientes de cada ruta, y de esta manera minimizar las distancias para cada carro, por consiguiente, optimizar el proceso logístico. Dentro de los principales resultados se obtiene una disminución en el total de la distancia recorrida de 163,76km; respecto al manejo inicial por la empresa se presenta una disminución de 7,42 km con la heurística final del vecino más cercano, pero el algoritmo de pétalos permite optimizar un total de 7,47km, siendo un poco mejor.

Villamarín Santi, (2020), desarrolla una propuesta para la optimización logística de las rutas de recolección de residuos sólidos en áreas urbanas del Gobierno Autónomo

Descentralizado del cantón Pastaza con el propósito de reducir los costos operativos formulan el problema del Agente viajero (TSP) mediante el Algoritmo conocido como colonia de hormigas ACO por sus siglas en inglés y por medio de la programación en Java y uso de herramientas tales como AutoCAD, Google Maps. para la geolocalización y levantamiento de planos y simulación de las nuevas rutas. Los principales resultados generados corresponden a la disminución de las distancias en un 9,8%, evitando 1577,0736 km anuales de recorrido con un ahorro de 546,72 anualmente.

Pauccara Pinares, (2019), aplica el problema del agente viajero como solución a la logística de recolección de residuos sólidos por parte de la Municipalidad Distrital de San Jerónimo; el autor emplea el método de Branch and Bound con el fin de minimizar las distancias recorridas por los carros recolectores durante su labor.

Carrasco Peña & Díaz Toro, (2017), propone la optimización de las rutas recolectoras de residuos sólidos en el distrito de Chiclayo (en las 32 zonas) con el propósito de incrementar la eficiencia del servicio de limpieza, para lo cual implementa el modelo matemático del Problema del Agente Viajero (TSP), donde mediante el software WinQSB genera la tabla de secuencia de nodos, generando la gráfica de todas las rutas posibles, y obteniendo, dentro de los principales resultados, la reducción de distancia en un 14.9%, lo que se traduce en 22.33 Km diarios y 692.11 Km mensuales, además, se reduce un 28.27% el tiempo de recorrido, equivalente a 3.01 Hr/Día, 93.40Hr/mes.

Álvarez Porras, (2014), incurre en la planificación eficiente de las rutas para una empresa dedicada a servicios de paquetería, mensajería y logística mediante la implementación de una heurística apoyada en el algoritmo del vecino más cercano para resolver un problema VRP, el cual se desarrolló utilizando Python en un procesador Intel Core i3 con el sistema operativo

Windows 7 en la que se establecen soluciones basadas en los Constructivos Aleatorizado (CA) y los Constructivos sin Aleatorización (CSA), teniendo entre sus principales resultados que el método CA reduce más de 33 ( %) el valor de la distancia del método CSA.

Contreras Juárez et al., (2021), ejecuta una aplicación del algoritmo del vecino más cercano para resolver el problema del agente viajero del cual se espera reduzcan los costos operacionales, en una empresa de venta de material hemerográfico, para ello emplean Google Maps como herramienta de geolocalización y trazos de longitudes con el fin de generar la matriz de distancias (km) entre los clientes y la empresa, obteniendo resultados tales como, un ahorro del 27.7% en km (distancias recorridas), así mismo, se logró reducir el tiempo empleado en un 52.5%.

### ***Teoría de Grafos***

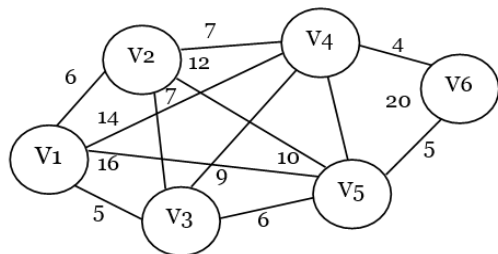
La teoría de grafos tiene sus inicios en 1736 mediante el lanzamiento del artículo titulado “Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis”, traducido al español como “La solución de un problema referente a la geometría de posición”, el cual fue desarrollado por el matemático suizo Leonhard Euler, quien abordó de manera resolutiva el conocido problema de los puentes de Königsberg en dicho artículo (Combariza, 2003). Problema que consistía en encontrar una ruta que permitiera cruzar los siete puentes, visitando cada uno solamente una vez y retornando al punto de partida inicial.

Para entender la teoría de grafos es necesario abordar algunos conceptos básicos.

Un grafo se describe como una organización de datos que facilita la representación de diversas relaciones entre objetos. En un grafo se identifican principalmente dos elementos: los vértices, que son puntos o nodos, y las aristas, que son conexiones que enlazan un vértice con otro (Asís López, 2010). Un grafo  $G$  deriva de un conjunto de vértices o nodos  $V$  y de un

conjunto de arcos o aristas  $A$ , todos ellos unen un vértice con otro, si cada arista posee un peso o atributo el cual es un valor numérico no negativo ya sea la distancia entre nodos o el costo de trasladarse del nodo inicial al nodo final se le conoce como grafo ponderado  $G = V, A$  (Guidici E & Bris Lluch, 1997).

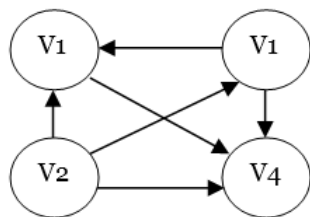
**Figura 1**  
*Grafos*



*Fuente: Elaboración propia*

Un concepto importante para abordar es el grafo dirigido, los cuales representan aquellos que mantienen una dirección de sus arcos y se encuentran representados por un par de vértices de inicio y final  $a = (v_j, v_i)$  (Guidici E & Bris Lluch, 1997). Dentro de sus características encontramos el grado de un vértice o nodo  $grad(v)$  el cual hace referencia al número de vértices adyacentes a él si este número es ( $=0$ ) este será un nodo aislado.

**Figura 2**  
*Grafos dirigidos*



*Fuente: Elaboración propia*

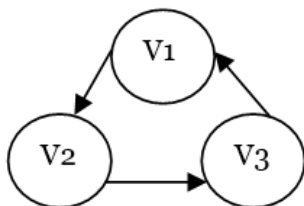
Otros conceptos relevantes en la teoría de grafos corresponden a la definición del *Camino cerrado* interpretado de la siguiente forma el camino  $X$  es cerrado siempre  $i$  cuando el primer y

último nodo sean iguales, es decir que su nodo de partida sea igual que al de retorno.  $V_0 = V_n$

(Asís López, 2010).

**Figura 3**

*Camino cerrado*



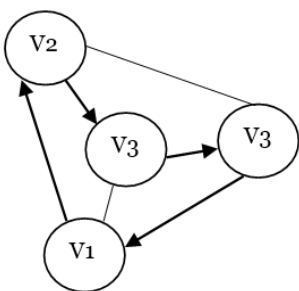
*Fuente: Elaboración propia*

*Camino Hamiltoniano* el cual corresponde a un camino  $X$  de longitud  $n$  desde un vértice  $v$  hasta un vértice  $u$  se establece como una serie de  $n$  vértices que deben recorrerse para llegar desde el vértice inicial al vértice final, pasando por cada vértice exactamente una vez.

Formalmente,  $X = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ , donde  $v = v_1$ ;  $v_1$ , es adyacente a  $v_{i+1}$  para  $i = 1, 2, \dots, n-1$ ; y  $w = v_n$  (Asís López, 2010).

**Figura 4**

*Camino Hamiltoniano*

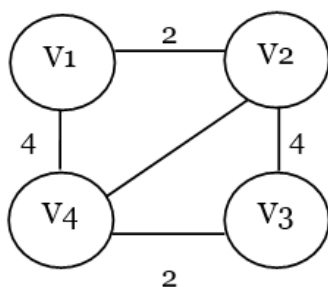


*Fuente: Elaboración propia*

*Matriz de adyacencias*  $M$  de un  $G = (V, A)$  de  $n$  nodos es una matriz  $M_{n \times n}$  de valores booleanos, donde  $M(v_i, v_j)$  es verdadero si existe una arista (o arco, en el caso de grafos dirigidos) desde el nodo  $v_i$  al nodo  $v_j$ . En el caso de grafos no dirigidos, esta matriz es simétrica, lo que significa que  $M(v_i, v_j) = M(v_j, v_i)$ . Esta representación es fundamental para la

visualización y manipulación computacional de grafos en diversos contextos (Guidici E & Bris Lluch, 1997).

**Figura 5**  
*Matriz de adyacencias*



*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 6**  
*Matriz es simétrica*

	v1	v2	v3	v4
v1	0	2	8	4
v2	2	0	4	8
v3	8	4	0	2
v4	4	8	2	0

*Fuente: Elaboración propia*

### **Problemas de Ruteo**

Los problemas de diseño de rutas hacen parte de la gestión integral de desechos sólidos y están presentes en varias áreas de la gestión de la distribución y la logística (Corberán et al., 2005). El problema de ruteo por arcos (VRP) o ruteo de vehículos, por primera vez fue propuesto en el año 1959 por Dantzing y Ramser los cuales desarrollaron la formulación del problema de aplicación en la distribución de combustible, la cual ha sido un referente para la ejecución posterior de formulaciones adicionales que aumentan tanto el número de variables como de restricciones (Olivera & Alfredo, 2014).

El problema de ruteo sobre arcos se define como la tarea de diseñar rutas eficientes para vehículos de reparto que tienen una capacidad predefinida, estos vehículos parten desde una central de acopio para atender a un grupo de clientes distribuidos en diferentes localizaciones, cada uno con una demanda específica conocida (Castillo Ferrari, 2017), los problemas de ruteo sobre arcos surgen como resultado de desafíos relacionados con el mantenimiento de calles, el desalojo de nieve, la gestión de residuos y la logística urbana (Dror M., 2000), estos problemas tienen como objetivo encontrar rutas que cubran ciertos arcos dentro de una red. Además, muchos de estos problemas consideran la capacidad del vehículo, asegurándose de no excederse durante las operaciones de servicio (Assad & Golden, 1995).

Estos tipos de problemas están basados en la teoría de Grafos, la cual fue desarrollada por Leonhard Euler en el siglo XVIII como un subcampo de la topología algebraica esta teoría fue incorporada a la geografía en la década de los sesenta por W.L. Garrison y F.D. Marble, principalmente para estudiar la estructura de las redes de transporte en el espacio geográfico (Cardozo et al., 2009). *“Muchos problemas de planificación de rutas de distribución han encontrado soluciones alternativas en la teoría de grafos, debido a que su modelado se facilita por la similitud conceptual con las estructuras de los grafos”* (Espinal et al., 2011).

El problema de ruteo de arco ha tenido gran trascendencia y relevancia en la actualidad gracias a la necesidad de diseñar eficientes estrategias de distribución que minimicen los costos operacionales en los sistemas de distribución, por tal razón el problema de ruteo de arco tiene diversas variantes y diversas aplicaciones en el mundo real este problema no considera restricciones temporales sobre decisiones de ruteo a excepción de aquellas que restringen el largo de la ruta, dentro de los principales problemas de ruteo (Castillo Ferrari, 2017), se encuentran:

- El Problema del Vendedor Viajero.

- El Problema del Cartero Chino.
- El Problema de los M Vendedores Viajantes.
- El Problema de Ruteo con Depósito Único y Múltiples Vehículos.
- El Problema de Ruteo con Múltiples Depósitos y Múltiples Vehículos.
- El Problema de Ruteo con Depósito único, con Múltiples Vehículos y Demanda Estocástica.
- El Problema del Cartero Chino con capacidades.

**Problema del Cartero Chino.** De las diferentes aplicaciones que posee el problema del ruteo de arco el modelo con el que muchos autores formulan los problemas de recolecta de residuos sólidos está basado en el problema del cartero chino (CPP por sus siglas en inglés) planteado por el matemático chino Kwan Mei-Ko quien propuso inicialmente este problema en un artículo publicado en un diario chino en 1960. Este es el primer problema de rutas por arcos que explora la creación de un ciclo euleriano con el costo más eficiente (Yordá Pérez, 2014).

Valenzuela Alcaraz, (2017), expone que el CPP consiste en encontrar una ruta con la menor distancia y costo posible, donde cada arista sea visitada al menos una vez, siendo análogo al recorrido de un cartero que debe entregar correspondencia, cubriendo cada calle de una población al menos una vez, y comenzando y terminando en la oficina de correos. Este problema se puede definir como un grafo en el que todos sus vértices se encuentran conectados de manera no dirigida  $G = (V, A, C)$ , donde  $C$  es la matriz de costos.

Una variante del CPP es el Problema del Cartero Rural (Rural Postman Problem o RPP) la cual fue propuesta por Orloff, (1974), donde solo aborda un subconjunto de las calles (aristas) que deben ser visitadas (Valenzuela Alcaraz, 2017). Por otro lado, Golden & Wong, (1981), sugieren una ampliación del problema del Cartero Rural, con limitaciones de capacidad en los

vehículos conocido como Capacitated Arc Routing Problem (CARP) o Problema de Ruteo de Arcos con Capacidad Limitada en los Vehículos.

Maniezzo, (2004), propone el siguiente modelado de Capacitated Arc Routing Problem (CARP)

Las variables de decisión son definidas como:

$$x_{ijk} = \{ 1 \text{ si el arco } (i,j) \text{ es recorrido por el vehículo } k \text{ } 0 \text{ en cualquier otro caso} \}$$

El problema puede expresarse matemáticamente como un problema de programación lineal de la siguiente manera:

$$\text{minimizar } \sum_{(i,j) \in E} C_{ij} \sum_{(k) \in K} X_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{(k) \in K} X_{ijk} = 1 \quad (i,j) \in R \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V_r - \{0\}} \sum_{(k) \in K} X_{0jk} = |K| \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in R} q_{ij} X_{ijk} \leq Q \quad k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_r} X_{ijk} = \sum_{i \in V_r} X_{ijk} \quad i \in V_r, \quad k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{i \notin S} X_{ijk} \geq \sum_{i \in V} X_{hjk} \quad S \subseteq V_r - \{0\}, k \in K, h \in S \quad (6)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i,j) \in R, k \in K \quad (7)$$

Función objetivo (1) procura reducir el costo total de recorrido, sujeta a las siguientes restricciones (2) asegura que todos los arcos requeridos sean atendidos por un solo vehículo (3)

el número de vehículos utilizados es igual al número de vehículos Accesible (4) asegura que no se sobrepase la capacidad de los vehículos disponibles (5) asegura la continuidad de las rutas, es decir, si un vehículo K ingresa a una calle, deberá salir de ella (6) elimina sub-rutas, asegurando que no haya ciclos al interior de la ruta antes de retornar al depósito (7) asegura que las variables de decisión sean binarias, tomando únicamente valores de 0 y 1 (Maniezzo, 2004).

**Problema del Vendedor Viajante.** El problema del agente viajero o también conocido como TPS (Traveling Salesman Problem) por sus siglas en inglés, en particular, forma parte de los problemas de más conocidos y relevantes dentro de las ramas de la ingeniería a través de la historia del diseño y optimización logística, gracias a su complejidad computacional de tipo NP-Completo hasta incluso NP-HARD demostrado en el año 1973 por Richard M. Karp (Ircio Fernández, 2014).

Tiene como objetivo encontrar un ciclo o camino hamiltoniano al que la suma de los costos del tour sea lo menor posible, siendo un ciclo que no utiliza los nodos más de una vez y pasa por todos los nodos de una red (Espinoza Flores et al., 2015). Este modelo se adecua a la planeación de rutas vehiculares que consiste en encontrar un tour o ruta donde el vehículo de recolección pase por todos los nodos y regrese a la posición original de modo que la distancia total recorrida sea la mínima posible y cada nodo sea visitado solamente una vez (Villamarín Santi, 2020).

Según López et al., (2014), *“El TSP es uno de los problemas más famosos y complejos de las ciencias computacionales”*, tratado en diversas disciplinas de la ingeniería en especial aquellas aplicaciones de carácter logístico, el problema del agente viajero resalta dentro de la clasificación de los Problemas de Optimización Combinatoria lo que establece que considerando cierto grupo de variables cada una puede tener N valores distintos Dado que el número de

combinaciones tiende a ser exponencial, esto resulta en múltiples soluciones viables que pueden calcularse en un tiempo finito para una instancia, (Fuentes Penna, 2014a).

El origen del TPS no está bien definido en la historia, pero se asegura que antes de la década de 1800 este aún no había sido formulado matemáticamente hasta que el matemático irlandés Sir William Rowan Hamilton y el matemático británico Thomas Penyngton Kirkman, de manera paralela, plantearon de forma matemática el problema del TSP (Problema del Vendedor Viajero); Hamilton, además, introdujo el juego Icosian, donde los jugadores debían completar recorridos por 20 puntos específicos utilizando únicamente las conexiones indicadas entre ellos. (Martínez Vargas, 2017).

Varios científicos afirman que el término del “problema del agente viajero” fue introducido oficialmente en la Universidad de Princeton entre los años 1931 y 1932, pero se sostiene que la Universidad de Harvard, Merrill Flood fue uno de los primeros pioneros en la búsqueda de una ruta óptima para un autobús escolar (Martínez Vargas, 2017), sin embargo la primera vez que fue propuesto el problema del TPS matemáticamente se da a principios de la década de 1930 donde se relata el trabajo realizado en la Universidad de Viena por el matemático Karl Menger el cual definió con precisión y planteó muchas de las propiedades del (TSP) (Ircio Fernández, 2014).

*“Para la década de los 50 y 60 el problema fue ganando popularidad muy rápido, destacando el trabajo de George Dantzig, Delbert Ray Fulkerson y Selmer M. Johnson (1954)”* (Dantzig et al., 1954a). Estos representaron el TSP como un problema de programación lineal entera y desarrollaron un algoritmo de planos de corte para resolverlo; trabajo culminado en 1954 con el lanzamiento al público del artículo *“Solution of a large scale traveling-salesman”* por Dantzig, (Arias Hernández, 2015). Se encontró una solución para un caso con 49 ciudades,

una por cada estado de EE. UU., lo cual representó un gran avance en la investigación del Problema del Vendedor Viajero (TSP), impulsando a investigadores y matemáticos a innovar en el desarrollo de algoritmos capaces de resolver problemas de mayor magnitud (Villamarín Santi, 2020).

El principal objetivo del TPS consiste en hallar un ciclo o camino hamiltoniano al que la suma de los costos del tour sea lo menor posible, entendiendo que “costos” puede ser reemplazado por distancia o tiempo de recorrido siendo un ciclo que no utiliza los nodos más de una vez y pasa por todos los nodos de una red (Espinoza Flores et al., 2015). Este modelo se adecua a la planeación de rutas vehiculares que consiste en encontrar un tour o ruta donde el vehículo de recolección pase por todos los nodos y regrese a la posición original de tal forma que la distancia total recorrida sea mínima y cada nodo sea visitado solo una vez (Villamarín Santi, 2020). Dentro de las principales aplicaciones del TPS se encuentran presentes en la logística (distribución de mercancías, correo, rutas escolares), sin embargo, podemos hallar otras aplicaciones de estos problemas en las industrias (secuenciación de tareas, producción de circuitos integrados) o en genética (Ircio Fernández, 2014).

Según Dantzig et al., (1954), el problema puede expresarse de la siguiente manera:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$a \sum_{j \in \Delta^+(i)} X_{ij} = 1 \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} X_{ij} = 1 \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i) \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E \quad (5)$$

Rivera Rodríguez, (2019), describe de la siguiente manera el proceso: “Las variables binarias  $x_{ij}$  indican si el arco  $(i, j)$  es utilizado en la solución. La función objetivo (1) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados. Las restricciones (2) y (3) aseguran que la ruta visite cada nodo exactamente una vez. Y la restricción (4) conocida como restricción de eliminación de sub-rutas, garantiza que cualquier subconjunto de nodos  $S$  sea visitado exactamente una vez en la ruta.”

### ***Investigación de Operaciones (IO)***

Su historia se remonta para la década 1970 con los grandes avances en la administración y la revolución industrial pero su desarrollo se lleva a cabo entre las décadas de 1910 a 1950 motivado a aplicaciones en el ámbito militar durante la primera y segunda guerra mundial y otros aportes relevantes a la administración ejemplo en 1911 Frederick Taylor también llamado como el “padre de la administración” desarrolla su obra “The Principles of Scientific Management”, marcando el comienzo de la administración de operaciones y en paralelo Frank Gilbreth aplica los principios de economía de movimientos en 1913 Henry Ford introdujo el concepto “*producción en masa*” (González Ariza, 2007).

Gracias a las implicaciones militares originadas durante la segunda guerra mundial en 1945 se desarrollan un nuevo enfoque en las tomas de decisiones originadas en la investigación de operaciones para abordar problemas estratégicos y tácticos en el campo de batalla (González Ariza, 2007), a las que contribuyó el mejoramiento de técnicas de IO, por ejemplo, el método simplex desarrollado en 1947 George Dantzig, cual destacó el inicio de investigación de

operaciones actual. Gracias al éxito obtenido tras la guerra esta fue alcanzando gran reconocimiento e interés por investigadores y profesionales en otros campos como las matemáticas aplicadas, ingeniería y la administración que comenzaron a desarrollar y plantear diferentes soluciones a problemas de optimización y sus aplicaciones por ejemplo optimización lineal, discreta y entera mixta entre otras (González Velarde & Ríos Mercado, 1999).

La Investigación de Operaciones tiene como objetivo localizar la solución óptima utilizando el método científico a desafíos relacionados con la dirección y coordinación de las actividades ya sea el caso particular de una organización, aunque esta se encuentra presente en distintas áreas, tales como, la manufactura, el transporte, planeación financiera, cuidado de la salud, servicios públicos, etc. (Rivera Rodríguez, 2019).

Según Hillier & Lieberman, (2010), y Taha, (2012), las fases de un estudio de Investigación de Operaciones

*Definición del problema:* tiene como finalidad encontrar tres elementos esenciales del problema de decisión, explicar las posibles soluciones disponibles, establecer el objetivo del estudio y definir las restricciones por las cuales opera el sistema modelado.

*Construcción del modelo:* se busca transformar la descripción del problema en ecuaciones matemáticas. El modelo puede ser adaptado a otros modelos convencionales, aunque en algunos casos las ecuaciones matemáticas pueden ser tan complejas que el equipo de investigación de operaciones opte por simplificar el modelo y emplear métodos heurísticos, o considerar la simulación si resulta pertinente.

*Solución del modelo:* se utilizan algoritmos de optimización reconocidos, considerando el análisis de sensibilidad que implica obtener datos sobre la solución óptima cuando el modelo se enfrenta a variaciones específicas en algunos de sus parámetros.

*Validez del modelo:* su objetivo principal es determinar si el modelo puede predecir de manera precisa el comportamiento del sistema bajo estudio. Una técnica habitual para validar un modelo consiste en contrastar los resultados con datos históricos. El modelo se considera válido si logra reproducir de manera consistente el rendimiento pasado bajo condiciones de entrada de datos idénticas.

*Implementación de la solución:* Involucra la conversión de los resultados en directrices operativas que sean claras y comprensibles para los responsables de administrar el sistema recomendado.

### ***Optimización***

La optimización hace parte fundamental de diversos campos de distintas ciencias como, por ejemplo, la informática, la inteligencia artificial o la investigación de operaciones, y se define como el “*proceso de intentar encontrar una mejor solución posible a una problemática de optimización, por lo regular bajo un tiempo limitado*” (Duarte Muñoz et al., 2007). Dentro de sus categorías podemos encontrar aquellos problemas de optimización combinatorios que consiste en encontrar un objeto entre un conjunto finito de posibilidades, en el que dichas soluciones se codifican implementando variables discretas con el mecanismo de búsqueda consistiendo en explorar un espacio de recursos (del problema), del cual puede ser representado mediante listas, conjuntos, matrices o grafos, y donde se encuentran problemas ejemplo como el agente viajero (TSP), el problema de asignación cuadrática (QAP), problemas de planificación entre muchos más (Martínez, 2011).

Según Ruiz Liza & Vidal Urdiales, (2016), los problemas de optimización buscan determinar el valor óptimo (ya sea máximo o mínimo) que una función específica alcanza sobre

un conjunto dado de elementos. Esto se logra de manera precisa mediante un conjunto  $X$  y una función  $f$  que asigna a cada elemento  $x$  un valor  $f(x)$ .

$$f(x) \leq f(x_0) \text{ para cada } x \text{ de } X$$

Y para el caso de un mínimo, un  $x_1$  de  $X$  que cumpla

$$f(x_1) \leq f(x) \text{ para todo } x \text{ de } X$$

En forma más abreviada  $f(x_0) = \max f(x), f(x_1) = \min f(x)$

Aquellos elementos pertenecientes al conjunto  $X$  son los recursos del problema y  $f(x)$  es concebido como el valor del recurso ya sea este un costo, un tiempo, una cantidad de producción, etc. A la función  $f(x)$  se le connota como la función objetivo y delimitados por ciertas restricciones dados sus elementos y algoritmos.

### ***Complejidad Computacional***

Según Cortéz, (2004), La Teoría de la Complejidad Computacional se basa en un enfoque no funcional, donde se destaca la manera en que se realiza el cálculo y su complejidad, considerando los recursos utilizados en relación con una “clase de complejidad”. Es un conjunto de funciones que pueden ser computadas bajo ciertas restricciones de recursos (Montealegre Barba, 2012). Existe una escala para medir la complejidad computacional.

*P*: Problemas resolubles en tiempo polinómico.

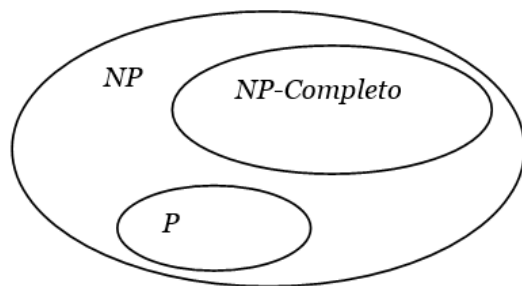
*P-completo*: Los problemas más complejos dentro de la clase *P*.

*NP*: Problemas cuyas soluciones afirmativas pueden ser verificadas en tiempo polinómico.

*NP-completo*: Los problemas más complejos dentro de la clase *NP*.

*NP-duro*: Problemas para los cuales no se conoce ningún algoritmo que pueda resolverlos en tiempo polinómico.

**Figura 7**  
NP-Completo



*Nota: Relación entre los problemas  $N$ ,  $NP$ ,  $NP$  completo,  $NP$  duro (Duarte Muñoz et al., 2007).*

**Dificultad Algorítmica.** Según Cortéz, (2004), la Complejidad Computacional es la rama de la teoría de la computación que analiza los recursos (temporales) necesarios para que un algoritmo resuelva un problema; generalmente, a medida que un problema es más complejo, requiere mayores recursos, para estos tipos de problemas, como el tiempo que necesitará el algoritmo para ejecutar  $n$  cantidad de pasos con el fin de resolver el problema; la medida del tiempo tiene que ser independiente de la capacidad de cómputo y otras especificaciones del equipo empleado para tal finalidad, ya sea de memoria o procesador; para aquellos casos en los que se necesita mayor tiempo de cómputo se le reconoce como problemas de complejidad temporal, en cambio aquellos que requieren de mayor memoria son considerados problemas de complejidad espacial.

Crehuet Lucas, (2022), el tiempo  $T$  necesario para un algoritmo depende del tamaño  $n$  de los datos; por lo tanto, la complejidad temporal se expresa como  $T(n)$ , y es importante destacar que no todos los datos tienen la misma relevancia en la complejidad algorítmica, para ello se establece un orden en la función  $T(n)$ , la cual expone la tendencia dominante para instancias grandes de datos y así expresar correctamente el comportamiento asintótico, donde una función  $g$  es confrontada con una función de referencia  $f$ .

“Sea la función  $f: N \rightarrow N$ , se dice que  $f(n)$  es  $O(g(n))$  o que  $f$  es del orden de  $g$  si existen constantes positivas  $k$  y  $n_0$  tal que, para  $n \geq n_0$  se tiene que  $f(n) \leq kg(n)$ ”.

De la anterior definición, se establece una relación entre las funciones  $f$  y  $g$  en función del tamaño de entrada  $n$ , medido en unidades de bits estableciendo la delimitación del crecimiento asintótico de estas funciones, excluyendo las constantes  $k$ , la clasificación de las complejidades algorítmicas según la notación  $O$  grande se desarrollan mediante la enumeración de los comportamientos asintóticos más comunes, organizados de menor a mayor crecimiento.

$$1 \ll \log n \ll n \ll n \log n \ll n^2 \ll n^3 \ll \dots \ll 2^n \ll n!$$

De aquí parten los conceptos de los algoritmos cuando toman distintos tiempos, tales como, algorítmicos en:

*Tiempo constante:* de tiempo  $O(1)$ , cuando  $T(n)$  limitado a un valor no dependiente al tamaño de la entrada.

*Tiempo logarítmico:* cuando  $T(n) = O(\log n)$  y se encuentra independiente de la base del logaritmo que aparece en la expresión.

*Tiempo lineal:* si su complejidad temporal es  $O(n)$  aumenta como máximo linealmente con el tamaño de la entrada.

*Tiempo sub cuadrático:* (o de tiempo log-lineal) si  $T(n) = O(n \log \log .^k n)$  para alguna constante positiva  $k$ .

*Tiempo cuadrático:* si  $T(n) = O(n^2)$ .

*Tiempo polinomio:* si su tiempo de ejecución está restringida por una expresión polinomio en el valor de la entrada para el algoritmo, es decir,  $T(n) = O(n^k)$  para alguna constante positiva  $k$ .

*Tiempo exponencial:* si  $T(n)$  está restringida por  $2^{poly(n)}$ , donde  $poly(n)$  es un polinomio en  $n$ , es decir, un algoritmo es de tiempo exponencial si  $T(n)$  está limitado por  $O(2^{nk})$  para alguna constante  $k$  o si  $T(n)$  es del orden de  $n$ .

**Algoritmos Exactos.** Los algoritmos exactos, aunque aseguran hallar la solución óptima para problemas de ruteo presentan un tiempo de ejecución exponencial al número de nodos limitándose a un reducido conjunto de nodos (Estayno et al., 2009). Como por mencionar, los algoritmos Branch and Bound, el cual consiste en hallar y (Bound) “podar” las ramas del árbol de soluciones que no son óptimas, mientras que, (Branch) “ramificar” las que puedan contener soluciones óptimas, y Cutting Plane (plano de corte), que se basa en abordar la totalidad del árbol de soluciones y no sus ramas, pero mediante ciertas restricciones para asegurar el cumplimiento de la función objetivo, de manera que este se repite hasta encontrar si es posible una solución óptima (Valenzuela Alcaraz, 2017). Estos algoritmos basados en la programación lineal entera (ILP), han sido aplicados en múltiples ocasiones para resolver el Problema de Ruteo de Arcos con Capacidad limitada en los Vehículos (CARP), como en el anteriormente mencionado (Martínez, 2011).

Según Tito Ontaneda & Yacelga Pinto, (2018), los cual citan a Cook et al., (2011), quien en su libro se refiere al Branch and Bound (B & B) como un método que haya sus orígenes en la búsqueda exhaustiva de soluciones para el TPS dentro de un conjunto específico; este se encarga de dividir el espacio de búsqueda en uno o varios subconjuntos que se pretende sean más fáciles de resolver que el original y consiste en iterativas ramificaciones que derivan diversos subproblemas que se deben solucionar mediante un subconjunto de tour o viajes que incluyen y/o excluyen ciertas aristas. En este sentido es importante aclarar que antes de seguir dividiendo el problema en subconjuntos de manera continua, existe la posibilidad de evitar la búsqueda

infructuosa de un subproblema que no representa una solución más óptima de la ya encontrada, y esto se basa en la inserción de un límite computado sobre el costo o para otros casos de distancia del tour. *“La idea es que, si el límite es mayor o igual al costo del tour ya encontrado, podemos descartar el subproblema sin riesgo de perder el mejor tour.”* (Tito Ontaneda & Yacelga Pinto, 2018).

Según Muñoz Rodríguez & Montañez Márquez, (2023), el algoritmo Held-Karp, también llamado como Bellman-Held-Karp, es una técnica de programación dinámica en la que diversos autores afirman, es el algoritmo óptimo más conocido, el cual fue desarrollado en 1962 por Bellman, Held y Karp para solucionar el Problema del Vendedor Viajero (TSP), utilizando una matriz de distancias entre ciudades para determinar la ruta más corta que visite cada ciudad exactamente una vez antes de regresar al punto de partida.

Alfaro, (2020), indica el procedimiento del algoritmo de Held y Karp:

Dado el conjunto de vértices  $\{1, 2, \dots, n\}$ , donde 1 es tanto la ciudad de partida como de retorno, para todo vértice  $i$  (excepto el vértice 1) se busca establecer el camino de costo mínimo que comience en 1 y termine en  $i$ , asegurando que todos los vértices del conjunto sean visitados una sola vez. Para ello se denota una función.

Coste,  $cost(i)$ , y su costo total del ciclo dada por  $cost(i) + d(i, 1)$ , siendo  $d(i, 1)$  la distancia que hay para llegar desde el vértice  $i$  al vértice inicial, seleccionando aquel camino óptimo cuyo coste sea menor,  $\min_{i = 2, \dots, n} [cost(i) + d(i, 1)]$ . Para hallar esta solución en programación dinámica no se da siempre de manera sencilla, ya que es necesario relacionar los subconjuntos de vértices posibles representándolos en la matriz de distancias, una vez esta sea determinada el ejercicio suele resolverse de manera más sencilla, dicho esto, el algoritmo proporciona soluciones exactas delimitadas a instancias relativamente pequeñas de vértices, ya

que igualmente su complejidad temporal es exponencial al número de nodos y se expresa como  $O(n^{2n})$ , donde  $n$  expresa el número de ciudades que el viajero debe visitar.

Tito Ontaneda & Yacelga Pinto, (2018), hace referencia al libro de Davendra, (2010), para afirmar que “*el límite inferior del Held – Karp es empleado para juzgar y evaluar el desempeño de cualquier nueva solución heurística propuesta para resolver el TPS*”. Esto se debe a la exactitud lograda en la relajación de Held-Karp, utilizando este límite como la mínima cota para resolver el TPS mediante el método Branch and Bound.

**Algoritmos Aproximados.** Según Williamson & Shmoys, (2011), en la práctica los problemas de mayor interés dentro del campo de la optimización son aquellos problemas de tipo N-P y NP-completos, dado a que muchas veces los escenarios requieren de un número considerable de parámetros en los cuales su solución se presenta ineficiencias debido a su excesivo tiempo computacional de ejecución, por lo cual si el problema del caso pertenece a alguno de los tipos ya mencionados es poco probable que exista un algoritmo que logre una solución de forma exacta en un tiempo polinomial. Para Romero Riaño et al., (2018), un algoritmo de aproximación o aproximado utilizado para dar solución a un problema de optimización es definido como un algoritmo que posibilita la solución del problema, pero como bien ya es mencionado no da garantía de que sea una solución óptima.

De acuerdo con, Garroppo et al., (2010), se puede saber cuánto se aproxima nuestra solución de la siguiente manera: Si  $S^*$  es la solución óptima con coste  $c(S^*)$ , un algoritmo  $\delta$ -*aproximado*, es un algoritmo que devuelve una solución  $S$  tal que:

$$c(S) \leq \delta c(S^*) \quad (1)$$

$$c(S^*) \leq \delta c(S) \quad (2)$$

(1) sea para un problema de reducción y (2) sea para un problema de maximización.

De esta misma manera, Cormen et al., (2022), citada por Crehuet Lucas, (2022), asegura que un algoritmo se considera tener una relación de aproximación  $p(n)$  si, para cualquier entrada de tamaño  $n$ , el costo  $C$  de la solución que produce está dentro de un factor  $p(n)$  del costo  $C^*$  de una solución óptima., es decir,  $Max(\frac{C}{C^*}, \frac{C^*}{C}) \leq p(n)$ , su relación de aproximación jamás es menor a 1.

**Heurísticas.** Gracias a la gran complejidad polinómica de los problemas de gran interés no se puede afirmar con certeza que exista un algoritmo capaz de hallar una solución exacta, Según Zanakis & Evans, (1981), citado por Duarte Muñoz et al., (2007) se entiende por heurística que:

*“Son procedimientos sencillos, a menudo fundamentados en el sentido común, que se espera proporcionen una buena solución (aunque no necesariamente óptima) a problemas complejos de manera rápida y simple”* pese a su gran utilidad este tipo de método heurísticos poseen la limitación de verse inmersos en los conocidos óptimos locales pese a que no emplean un mecanismo de búsqueda extendida.

Uno de los algoritmos heurísticos más conocido y fácil de implementarlo en la solución del TPS corresponde al algoritmo del vecino más cercano (K- Nearest neighbors), el cual se definió por primera vez por Karl Menger en 1931 y formulado de manera actual por Rosenkrantz, Stearns y Lewis 1977, (Muñoz Rodríguez & Montañez Márquez, 2023). De esta misma forma (Sánchez & Gutiérrez, 2022), menciona en su discusión autores como Zuñiga & Mendoza, (2018), quienes afirman que dentro del campo de los problemas VRP el algoritmo del vecino más cercano K-NN se encuentra dentro de las heurísticas más fáciles de aplicar y de solución factible con poco tiempo de ejecución.

**Heurística del Vecino Más Cercano.** Ramírez Rodríguez, (2016), establece que el algoritmo técnicamente traza las rutas secuencialmente, conectando puntos al considerar la menor arista o distancia euclidiana desde un nodo al siguiente más cercano para incorporarlos a la ruta, estos nodos pueden o no contemplar ciertas restricciones de capacidad, distancia y tiempo total de la ruta representados en la matriz de distancia.

Alfaro, (2020), representa matemática el algoritmo del vecino más cercano de la siguiente manera:

- Escoger un vértice  $j$  al azar.
- Hacer  $t = j$  y  $W = V \setminus \{j\}$  donde  $t$  es el vértice actual en cada iteración y  $V$  los vértices del conjunto.

Mientras ( $W \neq \emptyset$ ): Tomar nuevo  $j$  de  $W$  tal que  $C_{tj} = \min \{C_{tj} \text{ con } i \text{ en } W\}$ .

En términos generales para desarrollar el algoritmo del vecino más cercano primeramente se debe hacer la elección de un vértice inicial arbitrario  $v_1$ , seguidamente se busca el vértice más cercano a  $v_1$  y la incorporación de éste en el recorrido, pasando este nuevo vértice a estar señalado como vértice visitado. Si el ciclo parcial actual incluye los vértices  $v_1, v_2, \dots, v_k$ , se localiza el vértice más cercano a  $v_k$ , que se convierte en  $v_{k+1}$ , añadiendo a continuación al ciclo. Si todos los vértices del conjunto han sido visitados, se concluye el algoritmo volviendo al vértice inicial  $v_1$ ; de lo contrario, se procede de nuevo al paso 3

**Metaheurísticas.** “El término fue introducido por Fred Glover en 1986 (Martí, 2001, p.5)” (Duarte Muñoz et al., 2007). Según Osman & Kelly, (1997) citado por Duarte Muñoz et al., (2007) la metaheurística es definida como:

*“Las metaheurísticas son métodos aproximados diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria particularmente complejos, donde las heurísticas tradicionales no*

*son eficaces. Estas proporcionan un marco general para desarrollar nuevos algoritmos híbridos que combinan diversos conceptos provenientes de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.”*

Muñoz Rodríguez & Montañez Márquez, (2023), indican que, entre los algoritmos más recurrentes para resolver problemas de optimización combinatoria donde las heurísticas clásicas no son tan efectivas, se encuentran la Búsqueda Tabú (Tabu Search) y el algoritmo Scatter Search (Búsqueda Dispersa), ambos introducidos por Fred Glover en 1986 en el mismo artículo en el que acuñó el término metaheurística.

Según Mendoza Casanova, (2017), los fundamentos y principios de la búsqueda tabú se encuentran integrados en el libro “Tabu Search” publicado en 1997, siendo este un algoritmo muy exitoso en la aplicación y solución de problemas de optimización difíciles basados en los principios de la inteligencia artificial como el concepto de la memoria como base de aprendizaje, donde cuyo principal fin es realizar una búsqueda extendida, la cual no se estanque en un óptimo local que no sea global, empleando diferentes restricciones tabú para no repetir soluciones previamente generadas y bajo ciertos criterios de aspiración, que libera la búsqueda por medio de la función de memoria a corto plazo. Glover & Kochenberger, (2006), por otro lado, resaltan que el algoritmo Scatter Search está basado en la combinación de un grupo de soluciones que se hallan almacenadas en un conjunto de referencia, denominado RefSet cuyo principal objetivo de las combinaciones es desarrollar centroides, centros geométricos, a fin de obtener nuevas soluciones de mayor calidad.

Otro algoritmo muy conocido corresponde al algoritmo de la colonia de hormigas, Ant Colony Optimization (ACO por sus siglas en inglés) que, según Robles Algarín, (2010), fue propuesto por Dorigo en los inicios de 1990 como herramienta para la solución de problemas de

optimización complejos en teoría de soluciones de mayor tiempo de cómputo. Este método se fundamenta en el comportamiento natural de las hormigas al realizar búsquedas aleatorias de alimento, así como en el rastro de feromonas que utilizan como guía para que otras hormigas encuentren el camino más corto entre el nido y la fuente de alimento, de igual manera, basa el algoritmo con una colonia de hormigas artificiales las cuales son sujetos computacionales que siguen igualmente un camino de feromonas artificiales para comunicarse cada una (Colomi et al., 1991).

La configuración de ACO se sustenta en 4 etapas fundamentales (Mendoza Casanova, 2017). 1) El ajuste inicial de los parámetros: especificando el número de iteraciones y de individuos, el factor de influencia de la información determinística y de la cantidad de feromona acumulada, y el porcentaje de feromona en la evaporación. 2) La generación de soluciones mediante cada individuo, que construye de manera iterativa una solución partiendo desde un punto inicial. 3) La integración de feromonas: ajustando los rastros de feromonas que se transmitirán a otros individuos para mejorar sus búsquedas. 4) La reducción de feromonas: al concluir cada iteración y después de que todos los individuos hayan generado soluciones, se eliminan los caminos encontrados en etapas previas durante la ejecución del algoritmo, para evitar quedarse en un óptimo local.

### **Metodología**

El presente proyecto aplicado propone un enfoque de investigación de carácter cuantitativo. Se basa en técnicas y métodos objetivos para la recolección de datos de manera que se puedan medir y por ende cuantificar de forma estadística y numérica siguiendo un patrón secuencial, el proceso se divide en fases y actividades que se van planteando en un orden

establecido que delimita el proceso, para el caso particular se permite la formulación y ejecución de programación de modelos matemáticos.

La investigación es de tipo descriptivo, dado que, se recopilan y analizan datos para establecer las principales características y propiedades del sistema (Hernández Sampieri et al., 2014), de recolección de residuos sólidos en el municipio de Betulia y por consiguiente la caracterización del modelo de ruteo de arco que mejor se adapte a los objetivos propuestos.

El problema de recolección de basuras se puede abordar mediante técnicas de investigación de operaciones (IO), como se evidencia en (Patiño Chirva & Daza Cruz, 2015). En este proyecto se propone la ejecución de 4 fases que coinciden con las etapas de un estudio de investigación de operaciones, de acuerdo con lo propuesto por Hillier & Lieberman, (2010), y Taha H., (2012), las etapas son:

- Definición del problema y recolección de datos relevantes.
- Construcción del modelo.
- Solución del modelo.
- Validación del modelo.
- Implementación.

El alcance de este tipo proyecto aplicado se llevará a cabo siguiendo las etapas anteriormente mencionadas, hasta el procedimiento de validación del modelo, puesto que el inciso de implementación yace fuera del desarrollo de los objetivos específicos.

### ***Fase 1: Descripción del Sistema***

Inicialmente se busca recopilar, analizar la información del sistema actual de recolección de residuos sólidos para determinar los parámetros relevantes y elaborar el diagnóstico del plan presente con base en la información obtenida directamente de visitas a la empresa prestadora del

servicio de recolección de residuos sólidos “SERVIASEO S.A” en el municipio de San Juan de Betulia.

- Obtener Información significativa acerca del procedimiento de recolección de residuos.
- Establecer criterios y políticas de recolección de basuras, de acuerdo con la información recolectada.
- Desarrollar una base de datos con la información de parámetros relevantes del modelo.

### ***Fase 2: Formulación del Modelo de Optimización de Rutas***

Se debe determinar las variables de decisión y emplear herramientas de investigación de operaciones para el modelamiento y formulación del modelo matemático de optimización de rutas. Se inicia la búsqueda de métodos de solución para problemas de ruteo en bases de datos, tesis y libros y se procede a la selección del modelo o modelos de solución acorde a la función objetiva y restricciones en base a los parámetros ya establecidos en el sistema actual.

- Definición de variables de decisión, función objetivo y restricciones del problema.
- Construcción de ecuaciones matemáticas que representen el problema.

### ***Fase 3: Solución del Modelo Establecido***

Se caracteriza la información obtenida en la descripción del sistema y se emplea e ingresa a un Software de optimización que nos servirá como herramienta para determinar las rutas óptimas y graficar el recorrido de recolección de residuos sólidos en el municipio.

- Selección del método y software para solucionar el modelo matemático.
- Generación de rutas óptimas y visualización de recorridos.

### ***Fase 4: Verificación de los Resultados del Modelo Propuesto***

Se establecen indicadores de desempeño del sistema y se realiza el análisis comparativo de los mapas de las rutas de recolección de residuos sólidos encarando los resultados del sistema

con el del modelo de optimización se plantean escenarios de mejora acordes a los resultados del modelo.

- Definición de indicadores y/o métricas para comparación de resultados.
- Desarrollar pruebas con la base de datos elaborada en la fase 1.
- Análisis comparativo entre resultados obtenidos con el modelo y rutas actuales.

En conjunto, estas cuatro fases representan un enfoque integral para abordar los desafíos en la gestión de residuos sólidos en San Juan de Betulia. A través de este proyecto, buscamos no solo optimizar las rutas de recolección de residuos, sino también mejorar la calidad de vida de la comunidad, reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental. Nuestro compromiso radica en promover un municipio más sostenible y eficiente, alineado con los objetivos de desarrollo sostenible y con un enfoque en la mejora continua. Este proyecto representa un paso significativo hacia un futuro más limpio y sostenible para San Juan de Betulia.

### **Características e Identificación del Entorno - Descripción del Sistema**

Reconocer la percepción del campo espacial a estudiar, de forma locativa y poblacional con respecto al peso significativo que constituye la prestación de servicios de recolección de residuos sólidos urbanos, define consecuentemente a este capítulo.

Capítulo en el cual radica la recolección y exploración de datos pertinentes sobre la debida recogida de basuras en San Juan de Betulia (Sucre, Colombia), tales como: ubicación y rutas, influencia de normas políticas, interrogantes de consideración y procesamiento de información.

### **Procedimiento de Recolección de Residuos**

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, (2022), el procedimiento de una gestión integral de residuos sólidos inicia con el reconocimiento de las fuentes de generación de los mismos. En este contexto, se puede reconocer a la población civil del municipio como origen primario de tal producción de RSU, por lo que, seguidamente se presentan en el hogar etapas como el almacenaje interno medioambientalmente seguro y entrega a la administración externa autorizado.

### ***Entidad Encargada del Servicio de Recolección de RSU***

El programa para la prestación del servicio público de aseo (PPSPA) en la municipalidad de San Juan de Betulia, es puesto a la disposición de los usuarios, de acuerdo con las directrices delimitadas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en la Resolución 288 del 27 de abril de 2015 (ServiAseo S.A. E.S.P., 2022b). El PPSPA incluye los detalles relacionados con los elementos operacionales y comerciales relevantes para el beneficiario, los cuales se vinculan estrechamente con el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del municipio y las exigencias de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico,

específicamente a los estándares de servicio que deben cumplirse durante el periodo tarifario establecido (Resolución 720, 2015).

La entidad encargada de la prestación de servicio público de limpieza en la población de San Juan de Betulia presenta actividades en el área urbana desde septiembre del 2022, tales como: recogida y traslado, barredura y aseo, disposición final y comercialización.

En el marco de las actividades desarrolladas por la entidad encargada del servicio público de limpieza en la municipalidad de San Juan de Betulia, la fase de "recolección y transporte" desempeña el enfoque principal de esta investigación, abarcando la recopilación de residuos sólidos en toda la jurisdicción, incluyendo tanto áreas urbanas como algunas zonas rurales. Por lo que, se pretende ocupar los desafíos en la eficiencia de la gestión de las rutas de recogida, buscando minimizar la distancia del trayecto de los vehículos encargados del acopio. La optimización de estas rutas no solo contribuirá a una posible disminución en la cuantía operativa asociada al combustible y mantenimiento de los vehículos, sino que también disminuirá las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero, fomentando así prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente. Este enfoque no solo beneficia a la entidad en términos económicos, sino que también tiene un impacto positivo en la condición de subsistencia de los habitantes al disminuir el tiempo de exposición de los residuos en las calles y mejorar la eficiencia general del servicio de recogida de residuos sólidos.

### ***Presentación de Residuos***

Los individuos están obligados a entregar los desechos producidos únicamente a la entidad designada, siguiendo los horarios y las frecuencias previamente establecidos, para su recolección y traslado al lugar de disposición final.

La exposición de los residuos debe ajustarse a lo dispuesto en los artículos 2.3.2.2.2.17 y 2.3.2.2.2.18 del Decreto 1077, (2015), así como a los detalles indicados en la tabla que sigue.

**Tabla 1**  
*Presentación de Residuos*

Métodos de exposición de residuos: andén, cajón de acopio, recipiente de almacenamiento, depósito, entre otros.	Especificar las condiciones que deben cumplir los usuarios al presentar los residuos (por ejemplo, con o sin segregación en el origen).
Colocar los residuos en el andén en recipientes, ya sean retornables o no, que satisfagan las siguientes especificaciones: Deben asegurar la seguridad y la higiene, además de facilitar el proceso de recogida por parte del personal operativo. Deben tener una capacidad adecuada en relación con el peso, dimensión y singularidades de los residuos. Deben estar fabricados con materiales resistentes.	Hasta que se implemente la recogida focalizada, los usuarios pueden presentar los residuos conjuntados. No obstante, los recipientes no deben contener desechos particulares como pilas, baterías, luminarias, residuos de aparatos electrónicos y eléctricos, ni envases de plaguicidas.

*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)*

### **Ubicación**

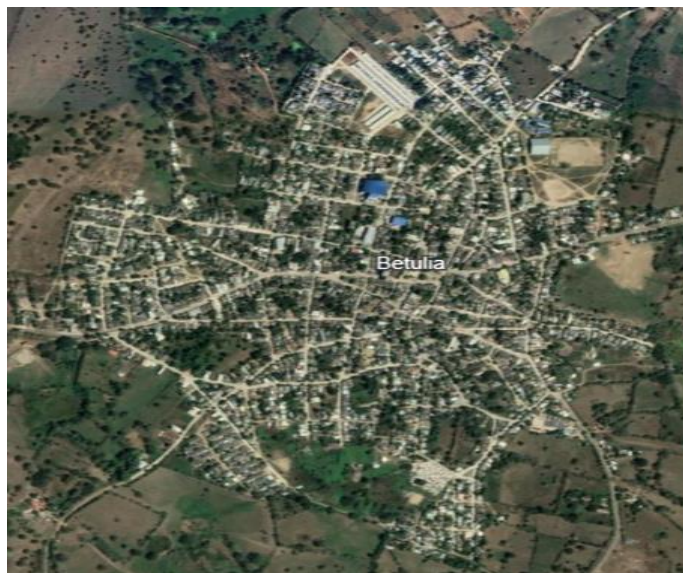
La población de San Juan de Betulia se sitúa en el noreste del Departamento de Sucre, específicamente en la Subregión Sabanas, con coordenadas geográficas de 9°16' de latitud norte y 75° 15' de longitud oeste. Se encuentra a una altitud de 65 metros sobre el nivel del mar,

experimentando un clima cálido con una temperatura promedio de 29°C. Distante a 21 kilómetros de Sincelejo, la capital del Departamento de Sucre, a través del ramal de la vía principal de occidente que conecta Corozal-San Juan de Betulia-Sincé-Galeras. Limita al norte con los municipios de Los Palmitos y Sincé, al este con Sincé, al oeste con Corozal, y al sur con Corozal y Sincé. Su prolongación jurisprudencial abarca aproximadamente 199 kilómetros cuadrados (Puentes Cervantes, 2012).

San Juan de Betulia figura entre los 26 municipios del departamento de Sucre, Colombia. Según las valoraciones del DANE, (2023), Departamento Administrativo Nacional de Estadística, la población de San Juan de Betulia asciende a 14,306 habitantes, distribuidos en un 48.8% de mujeres (6,983) y un 51.2% de hombres (7,323). Esta cifra representa aproximadamente el 1.4% de la población total del departamento de Sucre en el mismo año.

#### **Ilustración 1**

*Imagen Satelital de San Juan de Betulia*



*Fuente: Google Earth (10-11-23)*

En lo que respecta a la subdivisión territorial, el municipio comprende 5 corregimientos, a saber: Albania, Sabaneta, Villa López, Loma Alta, Hato Viejo. Además, cuenta con 3 caseríos

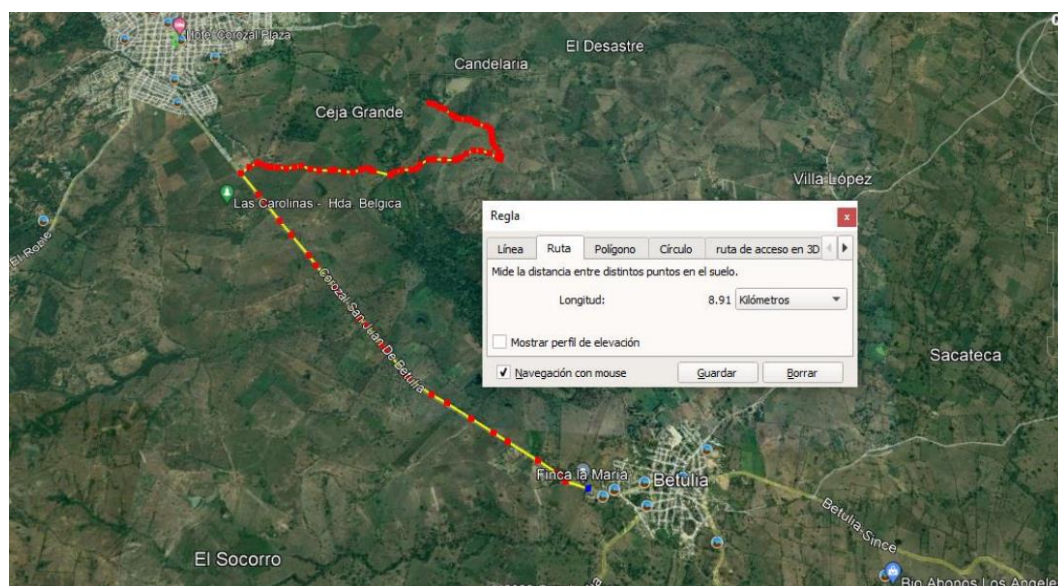
denominados Cañito, Santo Tomás y Las Cruces, así como 9 veredas que incluyen El Rodeo, Loma del Látigo, Charco Niza, Santa Catalina, El Socorro, Garrapatero, El Canime, El Páramo y Los Araujos (Puentes Cervantes, 2012).

### ***Sitio de Disposición Final***

Los desechos sólidos recogidos en el área urbana de la municipalidad de San Juan de Betulia, Sucre, son depositados en el Relleno Sanitario La Candelaria en el municipio de Corozal. En casos excepcionales donde el acceso a dicho relleno sanitario se ve impedido, los residuos son dirigidos hacia el Relleno Sanitario El Oasis, situado en el municipio de Sincelejo, capital del departamento.

### **Ilustración 2**

#### ***Sitio de Disposición Final***



*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)*

### **Crterios y Políticas de Recolección de Basuras**

La aglomeración de población y el incremento de actividades, junto con la generación de productos inconmensurables para degradarse debido a su cantidad y especificaciones, han generado una alteración en la estabilidad entre el ecosistema y el desarrollo humano, asimismo,

las pautas de consumo actuales, el crecimiento demográfico y la alta densidad poblacional, centra la urgencia de replantear los sistemas tradicionales de eliminación de residuos, buscando métodos que ayuden a gestionarlos, como según menciona Pueyo Campos, (1990), por el desagradable impacto al entorno y los riesgos que supone para la salud la contaminación del agua, tierra y viento, “*incidiendo directamente en las poblaciones e indirectamente a través de las cadenas alimentarias (Contaminante-Tierra-Vegetación-Animales-Humano)*”. En este contexto, se vuelve imperativa la adopción de líneas de acción que cooperen al diseño de una política efectiva de gestión de residuos urbanos.

Según Rivas Arias, (2018), por parte del Ministerio de Ambiente, la manipulación global de los residuos sólidos abarca una serie de operaciones destinadas a disminuir la producción de desechos, realizar un uso eficiente teniendo en consideración sus atributos, cantidad, origen, costos, tratamiento con miras a la valuación energética, oportunidades de lucro y mercantilización. Asimismo, abarca el tratamiento y la disposición final de los desechos que no son susceptibles de aprovechamiento.

### ***Políticas de Recolección de Residuos***

**Gubernamentales.** A continuación, se presentan tablas significativas sobre las políticas ejercidas en la gestión integral de residuos sólidos por parte del Gobierno Colombiano. La *Tabla II* a través del Ministerio de Ambiente en la ponencia *Piensa Un Minuto Antes De Actuar*, dada por medio del programa *TI. Gestión Ambiental y Servicios Públicos*, dictada por la consultoría ambiental de Rivas Arias, (2018), y la *Tabla III* por medio del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, (2022), en base al procedimiento de la *Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos*.

**Tabla 2***Marco normativo de la gestión integral de residuos sólidos*

Norma	Descripción
Constitución Política de 1991	La Norma Marco establece los derechos, responsabilidades y la estructura del estado de derecho que rige para los ciudadanos colombianos.
Ley 99 de 1993	Esta norma crea el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA) en Colombia.
Ley 142 de 1994	La Ley de los Servicios Públicos Domiciliarios.
Decreto 596 de 2016	Esta norma tiene como objetivo aumentar las tasas de lucro de los desechos en el país.
Decreto Ley 2811 de 1974	Este documento establece el Código Nacional que regula los bienes naturales renovables y la conservación del entorno ambiental en el país.
Decreto 1077 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector de Vivienda, Ciudad y Territorio.
Resolución CRA 720 de 2015	Se contienen aspectos relacionados con la ejecución eficaz de las diversas diligencias del servicio público de limpieza, además de contemplar aspectos medioambientalmente sostenibles.
Resolución 330 de 2017	Este reglamento adopta las normativas técnicas del área de agua admisible y saneamiento fundamental.

Resolución 472 de 2017	Esta normativa regula la Gestión Integral de los Residuos Generados en las acciones de Construcción y Demolición (RCD).
CONPES 3874 de 2016	Se refiere a la política nacional que aborda la gestión integral de los residuos sólidos.

*Fuente: Rivas Arias (2018) – MINAMBIENTE*

**Tabla 3**

*Base Legal Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos*

Clasificación Normativa	Consecutivo Número	Año	Epígrafe
Ley	9	1979	Por la cual se instauran medidas salubres.
Decreto	1609	2002	Este reglamento regula el empleo y traslado por carretera de artículos riesgosos por medio de vehículos terrestres automotores.
Resolución	1188	2003	Este documento adopta el tratado que establece reglas y conducciones para la gestión de aceites usados en el Distrito Capital.
Decreto	4741	2005	Este reglamento parcial regula la previsión y el empleo de los residuos o desechos riesgosos generados dentro del marco de la gestión integral de residuos.

---

Resolución	1362	2007	Esta normativa dicta los requerimientos y el método para el registro de los causantes de residuos o desechos peligrosos, conforme a lo establecido en los artículos 27° y 28° del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005.
Ley	1259	2008	Esta normativa establece la implementación a nivel nacional del comparendo ambiental para aquellos que infrinjan el reglamento de aseo, limpieza y recolección de escombros, además de dictar otras disposiciones relacionadas.
Ley	1252	2008	Esta normativa establece prohibiciones en materia medioambiental relacionadas con los residuos y desechos riesgosos, y también incluye otras disposiciones pertinentes.
Resolución	1457	2010	Esta normativa insta los sistemas para la recogida selectiva y la dirección ambiental de llantas usadas, además de adoptar otras disposiciones relacionadas.
Resolución	1511	2010	Esta normativa insta los sistemas para la recogida selectiva y la dirección ambiental

---

---

			de residuos de bombillas, además de adoptar otras distribuciones relacionadas.
Resolución	1512	2010	Este documento menciona los sistemas para la recogida selectiva y la directriz medioambiental de residuos de computadores y/o periféricos, además de adoptar otras disposiciones relacionadas.
Resolución	1297	2010	Este documento aclara los sistemas para la recogida selectiva y la dirección medioambiental de desechos de pilas y/o acumuladores.
Resolución	1115	2012	Esta normativa insta los reglamentos técnico-ambientales para las acciones de lucro y tratamiento de los desechos de construcción y demolición en el Distrito Capital.
Decreto	2609	2010	Este documento reglamenta parcialmente el Título V de la Ley 594 de 2000, así como los artículos 58 y 59 de la Ley 1437 de 2011, y establece otras distribuciones relacionadas con la dirección documental, incluyendo la eliminación de archivos, para todas las entidades del Estado.

---

Ley	1672	2013	Esta normativa establece las normas para la instauración de una política pública de gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), además de dictar otras disposiciones relacionadas.
Decreto	2981	2013	Este documento estipula la prestación del servicio público de limpieza.
Decreto	442	2015	Este decreto crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital, además de adoptar otras disposiciones relacionadas.
Decreto	1079	2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte.
Decreto	596	2016	Este decreto transforma y añade el Decreto 1077 de 2015 en lo referente al bosquejo del dinamismo de aprovechamiento del servicio público de aseo y al gobierno temporario para la legalización de los recicladores de oficio, además de dictar otras disposiciones relacionadas.
Ley	1801	2016	Código Nacional de Seguridad y Convivencia Ciudadana.

Resolución	1326	2017	Esta normativa insta los sistemas para la recogida selectiva y la dirección medioambiental de llantas usadas, además de adoptar otras disposiciones relacionadas.
Decreto	284	2018	Este decreto adiciona el Decreto 1076 de 2015, que es la única normativa del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo que respecta a la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), además de dictar otras disposiciones relacionadas.
Resolución	2184	2019	Esta normativa mejora la Resolución 668 de 2016 referente al uso racional de bolsas plásticas, e incluye otras disposiciones adicionales.
Decreto	1076	2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

*Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2022)*

Por otra parte, el Ministerio del Medio Ambiente, (1998), en el libro titulado *Política para la Gestión Integral de Residuos*, menciona el alcance de la gestión (*Ilustración III*) y la gestión diferencial de residuos aprovechables y basura (*Ilustración IV*), para otorgar trascendencia a estrategias específicas y generales (*Tabla IV*) sobre: 1) Disminuir la cuantía de desechos provocados, 2) incrementar la tasa de aprovechamiento de los desechos en general, 3)

optimizar los procedimientos de supresión, tratamiento y disposición final de los residuos, 4) entender y evaluar el problema de los residuos peligrosos en el país, estableciendo sistemas de gestión que incluyan la segregación en la fuente.

### Ilustración 3

*Alcance de la Gestión de Residuos*



*Fuente: Política para la Gestión Integral de Residuos Ministerio del Medio Ambiente (1998)*

### Ilustración 4

*Gestión Diferencial - Aprovechables y Basuras*



*Fuente: Política para la Gestión Integral de Residuos Ministerio del Medio Ambiente (1998)*

**Tabla 4**  
*Estrategias para la Gestión Integral de Residuos*

Estrategias Específicas	Estrategias Generales
Implementar programas de minimización en el origen, integrados con programas de producción más limpia.	Promover la educación y la participación activa de los ciudadanos.
Transmutar los patrones de uso y generación que no son sostenibles.	Implementar sistemas de información sobre residuos sólidos.
Establecer nuevos canales de comercialización y promover los existentes.	Mejorar la planificación y coordinación entre instituciones.
Reforzar las cadenas de reciclaje, apoyar programas existentes y desarrollar nuevos programas para aprovechar residuos.	Fomentar el desarrollo científico y tecnológico.
Renovar las condiciones de trabajo de los recuperadores de residuos.	Consolidar las finanzas para garantizar la sostenibilidad de las iniciativas.
Desarrollar planteamientos para una disposición final ponderada de los residuos.	
Fortalecer el cuidado y la inspección en el manejo de residuos.	
Realizar registro para identificar la producción y la locación de residuos.	

---

Determinar programas de gestión de desechos peligrosos en los corredores industriales.

---

*Fuente: Política para la Gestión Integral de Residuos Ministerio del Medio Ambiente (1998)*

Así mismo, el documento CONPES, (2016), conceptualiza La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos como una estrategia dirigida hacia la transformación de un modelo lineal a una economía circular, empleando la clasificación en la gestión de desechos, enfocándose en la prevención de su generación y la optimización del uso de recursos, con el propósito de mantener los beneficios en el ciclo económico durante el mayor lapso de tiempo posible, maximizando el aprovechamiento de su materia prima y potencial energético, de manera que, adopta un enfoque integral, basado en el marco crítico de los dos triángulos, que no sólo aborda aspectos vinculados al servicio público de limpieza, sino que se extiende a áreas más amplias como el rendimiento medioambiental, la institucionalidad, la reducción de riesgos para la salud, la incorporación social de recicladores de oficio, la sustentabilidad económica y normativas proactivas, como la regionalización.

A continuación, se presenta en la siguiente tabla los principios con los cuales se rige La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos:

**Tabla 5**  
*Principios que rigen La Política Nacional para la GIRS*

Principios	Descripción
Salvaguarda de la salud humana y del entorno natural.	Los responsables de la gestión de desechos tomarán las acciones correspondientes para asegurar la seguridad de la salud humana y del medioambiente.

---

---

Escalafón de la gestión integral de desechos sólidos.	La gestión de residuos se enfocará en estrategias prioritarias: primero, prevenir la producción de desechos; luego, promover el reciclaje y el aprovechamiento, así como el tratamiento para valoración y mejorar la gestión de los rellenos sanitarios. Finalmente, para los desechos que no puedan ser aprovechados ni valorizados, se emplearán sistemas de tratamiento para reducir su volumen, asegurando una disposición final controlada.
Administración diferenciada.	Los residuos serán manejados y gestionados de manera separada por corrientes o flujos, con el objetivo de facilitar su lucro y tratamiento.
Formación y cultura en la gestión adecuada de desechos.	Deberán implementarse acciones para racionalizar a la comunidad en el debido manejo de residuos, promoviendo que la prevención y el aprovechamiento de los residuos trascienda en parte integral de la cultura de subsistencia.
Evaluación del ciclo de vida del producto.	La gestión integral de los residuos se basará en fundamentos como la investigación del ciclo de vida, que evalúa los diversos impactos ambientales de un producto desde su creación hasta su eliminación final, implementando acciones específicas en cada fase del ciclo.

---

---

Responsabilidad ampliada del productor.	El compromiso del generador por un producto puesto en el comercio se expande a lo largo de todo su ciclo de vida. Esto implica trasladar la responsabilidad (ya sea física o económica, total o parcialmente) hacia el productor, además de generar estímulos para que integren valoraciones medioambientales en el diseño de sus productos (ecodiseño).
El que contamina paga.	Quienes sean responsables de causar o generar contaminación deberán hacerse cargo de los costos asociados a esta contaminación. Por lo tanto, se deben implementar herramientas que desincentivan y sancionan las malas prácticas de gestión de desechos que ocasionen daños al medioambiente o a la salud pública.
Gradualidad.	Las acciones se llevarán a cabo de manera progresiva, con una planificación que abarque el corto, mediano y largo plazo, tomando en cuenta la disposición de recursos y aplicando medidas diferenciadas según las singularidades de los actores o el tamaño de los mercados.
Inclusión.	Todas las jurisdicciones colaborarán dentro de sus competencias para asegurar la plena integración social de los recicladores informales en la gestión integral de

---

---

	residuos, conforme a lo instaurado legalmente para su formalización en el contexto del servicio público de aseo.
Capacidad económica.	La gestión integral de residuos se basará en directrices saludables que aseguren la estabilidad financiera y el adecuado funcionamiento a largo plazo de todos sus componentes operativos.
Regionalización.	Es necesario fortalecer técnicamente y desde el punto de vista tarifario el afianzamiento de la prestación regional del servicio público de limpieza, especialmente para la generación de infraestructura relacionada con estaciones de transferencia, instalaciones de aprovechamiento, instituciones de compostaje industrial, producción de energía a partir de biogás y plantas de gestión y lucro de escombros.
Estrategias diferenciales en la prestación del servicio público de aseo.	Es evidente la necesidad de desarrollar estrategias específicas para el sector que tomen en cuenta las singularidades particulares de tamaño de comercio y geográficas de los municipios y regiones. Esto incluye promover sistemas regionales diferenciados y flexibles que apoyen a los municipios en su responsabilidad como garantes de la prestación de servicios públicos.

---

**Empresariales.** De acuerdo con el *Contrato de Condiciones Uniformes San Juan de Betulia - Sucre*, entre la empresa proveedora del servicio de recolección de basura y la gestión municipal, se establece en su **cláusula 15** las siguientes obligaciones de la **persona prestadora** (ServiAseo S.A. E.S.P., agosto 2022).

- Informar a la municipalidad o distrito sobre el área geográfica del municipio claramente definida donde se ofrece y ejecuta el servicio público de recolección de residuos.
- Proporcionar de manera continua un servicio de alta calidad, cumpliendo con los estándares normativos obligatorios establecidos por las autoridades competentes, las especificaciones técnicas y los estándares de servicio establecidos en el programa y contrato de servicios públicos.
- Educar a los suscriptores y usuarios sobre el uso eficiente y seguro de los servicios, mediante campañas masivas de divulgación.
- Responsabilizarse de las actividades de barrido y limpieza de calles y espacios públicos, y por las labores de limpieza urbana correspondientes al área del servicio indicada en el contrato, según lo expuesto por la Resolución CRA 853 de 2018 y las normativas sanitarias, ambientales y regulatorias vigentes.
- Garantizar el adecuado proceso y el derecho de defensa de los suscriptores y usuarios en todas las actuaciones administrativas, conforme a las disposiciones constitucionales, el Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo, y otras normativas aplicables.
- Aplicar la estratificación socioeconómica adoptada por el municipio a los suscriptores y usuarios del servicio.

- Asignar la categoría de uso adecuada a los inmuebles que reciben servicios y modificarla según corresponda.
- Salvaguardar la confidencialidad de la información personal de los suscriptores y usuarios, asegurando su derecho a la protección de datos personales.
- Realizar mediciones regulares de la generación de residuos conforme a las normativas de medición actuales.
- Implementar acciones de reducción y corrección apropiadas en caso de eventos de riesgo.
- Aplicar tarifas ajustadas para inmuebles sin alojamiento, tal cual lo establecido por la Resolución CRA 853 de 2018 y las normativas correspondientes.
- Recepcionar y gestionar las solicitudes, PQR y recursos relacionados con el aprovechamiento de residuos. Asimismo, tramitar integralmente aquellas asociadas con la facturación.
- Remitir a la entidad encargada del aprovechamiento las solicitudes, quejas, reclamos y recursos relacionados con las proporciones de residuos aprovechables efectuadas, mediciones y aspectos operativos como horarios y frecuencias de recolección, si procede.
- Contar con un análisis de costos respaldando las tarifas implantadas a los suscriptores y usuarios, legalmente autorizado por la autoridad tarifaria local y publicado conforme a las normativas vigentes.

*Parágrafo 1.* Si el proveedor del servicio opera en áreas de difícil acceso, deberá informar a los suscriptores y usuarios sobre las condiciones específicas y el cronograma gradual en el cual se realizarán las actividades del servicio, además de educar sobre el uso eficiente y seguro de los servicios mediante campañas de divulgación masiva.

*Parágrafo 2.* En el escenario de que el proveedor del servicio opere en áreas de difícil acceso, será responsable de llevar a cabo las actividades de barrido y limpieza de vías y espacios públicos conforme al cronograma gradual establecido en el programa de prestación del servicio. Esto debe realizarse en estricto cumplimiento de las normativas sanitarias, ambientales y regulatorias aplicables.

Por otro lado, En el contrato vigente (ServiAseo S.A. E.S.P., agosto 2022), la **cláusula 16** especifica las condiciones para la prestación del servicio público de gestión de residuos sólidos y sus actividades complementarias para residuos no reciclables, titulada "Condiciones de Prestación del Servicio". Según esta cláusula, para llevar a cabo el servicio público de aseo y sus labores complementarias, las partes involucradas deben cumplir con las disposiciones presentes en los Capítulos 1 y 2 del Título 2, y el Capítulo 2 del Título 7 de la Parte 3 del Decreto 1077 de 2015. Estas normativas han sido modificadas y complementadas por el Decreto 1784 de 2017 y el Decreto 1272 de 2017, abarcando los siguientes aspectos:

- Recipientes utilizados para almacenar y presentar residuos que no son susceptibles de ser aprovechados.
- Recolección de residuos comunes generados en mercados, mataderos, cementerios y puntos de venta en áreas públicas.
- Tiempo durante el cual los residuos barridos permanecen en las calles.
- Comunicación acerca de modificaciones en las rutas, horarios o frecuencias de las actividades de servicio.
- Actividades efectivamente llevadas a cabo por el proveedor del servicio, de acuerdo al segmento o esquema que le corresponda, según lo dispuesto en la Resolución CRA 853 de 2018.

- Instalación y mantenimiento de cestas.
  - Limpieza de playas o costas ribereñas.
  - Limpieza de áreas públicas.
  - Mantenimiento de áreas verdes públicas, incluyendo el corte de césped.
  - Poda de árboles en espacios públicos.
- Periodicidad y cronograma establecidos para realizar las diversas actividades del servicio público de recolección de residuos.
  - Normativa operativa, supervisión, vigilancia y monitoreo para la ejecución de las labores de tratamiento y disposición final de residuos.

Si la entidad encargada ofrece el servicio en áreas de complejo acceso, debe especificar para todas las actividades que realiza en el Área de Prestación del Servicio (APS) correspondiente lo siguiente: i) las condiciones especiales bajo las cuales se realizará la prestación del servicio, ii) los objetivos para su integración gradual mediante las condiciones específicas del municipio de incidencia, y iii) la Periodicidad y cronograma de atención. Esta información debe relacionarse con lo estipulado en el Plan de Gestión y el Programa de Prestación del Servicio Público de Aseo.

### ***Interrogantes de Consideración***

En San Juan de Betulia, Sucre, a pesar de que la recolección y transporte de residuos sólidos representan una de las labores primordiales del servicio público, no se ha alcanzado la implementación de un sistema completamente eficaz para dicha labor, debiéndose principalmente a la falta de una organización que se base en un análisis previo y una planificación detallada sobre el diseño de rutas para la recolecta de residuos sólidos urbanos en el municipio.

Los desafíos presentes en la gestión operativa de este servicio se ven sustentados por la falta de conocimiento técnico y especializado en los métodos de planificación de rutas para la debida recogida de basuras, de manera que careciendo de un estudio sistemático que garantice la eficiencia de las rutas establecidas, siendo estas instauradas manera manual y empírica, que según Escudero Andino, (2021), *“tradicionalmente creadas en base al juicio y experiencia del jefe del departamento de limpieza o de los chóferes de los vehículos recolectores”*.

Este enfoque empírico, soportado en la experiencia, aunque ciertamente valioso, plantea algunas interrogantes sin respuestas adecuadas, tales como:

- ¿Son las rutas actuales de recolección rentables para la operación con relación a las variables de distancia-tiempo?
- ¿La comunidad betuliana yace conforme con la prestación actual del servicio respecto a la eficiencia puntual y de saneamiento?
- ¿Se maneja un control espacial de las rutas de recolección acorde a la prominencia de los vehículos transportadores?
- ¿El personal operativo da abasto en la ejecución de las rutas por medio de tiempos de trabajo a horas de operación?

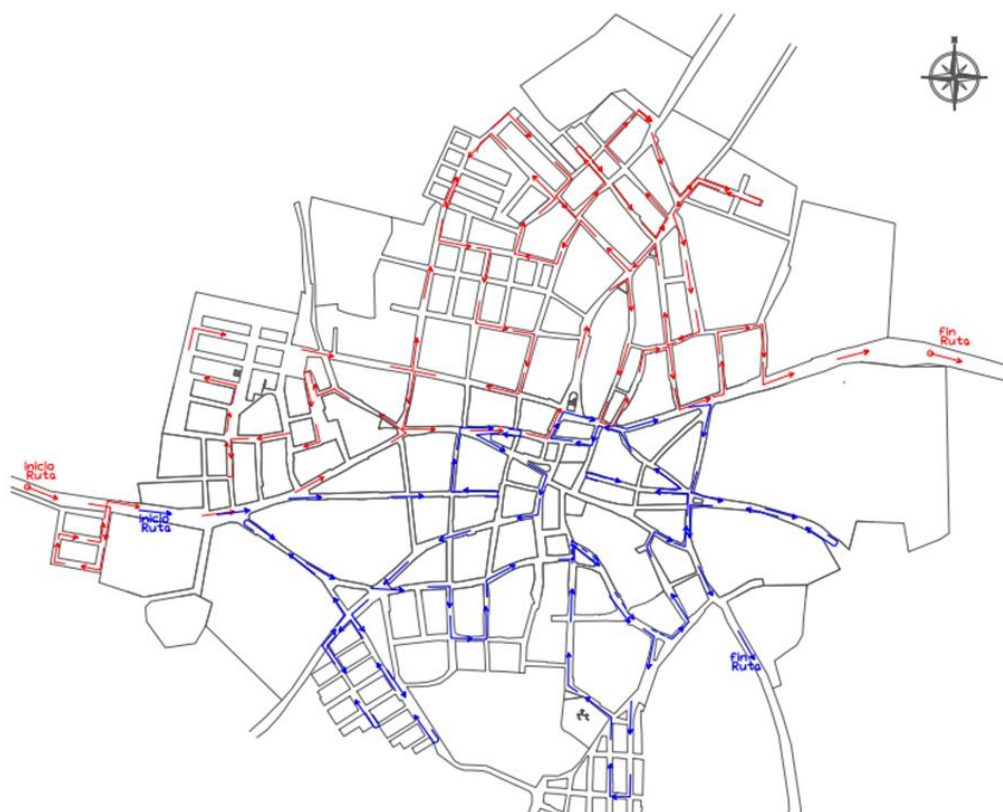
Estos Cuestionamientos, Entre Otros, Incentivan La Investigación, Y A Pesar De Que No Se Pretende Responder A Todos Ellos, Se Sugiere Estudiar La Situación Hasta Llegar A La Capacidad De Formular Y Resolver, Un Modelo Matemático Que Represente Las Rutas De Recolección De Residuos Sólidos Urbanos En El Municipio De San Juan De Betulia, Que Garantice La Disminución En La Distancia Recorrida En La Prestación Del Servicio De Recolección Y Transporte.

## Parámetros Relevantes del Modelo

La comunidad de San Juan de Betulia es recorrida por un único camión recolector de residuos sólidos urbanos, encargado de la debida recogida de las también llamadas basuras durante seis de los siete días de la semana, específicamente sobre dos rutas de recolección diseñadas empíricamente en su momento, que abarcan cada una, tres de los seis días laborados.

### Ilustración 5

*Rutas de recolección de residuos ordinarios en San Juan de Betulia*

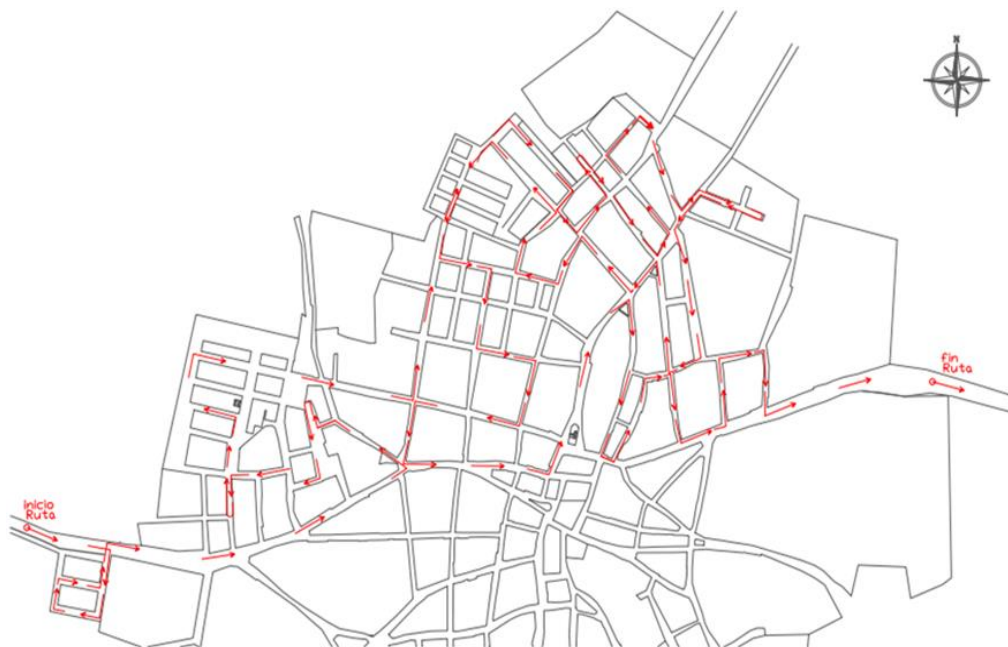


*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)*

La primera ruta cubre una distancia estimada de 8.2 kilómetros de vías pavimentadas y un 10% (0.82km) de estas anteriores en el denominado estado de vías destapadas, para un total de 9.02 kilómetros de distancia recorrida durante los días: lunes, miércoles y viernes de la semana (*Ilustración IV*).

**Ilustración 6**

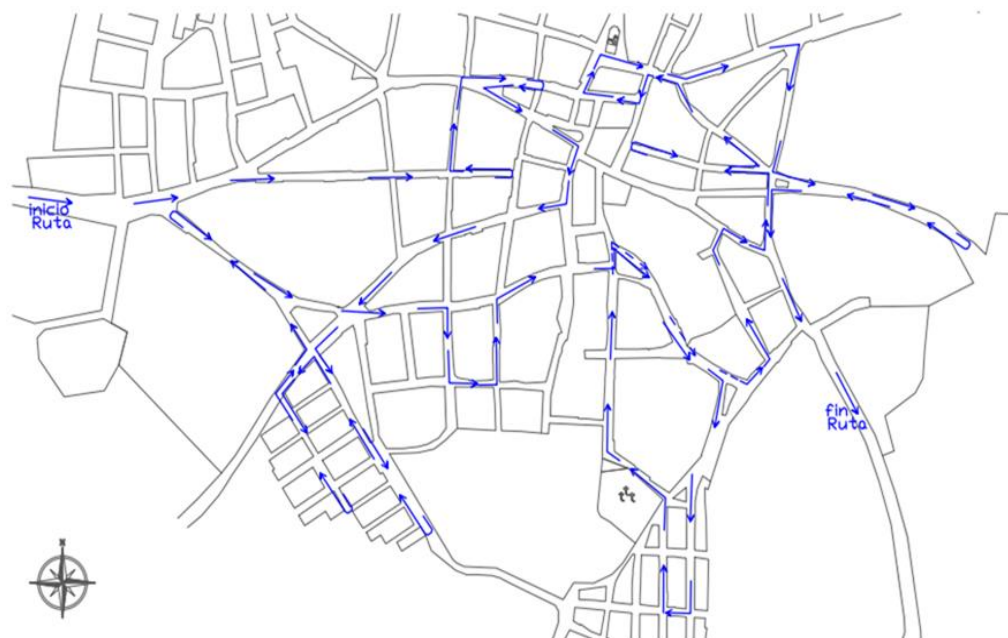
Ruta de recolección de residuos ordinarios MR1 #181195



Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)

**Ilustración 7**

Ruta de recolección de residuos ordinarios MR2 #181196

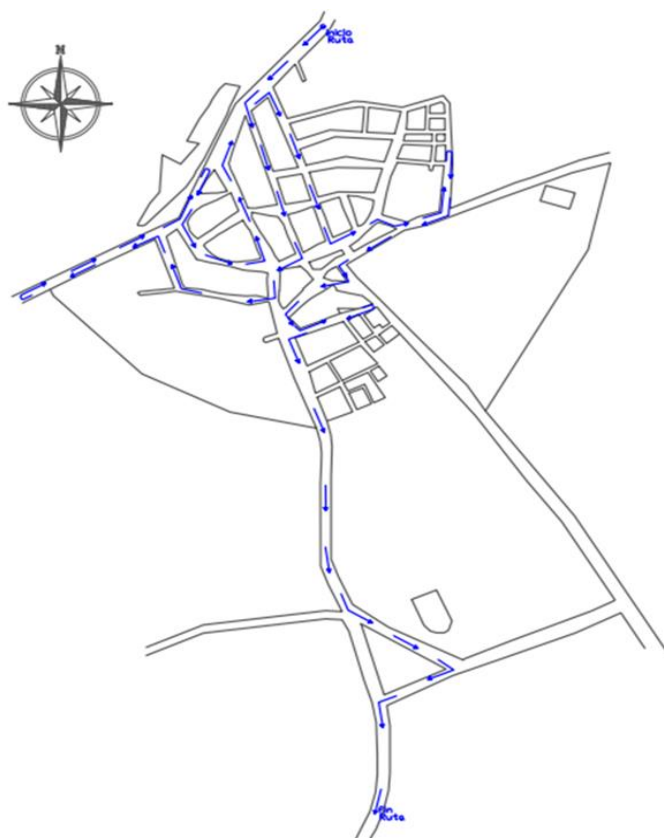


Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)

Por otro lado, su segunda ruta de recolección de desechos dispone de los días: martes, jueves y sábados; para recorrer una distancia de 12.12 kilómetros totales, segregados entre el municipio y un corregimiento aledaño llamado Albania. Donde San Juan de Betulia ocupa vías pavimentadas por 7.3 kilómetros y vías no pavimentadas (destapadas) por 0.36 kilómetros, de manera que totaliza 7.66 kilómetros (*Ilustración V*), dejando al corregimiento de Albania con un total de 4.46 kilómetros, divididos en 2.7 kilómetros de vías pavimentadas y 1.76 kilómetros de vías destapadas (*Ilustración VI*).

### **Ilustración 8**

*Ruta de recolección de residuos ordinarios MR3 #181197*



*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022). Corregimiento de Albania*

Cabe mencionar que, este procedimiento actual de recolección en el municipio implica la recolección de residuos domiciliarios directamente en las aceras, es decir, una recolección a pie ejecutada por el personal encargado (Escudero Andino, 2021).

A continuación, se presenta una detallada tabla que refleja las rutas establecidas, proporcionando una visión clara de la planificación y distribución actuales de las mismas.

**Tabla 6**  
*Rutas vigentes establecidas*

Rutas	Días por semana	Km pavimentados	Km destapados	Km recorridos	
MR1 #181195	Lunes Miércoles Viernes	8.2	0.82	9.02	
MR2 #181196	Martes	7.3	0.36	7.66	12.12
MR3 #181197	Jueves Sábados	2.7	1.76	4.46	

*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)*

**Tabla 7**  
*Recolección y Transporte de residuos no aprovechables*

Macrorruta	La frecuencia con la que se recogen los desechos no aprovechables	El período designado para la recolección de desechos no aprovechables
MR1	Tres veces por semana (lunes-miércoles-viernes)	De 6:00 am - 12:30 pm
Vista Hermosa, La Paz, San Vicente, Bocacanoa, Bogotá, Malambito, Sabanas, Barrio Azul, Medellín, Centro, Calle		

---

Nueva, Urbanización

Santa Teresa

---

Mr2 – Mr3

Tres veces por semana

De 6:00 am - 4:00 pm

---

Pozo Nuevo, Bolívar, San

(martes-jueves-sábado)

José, Albania, 10 de

marzo, Nueva España,

Malambito, Albania

---

*Fuente: PPSPA de ServiAseo S.A. E.S.P. (2022)*

### ***Procesamiento de la Información***

El desafío de hallar el rumbo más reducido y a la vez el más eficaz para arribar a un sitio, a sabiendas que pueden subsistir diversas formas de llegar al mismo lugar, construye una conexión con el denominado caso Problema del Agente Viajero o TSP (Travelling Salesman Problem) por sus siglas en inglés, donde escoger la más efectiva está directamente vinculada con disminuir los costos (distancias) de traslado. De manera que, con este método contextualizado a la Investigación de Operaciones junto con la aplicación de Programación Lineal Entera Binaria como instrumento de optimización, para este caso, de rutas de recolección con un punto de origen y múltiples nodos acopio de residuos sólidos, busca minimizar las distancias recorridas por medio de una malla que haga la mínima función de costos a través de la asignación distancias a cada uno de los parámetros de operación (nodos).

Por lo que, se instauraron las siguientes etapas de procesamiento de información:

Descargar e instalar la versión estable, en su momento, de QGIS, que para este caso en específico fue QGIS 3.28 LTR, aplicación profesional de Sistema de Información Geográfica (SIG) que está constituida sobre, y satisfecha de ser, Software Libre y de Código Abierto (FOSS), licenciado bajo GNU - General Public License, siendo proyecto oficial de Open Source

Geospatial Foundation (OSGeo). *“Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos”*.

Abrir software QGIS, establecer el inicio del proceso con un nuevo proyecto (Control + N), definir ubicación del archivo al guardar proyecto (Control + S), proseguir con la instalación de los plugin necesarios a través de la Barra de herramientas Menú en la pestaña complementos mediante la sección administrar e instalar complementos, esperar la carga del repositorio de complementos de QGIS hasta continuar al menú de búsqueda.

Instalar los complementos de mapa base OpenStreetMap (OSM) que, en pocas palabras, es un mapa en línea gratuito y de código abierto del mundo que puedes editar, por medio del nickname OSMDownloader, pudiéndolo compaginar con QuickMapServices, creado por NextGIS y considerado como un plugin imprescindible para QGIS, ya que permite añadir mapas base de Bing, ESRI, Geofabrik, Google, CARTO, Stamen, OpenStreetMap, Landsat, etc. (MappingGIS, 2020).

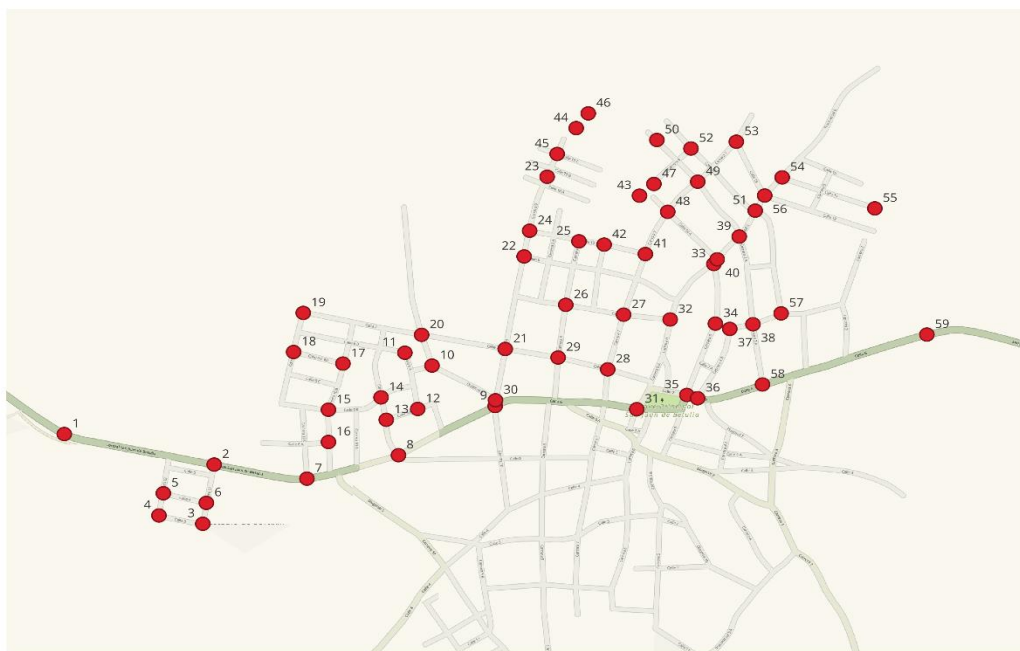
Dirigirse a la pestaña Web, en la ya mencionada Barra de herramientas Menú, en la sección QuickMapServices, subsección Settings, ventana More Services y clicar en el botón Get contributed pack para la obtención del paquete completo de datos de mapas base y guardar. Después de esto, dirigirse nuevamente a la pestaña Web y sección QuickMapServices, seleccionar la subsección OSM para escoger la opción OSM Standard como mapa base.

Orientarse en la esquina inferior derecha de la pantalla, clicar sobre EPSG y guiándonos al Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC), estableciendo en el filtro el formato WGS 84 / UTM, donde definiremos el paralelo (zona) del planeta sobre el cual georreferenciación, que para este caso en específico fue WGS 84 / UTM zone 18N con el ID de la autoridad EPSG:32618, aplicar y aceptar.

Ubicar el sector, San Juan de Betulia (Sucre - Colombia) y sentar los nodos de las rutas. Dirigirse al Navegador de QGIS, seleccionar una ubicación (Carpeta previamente definida), clic derecho, nueva, archivo shape. En el campo nombre de archivo, después del último slash, reemplazar “new\_layer” por el nombre de preferencia. En el campo codificación de archivo seleccionar la opción UTF-8. En el campo Tipo de geometría seleccionar la opción Punto. Seleccionar en el campo siguiente las SRC anteriormente establecidas, aceptar y anexar al panel de capas. Puede personalizar el estilo de los nodos (puntos) efectuando clic derecho sobre la capa, sección propiedades y simbología, editar o escoger cual prefiera, aplicar y aceptar.

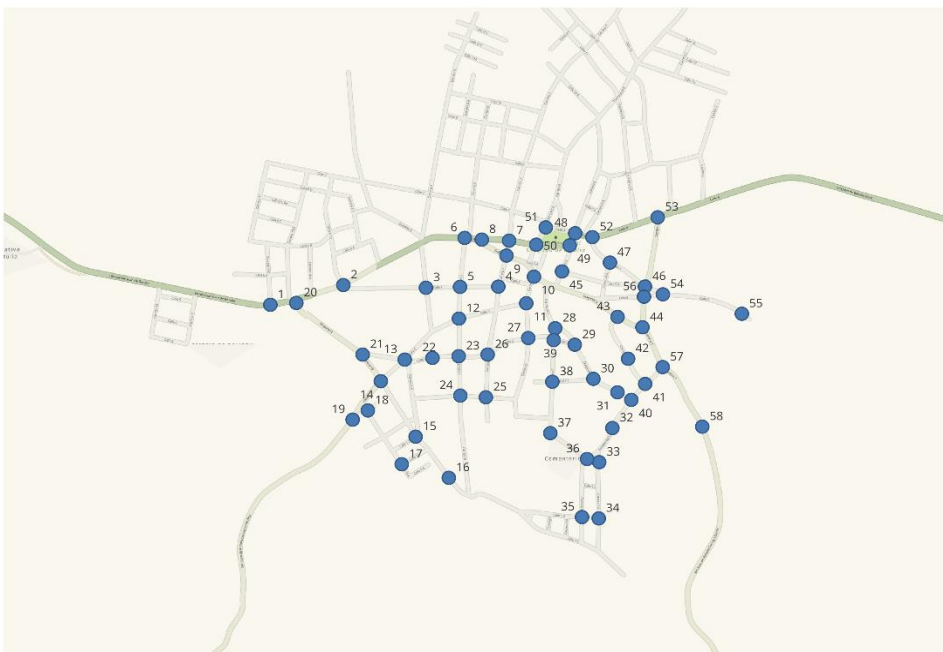
De igual manera, dando clic derecho podrá acceder a la acción de conmutar edición para posteriormente dirigirse a la opción añadir punto (Control + .) en la Barra de herramientas Menú, de manera que podrá empezar a instaurar los puntos (nodos) sobre el mapa base.

**Ilustración 9**  
*Nodos Ruta MR1*



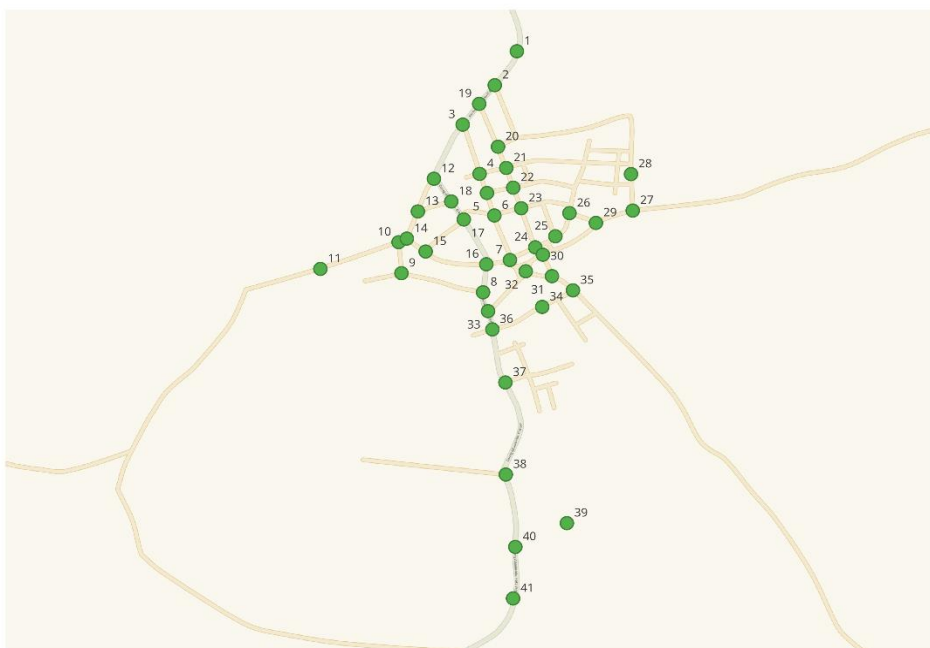
*Fuente: Elaboración propia por medio de software QGIS y plugins*

**Ilustración 10**  
*Nodos Ruta MR2*



*Fuente: Elaboración propia por medio de software QGIS y plugins*

**Ilustración 11**  
*Nodos Ruta MR3*



*Fuente: Elaboración propia por medio de software QGIS y plugins*

Después del posicionamiento de todos los nodos sobre las rutas correspondientes en el mapa base, debemos instalar el complemento ORS Tools que posteriormente encontraremos en la pestaña Web en la Barra de herramientas Menú, accedemos a la subsección Provider Settings, nos logueamos con el enlace que aparece en el campo Base URL, para obtener una llave API Key y aceptamos. Ahora, ingresamos al plugin y nos dirigimos a la ventana Batch Jobs, sección Directions, cliqueando en Points (1 Layer), si deseamos hallar la ruta más corta o la más rápida (no siempre la ruta más corta es la más rápida), llenamos los campos de la pestaña parámetros y ejecutamos. Esto mismo si deseamos establecer mapas isócronos de tiempo o distancia por puntos o capas, por medio de la sección Isochrones en los campos from points o from layer. Sin embargo, para este caso en específico buscamos establecer la Matrix Distance, llenamos los campos de la pestaña parámetros y ejecutamos, generando la capa Matrix, clic derecho y optamos por la opción abrir tabla de atributos para validar los valores en Hora-Kilómetros, de esta misma manera llegamos a la opción Exportar, guardar como objetos, cambiamos el formato a Hoja de cálculo de MS Office Open XML [XLSX], establecemos nombre de archivo, deseccionamos añadir archivo guardado al mapa y aceptamos.

Se efectúa una limpieza de los datos tabulados correspondiente al debido análisis del proceso de formación u obtención de la matriz de distancias por cada ruta para su respectivo manejo en base al modelo matemático (*Anexo D*).

## **Representación Matemática del Problema y Solución del Modelo de Optimización de Rutas**

### **- Formulación del Modelo de Optimización de Rutas**

Es imperativo identificar las variables que participan en el procedimiento de toma de decisiones y hacer uso de herramientas especializadas en investigación de operaciones con el fin de configurar y estructurar modelos matemáticos destinados a la optimización de rutas. Este proceso se inicia mediante la identificación de modelos en diversas fuentes como bases de datos, tesis y libros, seguido de la selección del método de solución que se ajusten adecuadamente a las características del problema, función objetivo y a las restricciones establecidas, basándonos en los parámetros ya definidos en el sistema vigente.

### **Planteamiento Matemático**

La elección de modelar el problema de recolección de basuras mediante el Problema del Agente Viajero (TSP) encuentra su fundamentación en una cuidadosa revisión del estado del arte. Este análisis de la literatura especializada reveló que la problemática de la recolección de residuos ha sido abordada con diversas aproximaciones, entre las cuales se destacan modelos como el Problema del Cartero Chino y el Ruteo de Arcos. Sin embargo, tras una evaluación detallada, se determinó que el modelo del Agente Viajero emerge como la opción más idónea y eficiente para representar matemáticamente nuestra problemática específica.

Pérez Rave, (2011), aclara la importancia que mantiene el estudio del TSP, de manera que entre los años 1960-2010 en el motor de búsqueda Scopus® (17/02/2011) se logró hallar 4.431 divulgaciones que satisfacen los parámetros de indagación “Publicación de artículos sobre el TSP a nivel general y como eje central”, la colectividad de escritos hallados fue de 1.032, presentando esta una propensión de incremento en el número de publicaciones del 59,5% en el último decenio.

Este enfoque se respalda en investigaciones anteriores, como el trabajo de Escudero Andino, (2021), quien *diseñó un modelo matemático para mejorar las rutas de trayectoria del proceso de recogida de desechos sólidos para el Cantón Valencia*, utilizando la metodología de resolución del problema del "vendedor viajero" enmarcada en la Investigación de Operaciones. Este método, que utiliza la Programación Lineal Entera Binaria, se centra en optimizar rutas de transporte con un origen, varios nodos de abastecimiento (desechos a recolectar) y un destino (sitio de disposición de los desechos), asignando costos a los parámetros operativos y buscando la red que minimice la función de costos, es decir, que reduzca al máximo la distancia recorrida (Escudero Andino, 2021).

La adaptabilidad del TSP a los parámetros, objetivos y restricciones inherentes al problema de recolección de basuras se convierte en un elemento clave en esta elección. El TSP, al buscar la ruta más corta que conecta múltiples nodos, se alinea perfectamente con la necesidad de optimizar la trayectoria del vehículo de recolección, minimizando la distancia total recorrida. Además, la flexibilidad del TSP para manejar restricciones específicas, como la visita única a cada nodo y la inclusión de subciclos, brinda la versatilidad necesaria para abordar las complejidades del problema en cuestión.

Genéricamente los Problemas de Ruteo de Vehículos radican en una extensa categoría de desafíos relacionados con la distribución, obtención de información y prestación de servicios mediante el uso coordinado de vehículos, efectuando sus desplazamientos a lo largo de una red de rutas que se originan por medio de ubicaciones establecidas, conocidas como nodos (Zabala, 2006).

Un ejemplo emblemático de esta familia es el Problema del Vendedor Viajante, también conocido como Problema del Agente Viajero, el cual dispone de un vehículo que debe reconocer

un grupo de clientes, pasando por cada uno de ellos una única vez y retornando al origen, con la meta de minimizar el tiempo total de desplazamiento (Zabala, 2006).

El Problema del Agente Viajero (TSP) se presenta como un desafío clásico en la optimización combinatoria, con amplias aplicaciones en la logística, planificación de rutas y diseño de redes. En el TSP, un agente debe determinar la ruta más eficiente para visitar un conjunto dado de nodos, regresando al nodo inicial después de recorrer todos los demás. La complejidad inherente de este problema radica en la indagación de la resolución óptima entre todas las posibles combinaciones de rutas, lo que da lugar a un impacto combinatorio a medida que aumenta la cifra de nodos.

De manera un poco más descriptiva, en el marco del Problema del Agente Viajero (TSP), según Fuentes Penna, (2014), si imaginamos un escenario donde existen varias ciudades que deben ser visitadas por un individuo, sin repetir la visita a ninguna ciudad, por ejemplo, si consideramos tres ciudades (A, B y C), el número de posibles rutas sería determinado por las combinaciones sin repetición, expresadas por la función  $C(n,2)$ , obteniendo así 6 soluciones: ABC, ACB, BAC, BCA, CAB y CBA. De esta misma manera, al considerar un incremento en la cantidad de ciudades a 5, el número de combinaciones se elevaría a 20, y para 15 ciudades tendríamos 210 combinaciones posibles. Este crecimiento exponencial subraya la complejidad inherente al TSP, que se intensifica aún más al lidiar con problemas que involucran un mayor número de nodos, como el escenario de 150 ciudades, donde se obtendrían 21,000 combinaciones.

De esta manera, el TSP está categorizado como un **Problema de Optimización Combinatoria** (López et al., 2014), lo que significa que implica un conjunto de variables, donde cada una puede asumir N valores diferentes, y del cual el número de composiciones resultante es

de naturaleza exponencial, permitiendo la existencia de varias soluciones óptimas, es decir, soluciones calculables en un tiempo finito para una instancia dada. Es por lo que, según Martínez Vargas, (2017), representa un desafío considerable en términos de resolución y se clasifica como **NP-Completo** en el ámbito computacional, indicando la imposibilidad de garantizar la obtención de la solución óptima dentro de un tiempo de ejecución razonable.

Para abordar este problema, se recurre a diversos métodos, siendo las heurísticas las estrategias principales, las cuales tienen como objetivo generar soluciones de alta calidad en intervalos de tiempo significativamente más cortos, optimizando así el tiempo de respuesta (Fuentes Penna, 2014).

Por otra parte, la formulación matemática del TSP implica la definición de variables de decisión binarias que indican la presencia o ausencia de conexiones entre nodos, así como restricciones que aseguran la visita y salida adecuadas de cada nodo, la eliminación de subciclos y la índole binaria de las variables. La función objetivo, según Gracia et al., (2015), busca minimizar la longitud total de la ruta, encapsulando así el objetivo fundamental de encontrar la solución más eficiente y económica para el recorrido del agente viajero.

Según Laporte, (1992), el TSP puede definirse en un grafo entero no dirigido  $G = (N, E)$  si es simétrico o en un grafo dirigido  $G = (N, A)$  si es asimétrica. El conjunto  $N = \{1, \dots, n\}$  es el conjunto de nodos,  $E = \{(i, j): i, j \in N, i < j\}$  es un conjunto de aristas y  $A = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$  es un conjunto de arcos. Una matriz de costes  $D = (d_{ij})$  está definida en  $E$  o en  $A$ .

Al realizar un paralelo entre los problemas mencionados, podemos identificar que, en el modelo del agente viajero, los nodos representan ciudades que deben ser visitadas, mientras que, en el problema de recolección de basura, los nodos equivalen a las esquinas de las manzanas o cuadras que requieren ser cubiertas. De igual manera, cuando una arista conecta dos nodos en el

modelo del agente viajero, representa la ruta directa entre dos ciudades a visitar, mientras que, en el problema de recolección de basura, las aristas conectan esquinas específicas, indicando la ruta más eficiente para cubrir todas las ubicaciones de recolección.

### Ecuaciones Matemáticas

A continuación, se presentan las ecuaciones matemáticas fundamentadas en el Problema del Agente Viajero (TSP), que sirven como base formal para la adaptación al contexto específico del diseño de rutas para la recogida de residuos sólidos en el municipio de San Juan de Betulia. Abarcando la formalización precisa de las variables, restricciones y objetivos que caracterizan este desafío de optimización combinatoria, con el propósito de modelar de manera rigurosa la búsqueda de la ruta más eficiente que visite cada nodo precisamente una vez y retorne al punto de partida.

Es relevante subrayar que la elección de este modelo responde a las similitudes previamente detalladas en la sección anterior, donde se identificaron paralelos significativos entre las características del TSP y las particularidades del problema de recolección de basura.

**Tabla 8**  
*Ecuaciones matemáticas que representan el problema*

Conceptos	Definiciones	Especificaciones
Conjuntos	$\{1, 2, 3, \dots, n\}$ <b>(1)</b>	Conjunto de nodos que deben ser visitados, donde $n$ es el número total de nodos. (Esquinas de las manzanas o cuadras que requieren ser cubiertas)
Parámetros	$d_{ij}$ <b>(2)</b>	Matriz de Distancia entre los nodos $i$ y $j$ .

		(Longitudes reales entre cada esquina de las manzanas o cuadradas)
	$u$	Número que establece el orden de visita entre nodos de tal manera que se dispongan en un orden ascendente para usar en restricciones de eliminación de subciclos.
Variables de Decisión	$x_{ij} \in \{0, 1\}$	Variable binaria que indica si el agente viajero se desplaza desde el nodo $i$ al nodo $j$ en la ruta.
	(4)	(0, significa que no se realiza el desplazamiento directo entre los nodos. 1, denota que se efectúa el desplazamiento directo)
Función Objetivo	$\sum_{0 \leq i \neq j \leq n} d_{ij} x_{ij}$	Minimizar (Reducir las distancias entre nodos)
	(5)	
Restricciones	$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1$	Visita de cada nodo una vez Para cada nodo ( $j = 1, \dots, n$ )
	(6)	
	$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1$	Salida de cada nodo una vez Para cada nodo ( $i = 1, \dots, n$ )
	(7)	

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1$$

Eliminación de subciclos

(8)

Para cada conjunto  $(1 \leq i \neq j \leq n)$ 


---

Fuente: *Elaboración propia por medio del Problema del Agente Viajero (TSP)*

(1) El modelo matemático propuesto para el problema de recolección de basuras emplea el conjunto  $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ , a modo de ejemplo, para representar los nodos que deben ser visitados, siendo  $n$  el número total de nodos en el problema y tabulados sobre (2) una matriz de distancias  $d_{ij}$ , que establece las longitudes reales (obtenidas por medio del *plugin* OrTools en el software QGIS) entre los nodos  $i$  y  $j$ .

(3) Por otro lado,  $u$  es un número que se utiliza como cota superior en la restricción de eliminación de subciclos, al establecer el orden de visita entre nodos de tal manera que se dispongan en un orden ascendente.

(4) Seguidamente, se introduce una variable binaria  $x_{ij}$  para cada posible conexión entre nodos, indicando si el agente viajero se desplaza desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  en la ruta, es decir, cuando  $x_{ij} = 1$ , implica que el agente viajero se desplaza desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  en la ruta; en cambio, cuando  $x_{ij} = 0$ , denota que no existe conexión directa entre los nodos  $i$  y  $j$  en la ruta del agente viajero. Esta definición binaria de las variables de decisión proporciona una representación clara y precisa de la presencia o ausencia de arcos en la solución del Problema del Agente Viajero (TSP), facilitando así la formulación y comprensión del modelo matemático.

(5) La función objetivo del modelo calcula la suma ponderada de las distancias entre todos los pares de nodos, considerando únicamente aquellos arcos  $x_{ij} = 1$  que forman parte de la solución. Al minimizar esta expresión, se busca encontrar la ruta más eficiente que conecta todos los nodos, contribuyendo a la solución óptima del problema.

(6) (7) De acuerdo con Miller et al., (1960), después de comprender el problema estándar del TSP, la distancia recorrida en el viaje del punto  $i$  al punto  $j$  demuestra que el dilema de programación entera es equivalente a minimizar de forma lineal. Es decir, es necesario estipular restricciones que aseguren que cada nodo sea asistido y abandonado específicamente una vez.

(8) Miller et al., (1960), también incorpora una estratégica restricción de eliminación de subciclos, que desempeña un papel crucial al prevenir la presencia de soluciones que involucren ciclos redundantes en la ruta del agente viajero, donde  $u_i$  y  $u_j$  son variables continuas asociadas a los nodos  $i$  y  $j$  respectivamente, y aplicándose para cada conjunto de nodos distintos  $i \neq j$ . Esto asegura que, para cualquier conjunto de nodos  $i \neq j$ , la diferencia de las variables  $u_i$  y  $u_j$ , ponderada por el número total de nodos  $n$  y la variable binaria  $x_{ij}$ , no supere  $n - 1$ .

De manera que, ayuda a eliminar ciclos innecesarios en la solución final, mejorando la calidad y eficiencia de la ruta obtenida para el agente viajero.

La introducción de  $u$  en la restricción  $u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1$  impone una penalización significativa si se forma un subciclo en la solución, seleccionando  $u$  para asegurar que esta penalización sea lo suficientemente grande como para desalentar la formación de ciclos innecesarios.

El término  $u_i - u_j$  mide la diferencia entre las variables asociadas a los nodos  $i$  y  $j$ . Cuando  $x_{ij} = 1$ , indicando que hay un desplazamiento desde  $i$  a  $j$ , el término  $nx_{ij}$  multiplica esta diferencia por el número total de nodos  $n$ . Esto, en conjunto, garantiza que, en presencia de subciclos, la suma de las diferencias  $u_i - u_j$  se vuelve demasiado grande, violando la restricción.

*“Las  $u$ , juegan un papel similar a los potenciales de nodo en una red y las desigualdades que las involucran sirven para eliminar los recorridos que no empiezan y terminan en la ciudad 0 y los recorridos que visitan más de  $n$  ciudades.” (Miller et al., 1960).*

La elección adecuada de  $u$  es crucial para el buen funcionamiento de la restricción, ya que determina la severidad de la penalización por subciclos. Un valor demasiado pequeño puede no ser lo suficientemente restrictivo, mientras que un valor excesivamente grande puede afectar la resolución eficiente del problema. Por lo tanto,  $u$  se ajusta cuidadosamente para equilibrar la eliminación de subciclos sin comprometer la eficacia del modelo.

### **- Solución del Modelo Establecido**

Resolver un modelo matemático implica determinar los valores de las variables de decisión que cumplan con las restricciones establecidas en el problema. Para dicho fin, existen diversas soluciones, entre las cuales se destacan técnicas exactas, heurísticas, metaheurísticas y enfoques híbridos. En el caso específico de la mejoría de rutas de recolección de residuos sólidos en el municipio de San Juan de Betulia, se ha abordado inicialmente la solución del Problema del Agente Viajero (TSP) de manera exacta, empleando herramientas como SolverStudio con el solucionador CPLEX. Posteriormente, se exploraron técnicas heurísticas para abordar el desafío en un tiempo razonable y escalable, donde el uso de herramientas de programación se posiciona como un elemento clave, al tener como propósito principal el análisis que determine las rutas más eficientes, empleando softwares especializados en el estudio de grafos y análisis de redes, tales como, WinQSB y Python, apoyados en complementos como, por ejemplo, Network. A través de estos enfoques, se busca garantizar la obtención de soluciones efectivas y visualmente representativas del trayecto planificado para la recolección óptima de residuos sólidos, intentando proporcionar así una comprensión clara y detallada del proceso a desarrollar.

#### **Método y Software**

Luego de la consecución de la matriz de distancia, donde la prioridad fue la conjetura real de los trayectos entre los nodos estudiados por medio de mapas base en el software topográfico QGIS, nace la necesidad de establecer con precisión la obtención de la función objetivo (minimizar la distancia recorrida) en un tiempo viable, pues tal como afirman Muñoz Rodríguez & Montañez Márquez, (2023), para instancias de tamaño mediano o grande no se ha podido garantizar que algún algoritmo exacto pueda ejecutarse en un tiempo razonable.

Se llevó a cabo un primer intento de abordar el modelo matemático propuesto de manera exacta mediante la programación de las ecuaciones con la herramienta Pyomo, utilizando SolverStudio con el solucionador CPLEX en Excel. Siendo CPLEX, según IBM (2021), una resolución de analítica prescriptiva que agiliza el proceso de creación e implementación de modelos de optimización de decisiones mediante el uso de programación matemática y restricciones, *“concretamente, un solucionador de problemas de programación lineal (LP) capaz de abordar problemas de optimización restringidos de forma lineal o cuadrática, en los cuales el objetivo a optimizar puede ser expresado como una función lineal o una función cuadrática convexa”*. Cabe resaltar que, de acuerdo con la documentación oficial de CPLEX, este emplea el algoritmo de Branch and Bound, que combina estrategias de ramificación y poda con técnicas de corte para aumentar la eficiencia durante el proceso de búsqueda de soluciones óptimas.

Este primer intento fallido sobre la utilización de un algoritmo exacto se llevó a cabo por medio del uso de SolverStudio que, según Mason, (2013), es una extensión diseñada para Excel 2007 y versiones más recientes de Windows, la cual facilita la creación y resolución de modelos de optimización en Excel mediante el uso de diversos lenguajes de modelado de optimización disponibles. Que, para este caso en específico, se implementó con COOPR/Pyomo, *“un lenguaje de modelado COIN-OR de código abierto para Python que amplía Pulp con modelos abstractos, soporte para programación estocástica y una gama más amplia de solucionadores”* (Mason, 2013).

El uso de este complemento, más información, modelos ejemplos, descarga e instalación, ayudas y desarrollo, yacen en el sitio web oficial de este mismo: *‘solverstudio.org’*.

Por otro lado, el equipo de cómputo utilizado para ejecutar de manera exacta la función objetivo sobre un tiempo razonable ( $\leq 3600$ seg) de acuerdo con las matrices de distancia por cada

ruta a través de SolverStudio, cuenta con características tales como, procesador Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz 2904 Mhz, memoria RAM de 16GB y sistema operativo de 64 bits. Pudiendo resolver la ruta del corregimiento de Albania, correspondiente a la matriz de menor números de nodos en un tiempo de 370,60 segundos, pero sin lograr la misma finalidad con las demás matrices enfocadas al municipio de estudio.

Al no poder efectuar esta solución para todas las rutas, se optó por establecer un método de solución aproximado.

Encontrar la solución óptima para un TSP de tamaño moderado implica un tiempo de cálculo considerable, lo que motiva la exploración y aplicación de algoritmos aproximados o heurísticos que, aunque no aseguren una solución precisa, ofrecen una solución casi óptima con un esfuerzo computacional razonable (Laporte, 1992).

Entre los diversos métodos disponibles para alcanzar la resolución óptima de cualquier instancia del TSP, dos enfoques destacados son el método exacto, representado por la aplicación de Branch and Bound para determinar la longitud óptima, y el método de Held-Karp, que establece un límite inferior para la solución óptima, sirviendo como referencia para evaluar el desempeño de cualquier nueva heurística propuesta para el TSP (Laporte, 1992).

*“El límite inferior de Held-Karp (HK) es la solución a la relajación de programación lineal de la formulación de programación entera estándar del problema del viajante de comercio (TSP).”* (Johnson et al., 1996).

De esta manera, a través del lenguaje de programación Python y sus librerías, denominadas según Pontia tech, (2023), como grupos de módulos, los cuales son archivos que albergan una serie de funciones, clases y variables interrelacionadas. Se manejó la magnitud de los datos longitudinales de cada ruta, por medio de la Librería Numpy, enfocada en el

procesamiento numérico y análisis de conjuntos extensos de datos. Esta librería, según Alf, (2022), incorpora una clase de objetos denominada '*arrays*', diseñada para representar colecciones de datos homogéneos en varias dimensiones, lo cual la hace ideal para el procesamiento de vectores y matrices de grandes extensiones.

También se anexaron bibliotecas como NetworkX, que de acuerdo con Amat Rodrigo & Carazo Melo, (2023), proporciona funcionalidades que simplifican considerablemente la identificación del entorno o vecindario de un nodo. Y Matplotlib, utilizada en la visualización o exploración gráfica de nodos y conexiones (Amat Rodrigo & Carazo Melo, 2023). Asimismo, NetworkX presenta una de las mejores soluciones aproximadas conocidas para el TSP, denominada como *asadpour\_atsp* donde el algoritmo resuelve primero la relajación de Held-Karp encontrando una cota inferior para el peso del ciclo (NetworkX, 2023).

Es decir, en pocas palabras, se eligió abordar el modelo matemático utilizando el enfoque del Problema del Agente Viajero (TSP) como un marco de optimización. Este método, que se basa en la teoría de grafos, se implementó mediante el lenguaje de programación Python, utilizando las librerías específicas pertinentes dentro del código. Además, para mejorar la representación geoespacial de las soluciones obtenidas, se integró el software QGIS en el proceso.

Sin embargo, en el proceso de funcionamiento de la solución, se tomó la decisión estratégica de emplear la Heurística del Vecino Más Cercano (Nearest Neighbor Heuristic) como enfoque para la satisfacción del Problema del Agente Viajero (TSP) en el contexto del diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia, fundamentada en su alineación planteada con los principios de eficiencia y optimización presentes en el marco teórico. Esta heurística sigue una lógica sencilla y efectiva al seleccionar,

en cada paso del recorrido, el nodo más cercano al actual, lo que facilita no solo la construcción de la ruta de manera rápida sino también una aproximación eficiente al problema.

González Restrepo et al., (2020), Monsalvo Torres, (2021), y Ramos González, (2015), analizan de manera independiente en sus respectivos trabajos de investigación el rendimiento de la solución arrojada por la heurística del vecino más cercano (VCM), indicando que esta puede lograr un buen desempeño al ser comparado con otros algoritmos de solución no presentes en la solución más óptima, pues si arroja resultados factibles al igual que las demás, ya que genera una notable minimización de las distancias recorridas e incluso una gran reducción de los costos operacionales, lo cual la hace una heurística muy útil para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos. Este enfoque no solo busca una solución rápida sino también se apoya en las bases teóricas que respaldan la optimización de la ruta, asegurando así una aproximación eficiente al problema del TSP.

### ***Código Python para TSP de Recolección de RSU***

Para hablar de la programación en Python de este problema, primero debemos destacar el uso de NetworkX, no como una librería o complemento más de este lenguaje, sino como según afirma Herrera Cayotopa & Zuloeta Atalaya, (2019), una herramienta específica de programación de redes situada en el programa de toma de decisiones WinQSB, ampliamente utilizado en la investigación de operaciones.

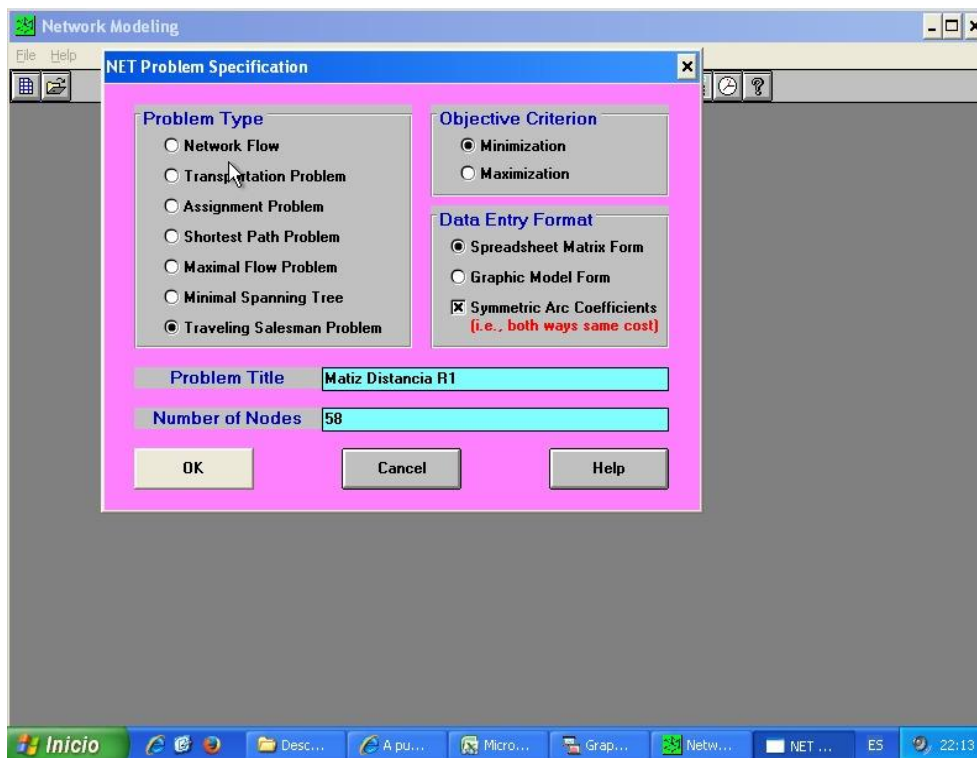
Network Modeling, como es denominado en el programa de WinQSB, emulado en Windows XP, según Santiago Tumialán, (2023), mantiene un esquema dedicado a abordar el problema de transbordo, el problema de transporte, la asignación, la búsqueda del camino más corto, el flujo máximo, el árbol generador mínimo y el problema del agente viajero.

En este caso, se decidió testear el sistema de procesamiento de Network (NET) en WinQSB con la matriz de distancia más grande, de manera que pudiéramos concluir que las matrices con nodos inferiores también serían ejecutadas.

Iniciamos Network Modeling y efectuamos *New Problem*, estableciendo las especificaciones del problema, tales como, tipo, objetivo de criterio, formato de datos y dando tamaño a la matriz por el número de nodos.

### Ilustración 12

#### NET Problem Specification



Fuente: Elaboración propia por medio del programa WinQSB

Para la solución del TSP, aunque todas las opciones presentes son heurísticas con resultados aceptables a pesar de no asegurar una solución óptima, seleccionamos Nearest Neighbor Heuristic (Heurística del Vecino más Cercano) debido a su uso común en este tipo de trabajo gracias a su cierta concordancia con el problema al establecer la restricción de regresar al nodo de partida (*Ilustración XIII*). Aplicar la estrategia del Vecino más Cercano como enfoque

para resolver el problema de ruteo de vehículos ofrece una solución efectiva al cumplir con el objetivo de minimizar el costo total de distancia recorrida (Ramírez Rodríguez, 2016b).

Pese a que, estos sistemas interactivos y operativos (WinQSB y Windows XP), fueron instaurados a finales del Siglo XX, otorgaron resolución al TSP analizado en esta investigación (*Ilustración XIV*). Sin embargo, no estuvo de más buscar una solución actualizada de acuerdo con avances de la tecnología y la trascendencia de otros estudios en el tiempo.

### Ilustración 13

#### *Traveling Salesman Solution Method*

The screenshot shows the WinQSB software interface. A dialog box titled "Traveling Salesman Solution Method" is open, allowing the user to select a heuristic method. The background shows a spreadsheet with distance data between 23 nodes (Node1 to Node23). The dialog box has the following options:

- Nearest Neighbor Heuristic
- Cheapest Insertion Heuristic
- Two-way Exchange Improvement Heuristic
- Branch and Bound Method

Buttons in the dialog box include "Solve", "Branch-and-Bound Steps", "Cancel", and "Help".

Node	Node5	Node6	Node7	Node8
Node5	320.19	240.28	695.19	727.7
Node6	150.63	70.72	525.03	557.55
Node7	118.52	43.16	638.01	670.53
Node8	43.63	118.06	712.91	745.42
Node9	0	80.33	675.47	707.99
Node10	80.33	0	595.56	628.07
Node11	675.47	595.56	0	170
Node12	707.99	628.07	170	0
Node13	741.39	661.47	205.47	35.47
Node14	623.69	543.77	157.18	89.63
Node15	566.51	396.36	509.34	584.23
Node16	592.72	422.56	535.54	610.44
Node17	498.63	328.47	441.45	516.35
Node18	434.23	264.07	377.06	451.95
Node19	590.72	420.56	533.54	608.44
Node20	677.13	506.97	619.95	694.85
Node21	761.85	591.69	704.67	779.56
Node22	803.16	633	745.98	820.88
Node23	1156.07	985.91	1098.9	1173.79
Node24	1035.11	864.95	977.94	1052.83
Node25	1108.84	938.68	1051.66	1126.56
Node26	984.11	813.96	926.94	1001.83
Node27	1051.74	881.58	994.57	1069.46
Node28				
Node29				
Node30				
Node31				
Node32				
Node33				
Node34				
Node35				
Node36				
Node37				
Node38				
Node39				
Node40				
Node41				
Node42				
Node43				
Node44				
Node45				
Node46				
Node47				
Node48				
Node49				
Node50				
Node51				
Node52				
Node53				
Node54				
Node55				
Node56				
Node57				
Node58				
Node59				
Node60				
Node61				
Node62				
Node63				
Node64				
Node65				
Node66				
Node67				
Node68				
Node69				
Node70				
Node71				
Node72				
Node73				
Node74				
Node75				
Node76				
Node77				
Node78				
Node79				
Node80				
Node81				
Node82				
Node83				
Node84				
Node85				
Node86				
Node87				
Node88				
Node89				
Node90				
Node91				
Node92				
Node93				
Node94				
Node95				
Node96				
Node97				
Node98				
Node99				
Node100				

Fuente: Elaboración propia por medio del programa WinQSB

### Ilustración 14

NET Solución ejemplo TSP R1

	From Node	Connect To	Distance/Cost		From Node	Connect To	Distance/Cost
8	Node13	Node15	94,55	37	Node51	Node49	49
9	Node15	Node16	86,41	38	Node49	Node50	126,12
10	Node16	Node9	224,62	39	Node50	Node48	294,72
11	Node9	Node8	35,47	40	Node48	Node47	95,58
12	Node8	Node10	89,63	41	Node47	Node43	90,4
13	Node10	Node11	82,6	42	Node43	Node34	80,95
14	Node11	Node12	29,06	43	Node34	Node42	57,08
15	Node12	Node17	297,8900	44	Node42	Node38	23,53
16	Node17	Node18	365,84	45	Node38	Node41	36,32
17	Node18	Node25	107,85	46	Node41	Node37	104,55
18	Node25	Node7	13,15	47	Node37	Node36	48,7
19	Node7	Node26	265,6	48	Node36	Node21	47,52
20	Node26	Node28	115,29	49	Node21	Node20	90,32
21	Node28	Node29	19,27	50	Node20	Node19	126,98
22	Node29	Node53	118,02	51	Node19	Node35	320,62
23	Node53	Node54	77,89	52	Node35	Node23	129,37
24	Node54	Node57	72,78	53	Node23	Node24	101,08
25	Node57	Node58	74,43	54	Node24	Node22	191,88
26	Node58	Node56	180,51	55	Node22	Node44	435,29
27	Node56	Node55	72,8	56	Node44	Node40	288,2700
28	Node55	Node52	42,83	57	Node40	Node39	35,58
29	Node52	Node31	53,27	58	Node39	Node1	1432,700
	Total	Minimal	Traveling	Distance	or Cost	=	7.965,21
	(Result	from	Nearest	Neighbor	Heuristic)		

Fuente: Elaboración propia por medio del programa WinQSB

Ahora sí, dado lo anterior, describir el código aplicado concedido por medio de los avances contemporáneos como los lenguajes actualizados de programación y sus extensiones, en este caso, la resolución del Problema del Agente Viajero (TSP) utilizando Python y las librerías Numpy, NetworkX y Matplotlib, se implementaron para manejar datos, representar el grafo, y visualizar la solución, respectivamente. Con especificaciones representativas, tales como:

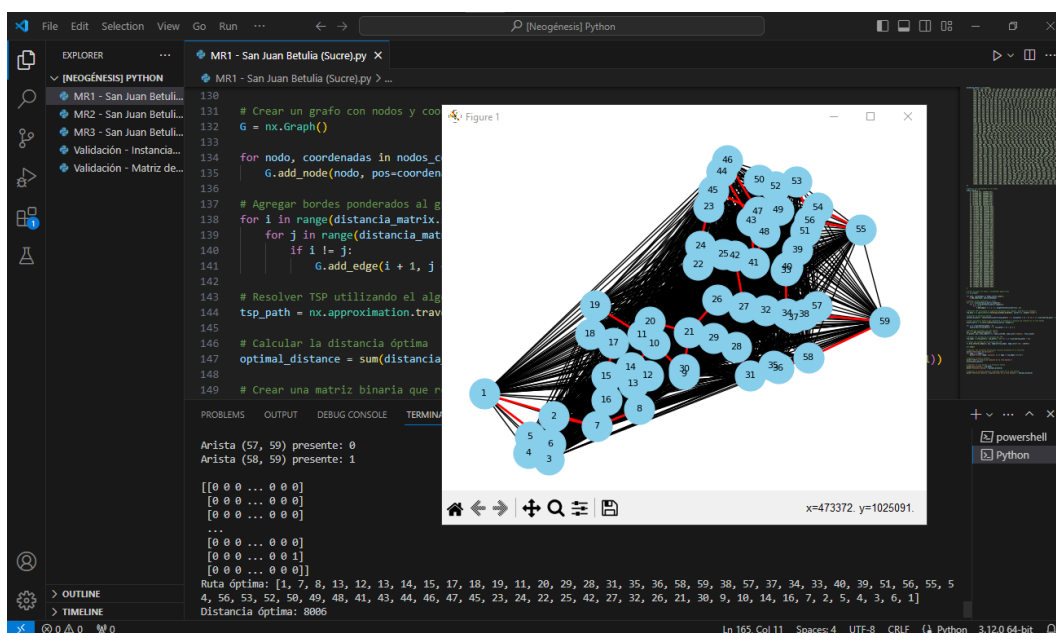
- Se utiliza la biblioteca NetworkX para representar el grafo y encontrar una solución aproximada al TSP.
- Numpy se emplea para manejar la matriz de distancias y la representación de coordenadas geográficas de los nodos.
- Matplotlib se usa para visualizar el grafo y la ruta óptima.

Destacando que, la función ‘`approximation.traveling_salesman_problem`’ de NetworkX se ocupa para resolver el TSP de manera eficiente. También, se incluye la representación de la matriz de distancias, coordenadas geográficas de los nodos, visualización del grafo, y la impresión de la ruta óptima, distancia óptima, matriz binaria de conexión, variables de decisión y función objetivo.

Es crucial resaltar que, en este enfoque, se ha decidido implementar la heurística del Vecino Más Cercano (Nearest Neighbor Heuristic), cuyos fundamentos se apoyan en el algoritmo de Held-Karp, contribuyendo así a la obtención de soluciones de calidad en tiempo razonable.

### Ilustración 15

*Python Solución ejemplo TSP RI*



*Fuente: Elaboración propia por medio del programa Python y librerías específicas*

Este código aborda el TSP utilizando un enfoque de programación y resuelve el problema para encontrar la ruta óptima y visualizarla de manera efectiva. Empieza por importar las librerías, seguidamente busca definir las matrices de distancias y las coordenadas de los nodos, o también llamados aristas, prosigue creando un grafo agregándole bordes ponderados,

procediendo a resolver el TSP a través de la función mencionada y utilizando el algoritmo apropiado, continuamente calcula la ruta óptima que constituye de manera ininterrumpida la matriz binaria donde, por último, extrae y traza las aristas de la solución (*Anexo II*).

### ***Solución de Rutas***

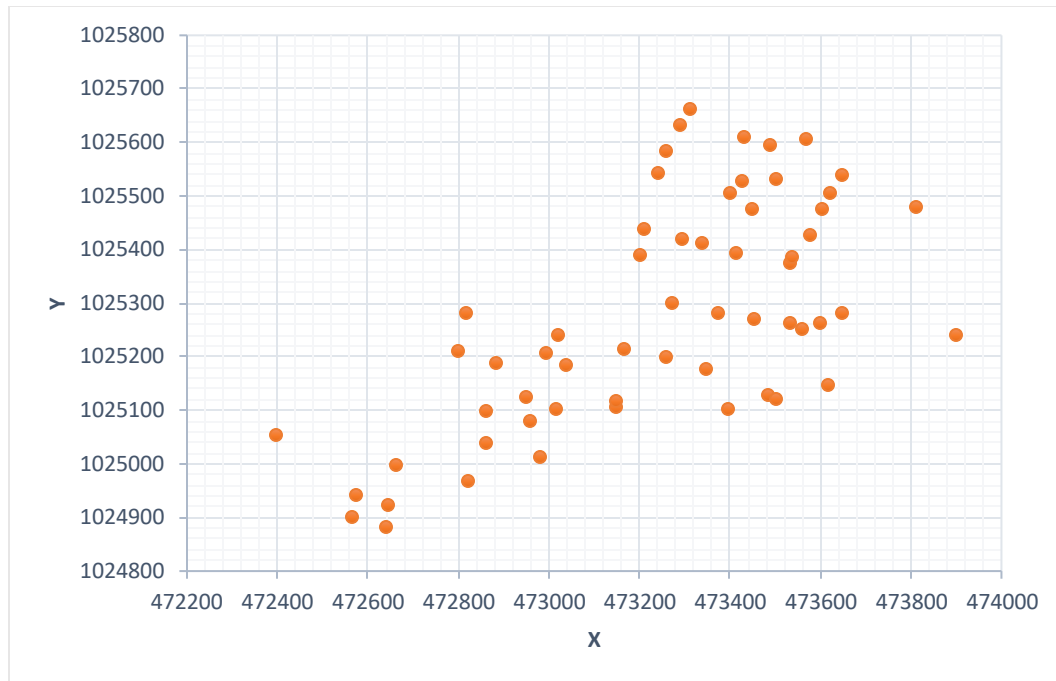
Coloquialmente en este tipo de asentamientos urbanos en la que la capacidad poblacional no es muy amplia en comparación con grandes ciudades o metrópolis, la recolección de residuos sólidos, como hemos mencionado con anterioridad, es efectuada directamente desde las aceras que colindan con el frente de los hogares. Inclusive, si hablamos de la capital sucreña (Sincelejo) de la cual se esperaría un sistema mayormente desempeñado para la debida recogida de basuras, observamos que mantienen el mismo comportamiento de gestión que sus municipios aledaños, donde los operarios circulan tras un vehículo de acopio recogiendo del suelo y arrojando al camión los desechos de las viviendas, es decir, esta metodología de operación ha trascendido, al parecer sin intención de evolución, por medio de las municipalidades y los distintos tipos de asentamientos en el departamento.

No obstante, al comprender la aplicación del TSP, que implica la necesidad de especificar nodos, se intuye que para el caso de recogida de residuos sólidos urbanos es imperativo la estipulación de contenedores o puntos de acopio, eventualmente generando en las esquinas de las cuadras o manzanas residenciales, resultando en una muy buena adaptabilidad del sistema a la realidad entre varias posibles, ya que también se pueden estipular nodos por vivienda, pero por su gran magnitud de nodos posibles es muy tediosa la idea. Sin embargo, se debe reconocer que un municipio como San Juan de Betulia no cuenta con la capacidad financiera, en el momento, para hacer efectivo un avance de tal tipo en su sistema recolección de residuos sólidos urbanos.

Dado lo anterior, yace la exigencia de conjugar el sistema TSP con la realidad del municipio betuliano, al conservar la práctica de recolección manual mediante la estipulación de nodos en las esquinas de las manzanas que, en vez de simbolizar contenedores de recolección, representan puntos de quiebre que figuren la nueva dirección a tomar por parte del vehículo recolector a través de la ruta trazada.

De tal manera, habiendo identificado las rutas actuales con sus parámetros relevantes de distancia y secuencia, seguido de la estipulación de los nodos para la obtención de la matriz de distancias georreferenciadas durante el procesamiento de la información a través del software QGIS con plugins como OrTools, se procedió con la limpieza de los datos mediante el uso del lenguaje de programación Python, exponiendo los productos conseguidos con la ayuda de la implementación del algoritmo TSP, tales como, la ruta óptima, la distancia mínima recorrida, la representación binaria de la conexión en la ruta (*Anexo II*), así como detalles adicionales sobre las variables de decisión y la función objetivo que se detallan a continuación por cada ruta.

**Macro Ruta 1 #181195.** Esta primera ruta de recolección destaca gracias a su amplitud actual de recorrido de 9.02 kilómetros en conjunto con la responsabilidad de iniciar la gestión del proceso semanal (recogida de basuras los días: lunes), se ha podido conservar a través de 59 nodos de operación, que por medio de la georreferenciación se han podido representar en un diagrama de dispersión gracias al uso de coordenadas UTF con la intención de dar a comprender la espacialidad del entorno de San Juan de Betulia, específicamente su zona norte segmentada por su carretera principal.

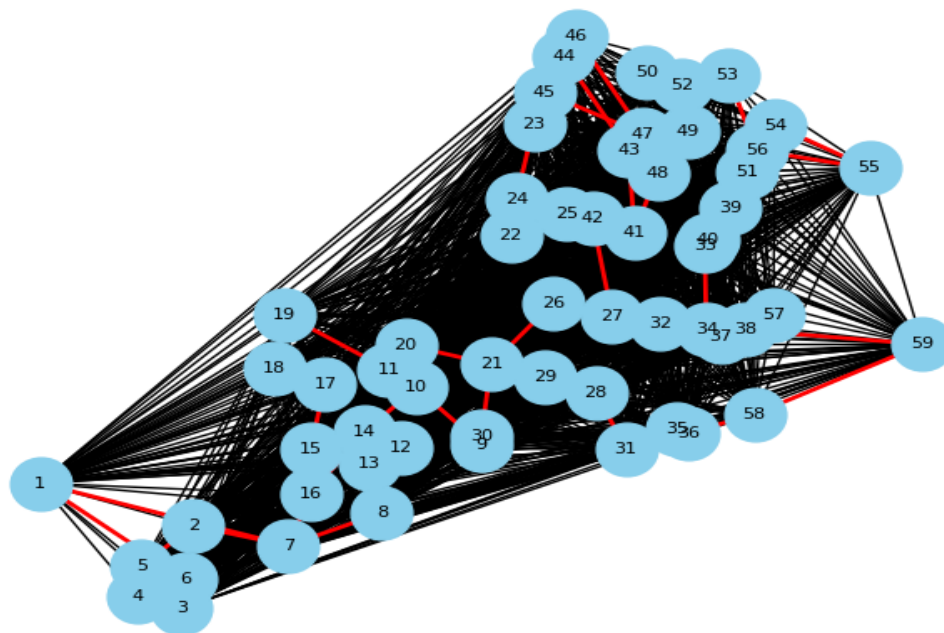
**Ilustración 16***Diagrama de dispersión UTF de MRI*

*Fuente: Elaboración propia a través del uso de coordenadas*

Por consiguiente, después de la consecución y tratamiento de la información, en el que acentuaron productos como la matriz de distancia con longitudes reales no lineales geolocalizadas entre los diferentes nodos, se estipula un pilar fundamental para abordar el Problema del Agente Viajero (TSP), representado por medio de lenguaje de programación, efectuado resultados específicos para esta macrorruta, tales como:

*Ruta Óptima:* [1, 7, 8, 13, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 11, 20, 29, 28, 31, 35, 36, 58, 59, 38, 57, 37, 34, 33, 40, 39, 51, 56, 55, 54, 56, 53, 52, 50, 49, 48, 41, 43, 44, 46, 47, 45, 23, 24, 22, 25, 42, 27, 32, 26, 21, 30, 9, 10, 14, 16, 7, 2, 5, 4, 3, 6, 1]

*Distancia Óptima:* 8.006 km

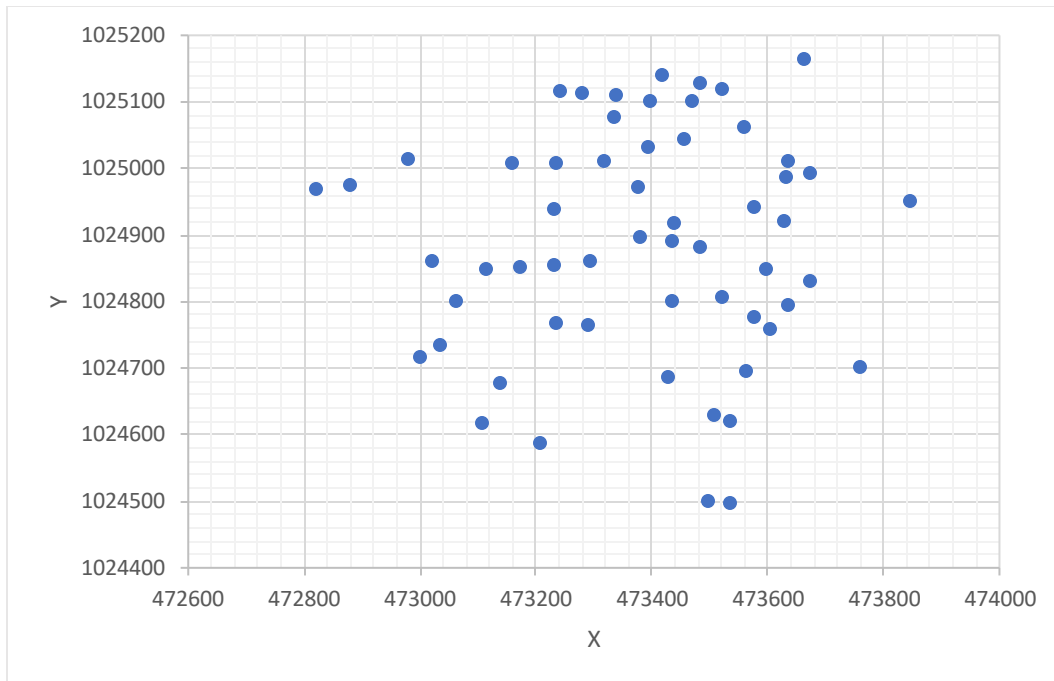
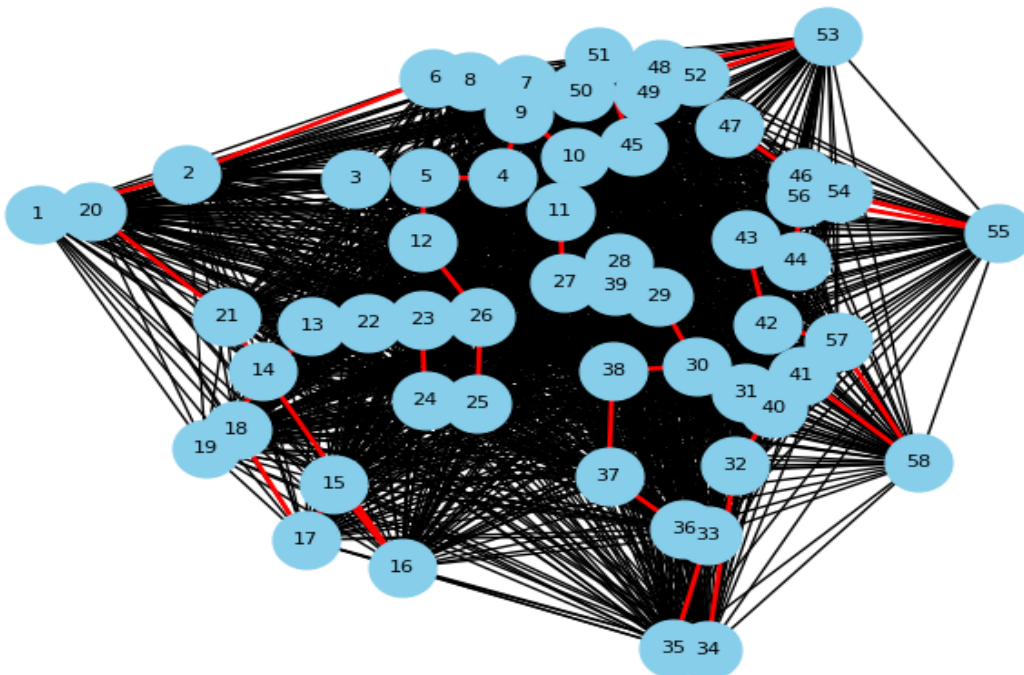
**Ilustración 17***Exploración gráfica de nodos óptimos MRI**Fuente: Elaboración propia a través de código Python*

**Macro Ruta 2 #181196.** Seguidamente, sobre esta segunda ruta operación tenemos que, comparte trayectoria con el corregimiento de Albania, sin embargo, se esclarece su recorrido de acuerdo con la segmentación sur por medio de la carretera principal del municipio de San Juan de Betulia, estableciendo coordenados UTF sobre 58 nodos específicos. Inicialmente mantiene una distancia actual de 7.66 kilómetros durante los días contrarios a la ruta inicial.

Comprendiendo su diagrama de dispersión acorde con la matriz de distancia correspondiente mediante el funcionamiento correcto del código Python, yacen los siguientes resultados:

*Ruta Óptima:* [1, 20, 21, 14, 16, 15, 17, 18, 19, 13, 22, 23, 24, 25, 26, 12, 5, 3, 4, 9, 10, 11, 27, 39, 28, 39, 29, 30, 38, 37, 36, 33, 35, 34, 32, 40, 31, 41, 58, 57, 42, 43, 44, 56, 55, 54, 46, 47, 52, 53, 48, 49, 45, 51, 50, 7, 8, 6, 2, 1]

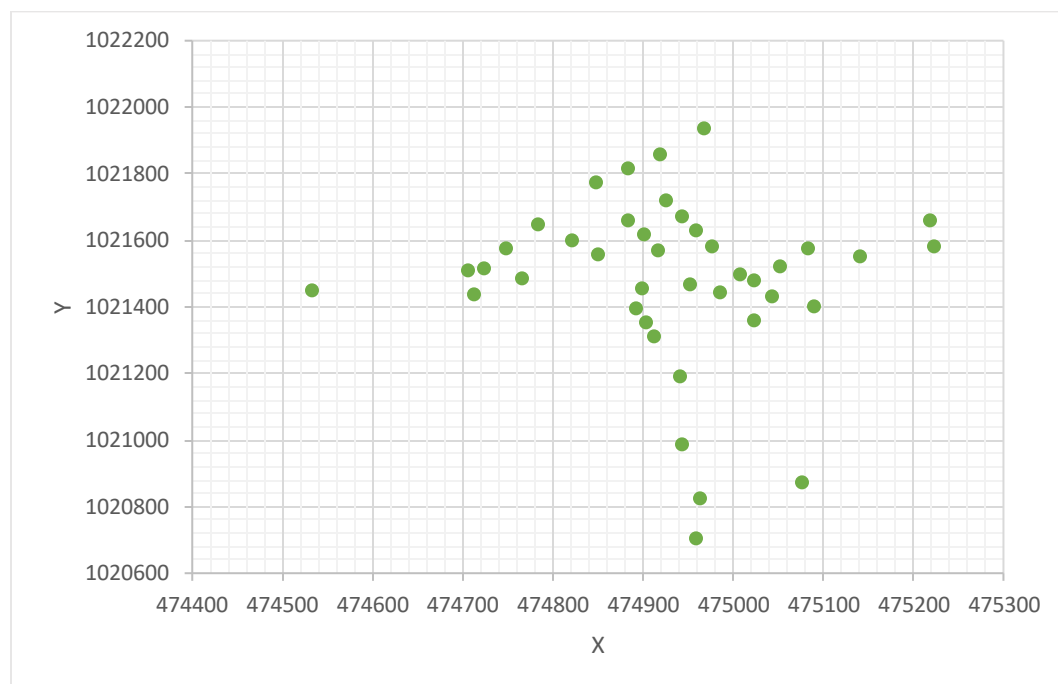
*Distancia Óptima:* 6.124 km

**Ilustración 18***Diagrama de dispersión UTF de MR2**Fuente: Elaboración propia a través del uso de coordenadas***Ilustración 19***Exploración gráfica de nodos óptimos MR2**Fuente: Elaboración propia a través de código Python*

**Macro Ruta 3 #181197.** Al explorar la interrelación entre el municipio y su corregimiento adyacente a lo largo de la segunda ruta de recolección, se revela una distancia actual de 4.46 kilómetros para Albania. Este dato, esencial para la optimización de la logística, se ha resumido mediante la definición de 41 nodos de referencia con coordenadas UTF.

**Ilustración 20**

*Diagrama de dispersión UTF de MR3*



*Fuente: Elaboración propia a través del uso de coordenadas*

Estos nodos proporcionan puntos geospaciales específicos que contribuyen a la precisión en la representación del terreno, permitiendo una planificación detallada de las rutas de recolección. La integración de información geográfica y la caracterización de nodos específicos no solo mejoran la eficiencia en la gestión de la recolección, sino que también establecen una fundamentación sólida para futuras optimizaciones y dictámenes estratégicos en el manejo de residuos.

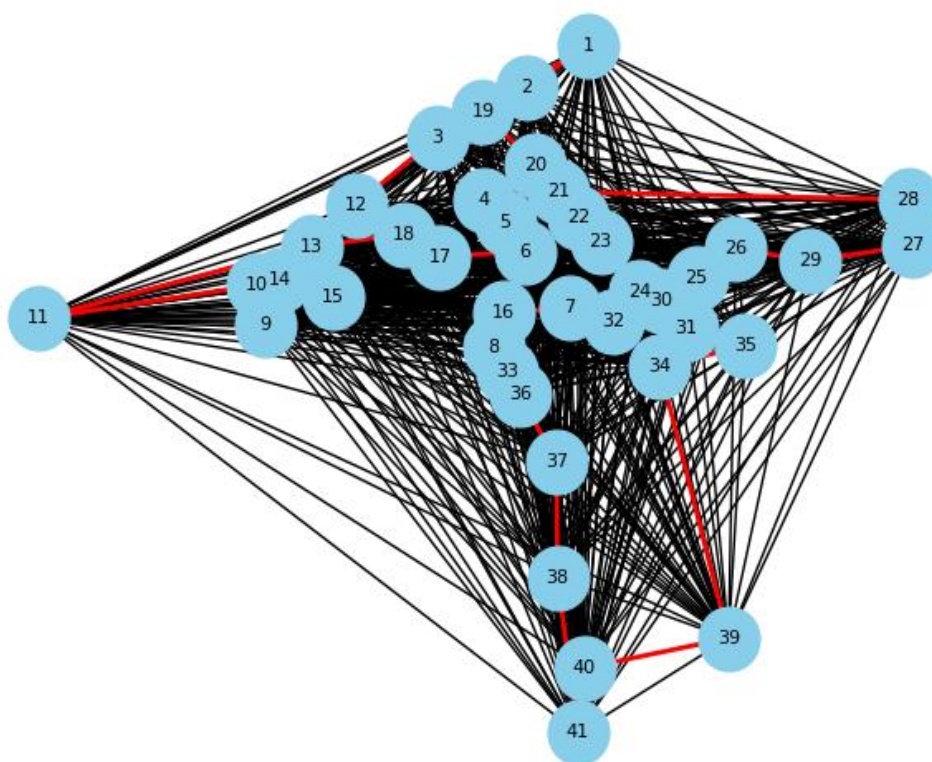
De esta manera, con el uso de Python y habiendo determinado matriz de distancias junto a coordenadas, tenemos resultados como:

*Ruta Óptima:* [1, 19, 20, 21, 28, 27, 29, 26, 25, 24, 30, 32, 31, 35, 34, 39, 40, 41, 38, 37, 36, 33, 8, 16, 7, 24, 23, 22, 4, 5, 6, 17, 18, 13, 11, 10, 9, 14, 15, 13, 12, 3, 2, 1]

*Distancia Óptima:* 5.057 km

### **Ilustración 21**

*Exploración gráfica de nodos óptimos MR3*



*Fuente: Elaboración propia a través de código Python*

Las nuevas rutas propuestas reflejan mejoras sustanciales con respecto a las rutas actuales, lo cual demuestra una optimización significativa en las distancias recorridas. En el caso de la MR1 #181195, se logra una reducción del 11.24%, disminuyendo de 9.02 km a 8.006 km. Para la MR2 #181196, la mejora alcanza el 20.05%, reduciendo la distancia de 7.66 km a 6.124 km. Sin embargo, en el caso de la MR3 #181197, aunque se observa un ligero incremento del 13.38% en la distancia propuesta en comparación con la ruta actual, pasando de 4.46 km a 5.057 km, aún representa una mejora general en eficiencia con respecto a las rutas existentes.

En pocas palabras, los resultados aproximados obtenidos al aplicar Heurística del Vecino Más Cercano (Nearest Neighbor Heuristic) para la resolución del Problema del Agente Viajero (TSP) reflejan determinación al tratar de resolver rutas óptimas. La implementación de este método ha demostrado su capacidad para encontrar soluciones casi óptimas, siendo un recurso valioso en la optimización de trayectorias en diversas aplicaciones, desde la logística hasta la planificación de rutas en la vida cotidiana.

Por otro lado, la combinación de la potencia de este algoritmo con las herramientas proporcionadas por las librerías en Python, como NetworkX, han facilitado significativamente el análisis y la visualización de las soluciones, brindando una perspectiva clara y detallada sobre las mejores rutas posibles. En consecuencia, la aplicación de estos métodos no solo mejora la eficiencia en la toma de decisiones logísticas, sino que también ofrece un enfoque escalable y versátil para abordar problemas de optimización en una variedad de contextos.

### **Validación de Hallazgos - Verificación de los Resultados del Modelo Propuesto**

El capítulo anterior delineó meticulosamente el modelo matemático utilizado para abordar el desafío de optimización combinatoria planteado por el Problema del Agente Viajero (TSP) en el contexto del diseño de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre.

Por lo que, para este capítulo nos sumergimos en el proceso crucial de verificación de los resultados generados por nuestro modelo propuesto. La efectividad y confiabilidad de cualquier solución propuesta dependen intrínsecamente de su capacidad para representar de manera precisa y eficiente la realidad del problema. A través de rigurosas evaluaciones y análisis, apreciamos la validez de las rutas obtenidas y la eficiencia de la solución, asegurando así que nuestro modelo no solo sea teóricamente sólido, sino también prácticamente efectivo. Adentrémonos en la validación de hallazgos con la misma precisión y atención al detalle que hemos dedicado a la formulación del modelo, por medio de la comprobación en campo y corroboración del algoritmo a través de instancias aleatorias.

### **Evaluación en Campo de las Rutas Óptimamente Propuestas**

Una vez implementado y resuelto el modelo matemático del Problema del Agente Viajero (TSP) mediante programación en Python, se lograron obtener las rutas óptimas, las cuales fueron generadas en base a los nodos establecidos en el software de georreferenciación QGIS. Estos nodos fueron estratégicamente ubicados para abarcar la mayor cantidad posible de los arcos que conforman las rutas preestablecidas por ServiAseo S.A. Las variables de solución fueron definidas considerando las distancias entre nodos, las cuales fueron obtenidas de las matrices de distancias de cada ruta de recolección. Estas variables fueron representadas utilizando valores binarios de 0 y 1 para indicar si una ruta era recorrida o no.

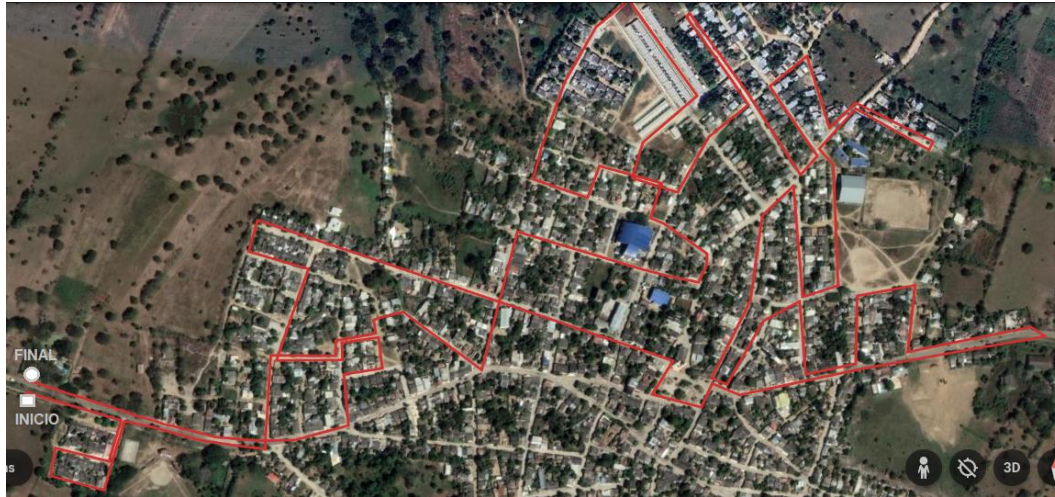
Para establecer las nuevas rutas planteadas, se enfatiza el paso por los nodos recomendados y los arcos que estos forman según la solución obtenida en Python. Sin embargo, dado que esta solución no considera aspectos como el sentido de las calles y el acceso de algunas vías, se requiere realizar ajustes adicionales. Por lo tanto, se lleva a cabo una evaluación en campo de las rutas óptimas propuestas para verificar que estas mantengan coherencia y sean congruentes con los resultados esperados durante la validación de los hallazgos.

A continuación, se detallarán cada una de las rutas propuestas para abordar la minimización de las distancias recorridas por el vehículo de recolección de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el municipio de San Juan de Betulia, Sucre.

### ***Ruta Óptima - MRI #181195***

Para esta primera ruta, nos situamos geográficamente en el área que comprende la zona superior del municipio, dividido por la vía troncal Corozal - San Juan de Betulia. Esta zona abarca grandes extensiones rurales y el casco urbano, compuesto por diferentes carreras y calles. El punto de partida se encuentra a pocos metros antes de la entrada al municipio, desde donde se inicia hacia el sur por la carrera 11, luego se realiza una vuelta en U con la carrera 12 y se continúa por la calle #4 hasta regresar por la misma ruta hacia la principal. Desde allí, se toma la carrera 12 en dirección norte, repitiendo este proceso hasta llegar al punto final, completando un recorrido total de 8.05 km según la longitud registrada en Google Earth (2022). Se adjunta el recorrido completo en el (*Anexo III*).

**Ilustración 22**  
*Ruta óptima para MRI*



*Nota: Vista Satelital por medio de Google Earth (5-1-22)*

Una vez completado el recorrido de la ruta óptima para este primer ejercicio, se observa que el vehículo recorrerá cada una de las esquinas representadas como nodos. Sin embargo, es evidente que no es factible recorrer todas las calles en su totalidad. Por lo tanto, se propone realizar la recolección a pie en lugares específicos de acopio, acordados con el sector afectado, para ampliar la cobertura del servicio. Se recomienda ubicar estos centros de acopio de manera céntrica para facilitar tanto el acopio como la recolección de los residuos.

Con respecto a la posibilidad de cubrir mayores áreas para la recolección de los residuos sólidos urbanos (RSU) con relación a la ruta óptima arrojada por Python, es preferible realizar algunas modificaciones en relación con el seguimiento del grafo y los arcos que estos forman, por lo que deseamos que cubran en gran medida ciertas calles que la programación de la ruta vehicular deja por fuera del recorrido óptimo, como se puede detallar en los nodos 37, 34 y 33. (Ver *Ilustración IX. Nodos Ruta MRI*).

### Ilustración 23

#### Valoración de Ruta óptima para MRI



*Nota: Vista atlas por medio de Google maps (5-1-22)*

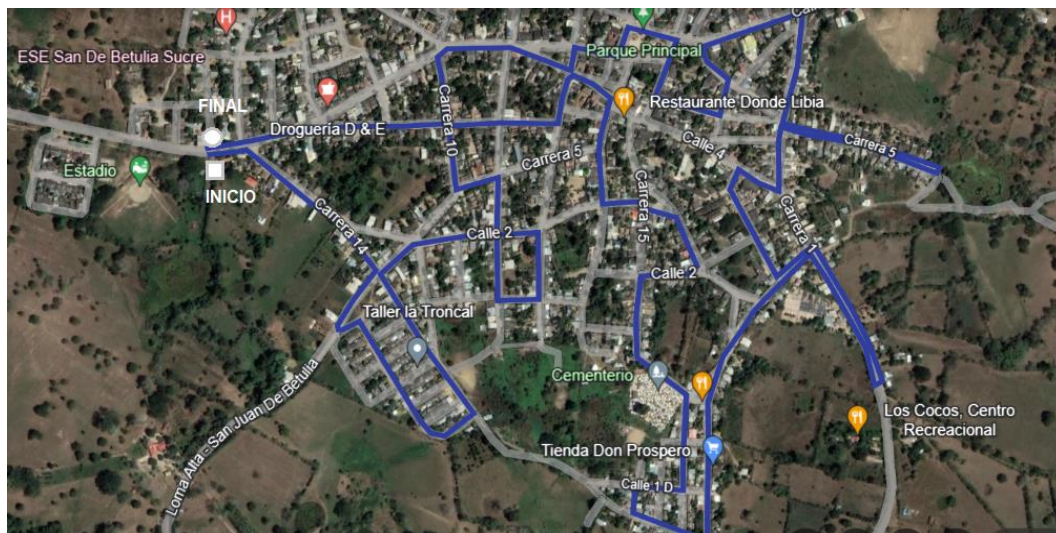
En este contexto, es importante recalcar que el modelo propuesto representa un recorrido de trazado lineal que, si bien sugiere una menor longitud, podría no abordar de manera óptima ciertas vías cruciales para la recolecta eficiente de residuos sólidos urbanos. Específicamente, es necesario considerar la inclusión de las carreras 2, 2A, 3A y 4A, las cuales conectan entre sí con las calles #5 y #7. Del mismo modo, se debe garantizar la secuencia lógica de los nodos 39 y 51 para abordar de manera efectiva la carrera 3 y 3A, ya que linealmente no están representadas como arcos dentro del grafo de la ruta óptima.

#### ***Ruta Óptima - MR2 #181196***

En cuanto a la segunda ruta vehicular propuesta, su inicio se ubica en la carrera 14, hacia la zona sur del municipio. Desde allí, se procede a abordar la carrera 10A, realizando un giro en U para dirigirse hacia la calle #2, lo que representa un tramo de 0,89 km del recorrido total. Continuando por la calle #2 hacia el este, se realiza nuevamente un giro en U por la carrera 6 hacia el sur, pasando por la calle #1L hasta alcanzar la carrera 8 hacia el norte. Luego, se dobla a la derecha para tomar la carrera 5 y subir hacia el norte por la carrera 10, seguido de tomar la

calle #5 hacia el este, completando así la totalidad del recorrido de 6.11 km y regresando al punto de partida inicial (*Anexo III*).

**Ilustración 24**  
*Ruta óptima para MR2*



*Nota: Vista Satelital por medio de Google Earth (5-1-22)*

De manera similar a la primera ruta, en la segunda ruta también se observa que no es factible cubrir la totalidad de las calles del municipio. Sin embargo, se logra cumplimiento del cometido principal de recortar la distancia de tour, asegurando que la ruta pase por cada uno de los nodos propuestos, que representan las esquinas por donde el sistema de recolecta de residuos sólidos debe transitar. A pesar de ello, se reconoce la necesidad de realizar ajustes adicionales para que el modelo se ajuste plenamente al sistema geográfico del municipio, especialmente en aquellas áreas a las que se pretende que el sistema tenga acceso.

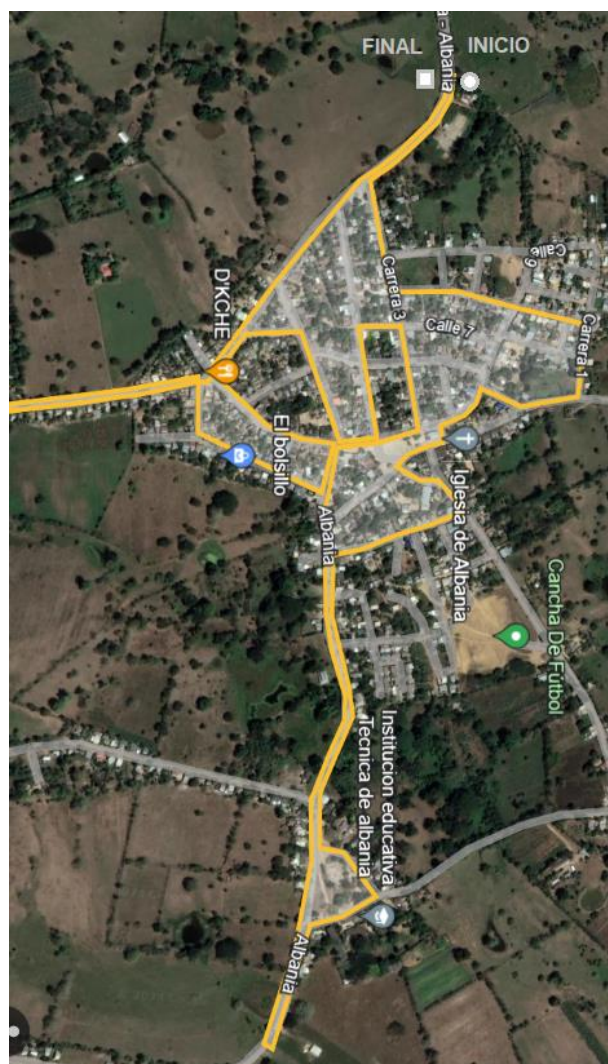
**Ilustración 25***Ruta óptima Python para MR2**Nota: Vista Satelital por medio de Google Earth (5-1-22)***Ilustración 26***Ruta óptima modificada para MR2**Nota: Vista Satelital por medio de Google Earth (5-1-22)*

En este escenario, se presenta un recorrido óptimo que requiere ajustes para mejorar la cobertura del servicio. Para ello, nos centramos en los dos últimos nodos propuestos por el algoritmo Python. Si bien la ruta óptima busca el camino más corto, es necesario modificar este recorrido para abarcar otras áreas que requieren mayor atención. Dado que la primera ruta ya cubre una parte significativa del trayecto, se evalúa reemplazar ciertas secciones. En lugar de seguir por la vía principal Corozal - San Juan de Betulia, se opta por tomar la carrera 10 hacia el sur y luego girar hacia el oeste por la calle #6, buscando así conectar con el punto final de la ruta. Este ajuste permitirá una mejor distribución del servicio de recogida en áreas previamente desatendidas.

## Ruta Óptima - MR3 #181197

### Ilustración 27

Ruta óptima modificada para MR3



*Nota: vista Satelital por medio de Google Earth (5-1-22)*

Para esta tercera ruta, nos trasladamos a la troncal que une el municipio de San Juan de Betulia con el corregimiento vecino de Albania, ubicado a aproximadamente 3.25 km de distancia. El recorrido inicia tomando la carrera 3 hacia el sur del corregimiento, luego gira hacia el este en dirección a la calle 8 para conectar con la carrera 1. Posteriormente, se dirige hacia el sur rumbo a la iglesia central de Albania, siguiendo luego hacia el oeste por la calle 3A hasta alcanzar la vía principal que pasa entre la cancha de microfútbol de Albania y la institución

educativa técnica. Desde allí, retorna hacia el punto de partida tomando la vía hacia el norte, conectando con la calle #9 hacia el este, y desviándose por la carrera 3 para girar en U entre la calle #7 al oeste y la carrera 4 hacia el sur. Finalmente, retoma la carrera 5 hacia el norte para completar el recorrido hasta llegar al punto de inicio. Este trayecto abarca importantes puntos de interés en Albania y garantiza una cobertura efectiva en dicha área (*Anexo III*).

Es importante destacar que, en contraste con las otras rutas evaluadas, la tercera ruta no requirió ajustes significativos después de la validación en campo. Este hecho se debe a que, tras un seguimiento detallado y una exhaustiva validación, se pudo constatar que el recorrido propuesto era viable en su totalidad y no necesitaba modificaciones sustanciales. Aunque, al igual que en las rutas anteriores, es importante reconocer que la complejidad del entorno hace imposible abarcar todas las calles en el recorrido. Sin embargo, la tercera ruta logra cubrir de manera efectiva áreas estratégicas y puntos de interés en el corregimiento de Albania, garantizando así una adecuada cobertura del servicio de recogida de residuos sólidos urbanos en esta zona.

### **Valoración por Instancias Aleatorias**

Las instancias aleatorias son una herramienta fundamental en la investigación operativa y en la evaluación de algoritmos, ya que se emplea para probar y validar la eficacia de algoritmos en una variedad de situaciones simuladas representando escenarios realistas pero generados de manera aleatoria, por lo que este enfoque permite realizar pruebas exhaustivas y generalizadas de los algoritmos bajo diferentes condiciones, ayudando a entender mejor su comportamiento y desempeño en situaciones reales. Además, posibilitan la evaluación de dos elementos fundamentales en una solución, como lo es la calidad de la solución misma y el tiempo de procesamiento computacional requerido.

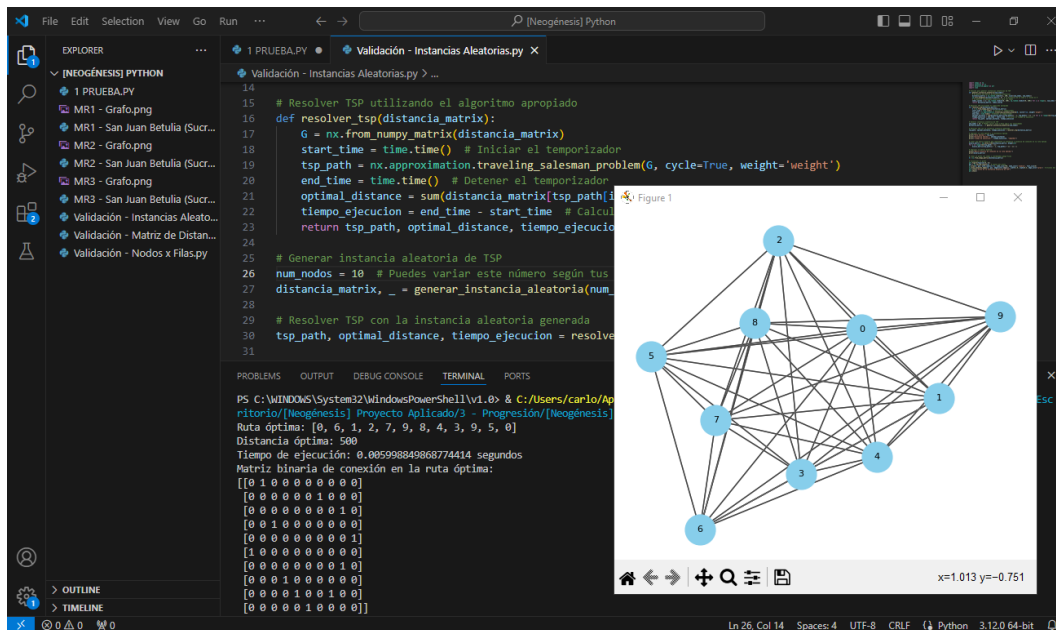
Las instancias aleatorias tienen sus raíces en los primeros días de la investigación operativa, cuando los investigadores buscaban métodos para probar y comparar soluciones a problemas complejos. Un ejemplo notable es el trabajo pionero de George Dantzig en la década de 1940, donde implementó el método simplex para dar solvencia a problemas de programación lineal (Dantzig, 1990), siendo uno de los primeros en utilizar instancias aleatorias como una herramienta para evaluar la eficacia de su método y validar sus resultados. Desde entonces, las instancias aleatorias se han transformado en una herramienta presente en la investigación operativa y en campos relacionados como la optimización combinatoria y la actual inteligencia artificial, aplicándose en una amplia gama de problemas, desde el enrutamiento de vehículos y el diseño de redes hasta la organización de la producción y la logística.

De acuerdo con Keshavarz et al., (2015), quien afirma que “*para evaluar la eficacia del algoritmo propuesto, se generan aleatoriamente instancias del problema y se resuelven mediante el algoritmo propuesto*”, se tiene que en el escenario concreto del diseño de rutas de recogida de residuo sólidos urbanos en el municipio de San Juan de Betulia a través del Problema del Agente Viajero (TSP) y la Heurística del Vecino Más Cercano, las instancias aleatorias se utilizan para generar conjuntos de datos de prueba con diferentes números de nodos y distancias entre ellos. Estas instancias permiten evaluar y comparar la eficacia de los algoritmos de resolución del TSP en condiciones variadas y controladas.

De manera que, se ha conservado la esencia de la solución original al implementar en código Python, aprovechando las capacidades de las bibliotecas Numpy, NetworkX y Matplotlib (*Anexo IV*).

## Ilustración 28

### Valoración por Instancias Aleatorias



Fuente: Elaboración propia por medio del programa Python y librerías específicas

Se estableció la función encargada de crear una instancia aleatoria del problema con un número específico de nodos en un rango de 10 a 50, generando primeramente una matriz de distancias aleatorias entre los nodos, a través de Numpy, donde la distancia de cada nodo a sí mismo se establece en cero, y luego, se originan coordenadas aleatorias para cada nodo en un plano bidimensional. Seguidamente, la función **resolver\_tsp**, al igual que en el código de solución, toma la matriz de distancias y utiliza el algoritmo de aproximación de NetworkX para encontrar la ruta del TSP. Además, se crea una matriz binaria que representa las conexiones en la ruta óptima, donde cada entrada indica si hay una conexión entre dos nodos consecutivos en la ruta. Y finalmente, se visualiza el grafo de la instancia aleatoria del TSP utilizando NetworkX y Matplotlib, mostrando los nodos como puntos azules y las aristas como líneas grises.

De esta forma, para evaluar la eficacia y robustez de la solución propuesta, se generaron instancias aleatorias del problema que se resolvieron utilizando el algoritmo implementado en

Python, registrando algunos de los resultados obtenidos como muestra de ejemplo en la siguiente tabulación, donde  $n$  representa los nodos por instancias junto a los tiempos de solución computacional y distancia óptima obtenida.

**Tabla 9**

*Resultados de pruebas con diferentes nodos en Ins. Aleatorias*

$n = 10$			$n = 20$		
Inst.	Tiempo (Seg)	Distancia (Mts)	Inst.	Tiempo (Seg)	Distancia (Mts)
1	0.019773245	573	1	0.015184641	1776
2	0.015781164	697	2	0.010050774	1375
3	0.007467031	543	3	0.015812397	1356
4	0.01568532	636	4	0.025773048	1302
5	0.0	588	5	0.015658379	1554
Prom.	0.011741352	607.4	Prom.	0.016495848	1472.6
$n = 30$			$n = 40$		
Inst.	Tiempo (Seg)	Distancia (Mts)	Inst.	Tiempo (Seg)	Distancia (Mts)
1	0.051577806	2168	1	0.087508917	2858
2	0.051480532	2351	2	0.10303688	2873
3	0.054261208	2124	3	0.10879755	2668
4	0.035715818	2099	4	0.113345623	2801
5	0.045972586	2060	5	0.081913948	3258
Prom.	0.04780159	2160.4	Prom.	0.098920584	2891.6

$n = 50$

---

Inst.	Tiempo (Seg)	Distancia (Mts)
1	0.150713205	3429
2	0.16445446	3946
3	0.154029846	3463
4	0.179444075	3478
5	0.164913654	3104
Prom.	0.162711048	3484

---

*Fuente: Elaboración propia por medio del programa Python y librerías específicas*

Los resultados de las pruebas con diferentes números de nodos en las instancias aleatorias demuestran algunas tendencias y conclusiones importantes.

Se puede notar que, en general, el tiempo de solución aumenta a razón que incrementa el número de nodos en la instancia del problema. Esto era de esperarse, ya que resolver el problema del Agente Viajero implica evaluar todas las variadas combinaciones de rutas para encontrar la óptima, lo cual resulta más complicado a razón que incrementa el tamaño del problema. Sin embargo, se observa que el algoritmo implementado en Python logra resolver instancias incluso con 50 nodos en tiempos razonables, lo que sugiere una buena eficiencia del algoritmo.

La distancia óptima obtenida en las diferentes instancias varía, lo cual es previsto debido a la naturaleza aleatoria de las instancias generadas. Sin embargo, se puede observar que, en promedio, al igual que el tiempo de solución, la distancia óptima tiende a aumentar ligeramente a medida que aumenta el número de nodos en la instancia del problema. Esto puede deberse a que,

con más nodos, hay más posibles combinaciones de rutas y, por lo tanto, una mayor variabilidad en la distancia óptima.

Es importante tener en cuenta que los valores de tiempo de solución y distancia óptima presentados son ejemplos y pueden variar en diferentes ejecuciones debido a la aleatoriedad en la generación de las instancias y las soluciones, como también se deben mencionar algunas características que permiten evaluar la capacidad del algoritmo para resolver eficientemente instancias de diferentes tamaños y complejidades, proporcionando una evaluación integral de su desempeño en una variedad de escenarios de aplicación del mundo real, tales como:

- El número de nodos, representando las ubicaciones que deben ser visitadas, varía desde 10 hasta 50.
- Las coordenadas geográficas de los nodos se generan aleatoriamente dentro de un rango de valores de latitud y longitud.
- Las distancias entre los nodos se calculan utilizando la fórmula de la distancia euclidiana.
- Se asignan pesos a las aristas del grafo, que representan las distancias entre los nodos, utilizando valores aleatorios dentro de un rango específico.
- La cantidad total de nodos y las características de las distancias se controlan mediante parámetros, como el tamaño del problema y la dispersión de las ubicaciones.
- Se generan múltiples instancias con diferentes configuraciones de parámetros para cubrir una variedad de escenarios y tamaños de problema.
- Todas las instancias se resuelven utilizando el algoritmo propuesto, y se registran los tiempos de ejecución y la calidad de las soluciones obtenidas.

La validación mediante instancias aleatorias representa poder obtener una amplia variedad de casos de prueba que reflejan situaciones del mundo real de manera más precisa. Esta

diversidad de instancias permite una evaluación de la versatilidad y utilidad de los algoritmos, ayudando así a identificar sus fortalezas y limitaciones en diferentes escenarios.

Basándonos en las instancias aleatorias generadas y los resultados obtenidos, podemos concluir que el modelo y la técnica de solución utilizada son válidos para abordar el problema del Agente Viajero (TSP). La generación de múltiples instancias aleatorias para diferentes tamaños de nodos nos permitió evaluar el desempeño del algoritmo en una variedad de casos. Además, el tiempo promedio de ejecución y la distancia óptima promedio obtenidos proporcionan una medida objetiva del rendimiento del algoritmo en términos de eficiencia y calidad de la solución.

Los resultados arrojados demuestran que el algoritmo puede alcanzar soluciones óptimas o cercanas a óptimas en un tiempo razonable para diferentes tamaños de instancias. Esto sugiere que el modelo y la técnica de solución utilizada son efectivos y pueden aplicarse con éxito para resolver instancias del problema del Agente Viajero en entornos prácticos.

### **Comparación de Indicadores de Ruta Actuales y Propuestas**

La eficiencia en la distribución de rutas es un factor crucial para el éxito de las operaciones logísticas, especialmente en sectores como la distribución o recolección de mercancías y la prestación de servicios.

En este contexto, la confrontación de indicadores entre las rutas actuales y las propuestas emerge como una herramienta esencial para evaluar el rendimiento y la viabilidad de las soluciones propuestas, centrándose en indicadores clave como la distancia recorrida, que proporciona una visión integral de la eficiencia operativa a través del análisis detallado de los resultados obtenidos y como recomendaciones fundamentadas para optimizar el rendimiento y la

efectividad de las operaciones en pro de la calidad del servicio y la posible reducción de los costos asociados.

**Tabla 10**  
*Km Actuales vs Km Propuestos*

<b>Ruta</b>	<b>Días por semana</b>	<b>Km recorridos (Actual)</b>	<b>Km recorridos (Propuesto)</b>	<b>Mejora (%)</b>
MR1	Lunes	9.02 km	8.006 km	11.24%
#181195	Miércoles			
	Viernes			
MR2	Martes	7.66 km	6.124 km	20.05%
#181196	Jueves			
	Sábados			
MR3	Martes	4.46 km	5.057 km	-13.38%
#181197	Jueves			
	Sábados			
<b>Totales</b>		21.14 km	19.187 km	9,23%

*Fuente: Elaboración propia*

La tabla anterior proporciona una visión de las reducciones en km recorridos de las rutas de recolección propuestas en comparación con las rutas actuales. Para calcular el porcentaje de mejora en cada ruta, utilizamos la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\text{Km recorridos actuales} - \text{Km recorridos propuestos}}{\text{Km recorridos actuales}} \right) \times 100\%$$

El análisis de las rutas de recolección revela mejoras sustanciales con respecto a las rutas actuales, reflejando una optimización significativa en las distancias recorridas. La MR1

experimenta una reducción del 11.24%, disminuyendo de 9.02 km a 8.006 km, mientras que la MR2 muestra una mejora del 20.05%, reduciendo la distancia de 7.66 km a 6.124 km. En contraste, la MR3 refleja un ligero incremento del 13.38%, pasando de 4.46 km a 5.057 km en la ruta propuesta. Sin embargo, al considerar la suma total de los kilómetros recorridos, tanto en las rutas actuales como propuestas, se destaca que los kilómetros reducidos en las rutas MR1 y MR2 compensan el aumento en la MR3. La suma total de kilómetros recorridos actualmente es de 21.14 km, mientras que con las rutas propuestas se reduce a 19.187 km, lo que representa una diferencia de 1.953 km y una mejora total del 9.23% en la eficiencia del recorrido. Este análisis subraya el impacto positivo de las nuevas rutas propuestas en la eficiencia del recorrido en comparación con las rutas existentes.

En resumen, la comparación de indicadores entre las rutas vigentes y las propuestas proporciona una visión crítica sobre el desempeño de las operaciones logísticas que, no solo ofrece una comprensión profunda de la eficiencia operativa, sino que también sirve como guía para la toma de decisiones en la optimización de las rutas de distribución, al centrarse en factores clave como la distancia recorrida, donde se pueden identificar áreas de mejora que conduzcan a una mayor eficiencia, calidad del servicio y posiblemente a la reducción de costos. Es a través de este análisis minucioso que las empresas pueden perfeccionar sus operaciones logísticas y mantenerse competitivas en un entorno en constante evolución.

## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

Basándonos en el análisis detallado realizado durante esta investigación sobre la optimización de las rutas de recolección de residuos sólidos en San Juan de Betulia, Sucre, Colombia, podemos concluir que se han alcanzado avances relevantes en la identificación y abordaje de los desafíos asociados con la gestión de residuos a nivel local. Al enfrentar la complejidad de este problema, hemos evidenciado la importancia de adoptar enfoques metodológicos sólidos, como la investigación de operaciones, para diseñar soluciones eficientes y sostenibles.

La caracterización exhaustiva de la condición actual de recolección de residuos, respaldada por datos recopilados de fuentes primarias y secundarias, incluida la empresa ServiAseo S.A., responsable del Programa para la Prestación del Servicio Público de Aseo (PPSPA), permitió acceder a datos esenciales, como las frecuencias del servicio, los horarios, las distancias recorridas por las rutas de recogida de basuras, así como las políticas y demandas presentes en el sistema actual de recolección, enmarcado en las normativas definidas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en la Resolución 288 del 27 de abril de 2015, por lo cual, ha servido como base fundamental para el posterior análisis y formulación de soluciones, proporcionando una base sólida para la resolución de un modelo matemático sostenido en el Problema del Agente Viajero (TSP). Este enfoque nos ha permitido no solo comprender mejor la dinámica de recolecta de residuos en el municipio, sino también proponer mejoras significativas en la eficiencia de las rutas existentes. Por otro lado, dicho modelo matemático ha sido utilizado para minimizar la distancia de recorrido, considerando las restricciones inherentes a las rutas establecidas. Para su desarrollo, se emplearon nodos estratégicamente definidos con base en las

rutas actuales y la información recopilada en la fase anterior. La ubicación geográfica de estos nodos se ejecutó mediante el software especializado como QGIS, que permitió su georreferenciación y la definición de las trayectorias de las rutas de recolección. Dada la complejidad territorial y extensión del municipio, fue necesario recurrir a métodos de aproximación, técnicas heurísticas, como el algoritmo del vecino más cercano, con el cual hemos podido generar soluciones que, si bien pueden no ser óptimas en términos absolutos, representan una mejora sustancial con respecto a las rutas de recolección actuales. Estas soluciones han demostrado ser viables desde una perspectiva práctica, ofreciendo resultados representativos en un tiempo computacional razonable, lo que es crucial dada la complejidad del problema y la necesidad de hallar soluciones factibles en entornos con medios limitados.

La implementación de las nuevas rutas propuestas ha permitido una optimización significativa en el recorrido total, evidenciada por la reducción global de 1.953 kilómetros en las rutas sugeridas en comparación con las rutas actuales, siendo un indicador claro de una mejora en la eficiencia del sistema de transporte. Aunque en un caso específico, como la MR3, pueda observarse un ligero aumento en la distancia propuesta, este incremento se ve compensado por las mejoras en eficiencia en otras rutas. Esta reducción en la suma total de los kilómetros recorridos sugiere una optimización general en el uso de recursos y tiempo necesarios para completar los recorridos, lo que conlleva a una operación más eficiente y posiblemente ahorros significativos en costos operativos como transporte y combustible. Además, es importante considerar que la eficiencia no se limita únicamente a la distancia recorrida, sino que también puede estar influenciada por otros factores como la congestión del tráfico, la seguridad vial y los tiempos de recogida. En este sentido, la selección de la ruta propuesta como la opción más eficiente se justifica no solo por la reducción de kilómetros, sino también por el potencial de

beneficios adicionales que contribuyen al mejoramiento integral en la eficiencia del sistema de transporte.

También, la validación por instancias aleatorias ha demostrado ser una herramienta fundamental para verificar la eficacia del modelo en una variedad de escenarios simulados, representativos de situaciones del mundo real a través de la generación de conjuntos de datos de prueba con diferentes números de nodos y distancias entre ellos, de manera que, hemos podido evaluar y comparar la eficacia del algoritmo de resolución del Problema del Agente Viajero (TSP) en condiciones variadas y controladas, donde los resultados obtenidos en estas pruebas han confirmado la capacidad de nuestro modelo para generar soluciones óptimas y eficientes en una amplia gama de situaciones. Por otro lado, la validación en campo ha permitido contrastar los resultados teóricos de nuestro modelo con la realidad operativa, proporcionando una validación práctica y pragmática de su efectividad, al implementar las soluciones propuestas en las situaciones reales de recolección de residuos en San Juan de Betulia, verificando la precisión y confiabilidad del modelo en los entornos operativos reales. Esta validación en campo no solo ha confirmado la efectividad de nuestras soluciones, sino que también nos ha permitido identificar áreas de mejora y optimización continua.

En pocas palabras, este estudio representa un paso adelante en la búsqueda de soluciones innovadoras y efectivas para enfrentar los desafíos asociados con la gestión de residuos sólidos a nivel local, y sirvan como bases para futuras investigaciones y mejoras en este campo crítico para el bienestar de nuestras comunidades.

### **Recomendaciones**

Al considerar las implicaciones y lecciones aprendidas de nuestra investigación sobre la optimización de las rutas de recolección de residuos sólidos en San Juan de Betulia, Sucre,

Colombia, es crucial destacar la importancia de implementar recomendaciones prácticas y estratégicas para establecer la sostenibilidad y eficacia a largo plazo del sistema de gestión de residuos. En este sentido, se proponen diversas recomendaciones destinadas a fortalecer aún más las mejoras alcanzadas, abordando aspectos clave como la recopilación de datos, la adopción de tecnologías emergentes, la promoción de prácticas sostenibles y la colaboración interinstitucional. Estas recomendaciones no solo ofrecen una guía para consolidar los avances logrados, sino que también apuntan a una gestión más integral y eficiente de los residuos sólidos, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y el bienestar de la comunidad.

Es fundamental seguir recopilando datos actualizados sobre la recolección de residuos, incluyendo información detallada sobre las frecuencias del servicio, horarios, distancias recorridas y políticas de recolección. Esto permitirá mantener actualizados los modelos y optimizar aún más las rutas en el futuro.

La incorporación de tecnologías emergentes, como sensores de seguimiento de vehículos y sistemas de gestión de flotas, podría mejorar la eficiencia operativa y proporcionar datos en tiempo real para una toma de decisiones más informada.

Se deben considerar prácticas sostenibles en la gestión de residuos, como la promoción del reciclaje y la reducción de residuos en la fuente. Esto no solo contribuirá a la conservación del medio ambiente, sino que también puede reducir la carga en las rutas de recolección.

Es importante capacitar al personal encargado de la recolección de residuos sobre las nuevas rutas y procedimientos optimizados. Esto garantizará una implementación efectiva y una transición sin problemas hacia las nuevas prácticas.

Se debe establecer un sistema de monitoreo y evaluación continua para verificar la efectividad de las nuevas rutas y realizar ajustes según sea necesario. Esto garantizará que las

mejoras se mantengan a lo largo del tiempo y se adapten a cualquier cambio en las condiciones operativas.

Fomentar la colaboración entre entidades gubernamentales, empresas privadas y la comunidad local para abordar de manera integral los desafíos de la gestión de residuos. La coordinación y el trabajo en equipo son clave para el éxito a largo plazo en este ámbito.

Considerar la posibilidad de realizar recorridos a pie en determinadas cuadras, especialmente en áreas donde el acceso vehicular es limitado o difícil. Al ingresar a pie a ciertas cuadras, se podría garantizar una mayor cobertura del servicio y una recolección más efectiva de los desechos.

En resumen, la implementación de las recomendaciones derivadas de nuestra investigación no sólo consolida los logros alcanzados en la optimización de las rutas de recolección de residuos sólidos en San Juan de Betulía, Sucre, Colombia, sino que también establece un punto de partida estratégico para futuras intervenciones en la gestión de residuos. Al aplicar estas recomendaciones, no solo mejoraremos la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental de nuestro sistema de gestión de residuos, sino que también sentaremos las bases para el desarrollo de prácticas más avanzadas y adaptativas en este campo crucial. Este enfoque proactivo no solo beneficiará directamente a nuestra comunidad, sino que también contribuirá al avance global en la gestión de residuos y la promoción de un entorno más saludable y sostenible para las generaciones futuras.

## Referencias Bibliográficas

Alf. (2022). *La librería Numpy*. <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/numpy/>

Alfaro, L. (2020). *CICLO HAMILTONIANO ÓPTIMO EN UN GRAFO (PROBLEMA DEL VIAJANTE)*.

Alvarez Porras, D. A. (2014). *Diseño óptimo de rutas para una empresa que brinda servicios de paquetería, mensajería y logística*.

Amat Rodrigo, J., & Carazo Melo, F. (2023). *Análisis de redes con Python y NetworkX*.

<https://cienciadedatos.net/documentos/pygml03-analisis-redes-python-networkx>

André García, F. J., & Cerdá Tena, E. (2006). Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económico y políticas públicas. *Cuadernos Económicos de ICE, ISSN 0210-2633, N° 71, 2006 (Ejemplar Dedicado a: Diseño y Evaluación de Políticas de Protección Ambiental)*, Págs. 71-91, 71, 71–91.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2249708&info=resumen&idioma=SPA>

Arias Hernández, C. P. (2015). *Análisis e implementación del algoritmo genético de Chu-Beasley para resolver el problema del agente viajero (TSP) y su variante, el problema de rutas de vehículo (VRP)*. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira.

<https://hdl.handle.net/11059/5384>

Asís López, E. H. (2010). Estudio comparativo de algoritmos exactos para la solución del problema del agente viajero. *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*.

<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1140>

- Assad, A. A., & Golden, B. L. (1995). Chapter 5 Arc routing methods and applications. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 8(C), 375–483.  
[https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80109-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80109-4)
- Ayala Rodríguez, A., & Gonzáles Butrón, E. (2001). Asignación De Rutas De Vehículos Para Un Sistema De Recolección De Residuos Sólidos En La Acera. *Revista de Ingeniería* 48, 0(13), 5–11. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i13.541>
- Barradas Rebolledo, A. (2009). *Gestión integral de residuos sólidos municipales: estado del arte*.
- Bartra Gómez, J., & Delgado Bardales, J. M. (2020). Gestión de Residuos Sólidos Urbanos y su Impacto Medioambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4(2), 993–1008. [https://doi.org/10.37811/CL\\_RCM.V4I2.135](https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V4I2.135)
- BBC News Mundo. (2019). “Crisis mundial de la basura”: 3 cifras impactantes sobre el rol de Estados Unidos - BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48914734>
- Bel, G. (2006). GASTO MUNICIPAL POR EL SERVICIO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS. *Revista de Economía Aplicada Número*, 41, 32.  
<http://www.ine.es/inebase/cgi/axi>
- Betanzo-Quezada, E., Torres-Gurrola, M. Á., Romero-Navarrete, J. A., Obregón-Biosca, S. A., Betanzo-Quezada, E., Torres-Gurrola, M. Á., Romero-Navarrete, J. A., & Obregón-Biosca, S. A. (2016). Evaluación de rutas de recolección de residuos sólidos urbanos con apoyo de dispositivos de rastreo satelital: análisis e implicaciones. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 323–337. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.07>
- Braier, G., Durán, G., Marengo, J., & Wesner, F. (2015). *Una aplicación del problema del cartero rural a la recolección de residuos reciclables en Argentina*.

- Cardozo, O. D., Gómez, E. L., & Parras, M. A. (2009). Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio*, 1, 89–111.  
<https://doi.org/10.34096/RTT.I1.223>
- Carrasco Peña, E., & Díaz Toro, G. Y. M. (2017). Optimización de las rutas recolectoras de residuos sólidos en el distrito de Chiclayo, para mejorar la eficiencia del servicio de limpieza. Chiclayo-2017. *Repositorio Institucional - USS*.  
<http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/4234>
- Castillo Ferrari, E. N. (2017). *Ruteo de vehículos recolectores de basura*.  
<https://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/21922>
- Cointreau, S. J. (1982). *Environmental management of urban solid wastes in developing countries: A project guide*.
- Colomina, A. F. (2005). *LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE LOCAL. 3*.
- Colomi, A., Dorigo, M., & Maniezzo, V. (1991). *Distributed Optimization by Ant Colonies*.
- Combariza, G. (2003). *Una introducción a la teoría de Grafos*.
- CONPES. (2016). *POLÍTICA NACIONAL PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS*.
- Contreras Juárez, A., García Miguel, M., González Vásquez, A. K., & Hernández López, W. (2021). Aplicación de la técnica del vecino más cercano para la solución del problema del agente viajero y minimizar los costos de operación. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 8(16), 9–16.  
<https://doi.org/10.29057/ESCS.V8I16.7054>

Cook, W. J., Applegate, D. L., Bixby, R. E., & Chvátal, V. (2011). *The Traveling Salesman Problem*. <https://doi.org/10.1515/9781400841103>

Corberán, A., Mejía, G., & Sanchis, J. M. (2005). New Results on the Mixed General Routing Problem. *Https://Doi.Org/10.1287/Opre.1040.0168*, 53(2), 363–376.  
<https://doi.org/10.1287/OPRE.1040.0168>

Cormen, T., Leiserson, C., Rivest, R., & Stein, C. (2022). *Introduction to Algorithms, fourth edition - Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein - Google Libros*.  
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RSMuEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=+Introduction+to+Algorithms,+chapter+11.+&ots=a3g9YU4FUH&sig=spziXWD8JVMSySLF40s9SJE2APQ#v=onepage&q=Introduction%20to%20Algorithms%2C%20chapter%2011.&f=false>

Cortéz, A. (2004a). *TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL Y TEORÍA DE LA COMPUTABILIDAD*.

Cortéz, A. (2004b). *TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL Y TEORÍA DE LA COMPUTABILIDAD*.

Crehuet Lucas, I. (2022). *El problema del viajante con grafos*.  
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/57985>

DANE. (2023). *DANE - Proyecciones de población*.  
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Dantzig, G. (1990). *Origins of the Simplex Method*.

- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954a). Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Https://Doi.Org/10.1287/Opre.2.4.393*, 2(4), 393–410.  
<https://doi.org/10.1287/OPRE.2.4.393>
- Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954b). Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Https://Doi.Org/10.1287/Opre.2.4.393*, 2(4), 393–410.  
<https://doi.org/10.1287/OPRE.2.4.393>
- Davendra, D. (2010). *Decision modelling for health economic evaluation*. 237.
- Decreto 1077 de 2015. (2015). *Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio - Gestor Normativo - Función Pública*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Derigs, U., Pullmann, M., Vogel, U., Oberscheider, M., Gronalt, M., & Hirsch, P. (2012). Multilevel neighborhood search for solving full truckload routing problems arising in timber transportation. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 281–288.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENDM.2012.10.037>
- Dror, M. (2000). *Arc Routing: Theory, Solutions and Applications*.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LQXTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=Dror,+M.+\(2000\).+Arc+Routing.+Theory,+Solutions+and+Applications.+Kluwer+Academic+Publishers.&ots=CGU6grOKx5&sig=VwpGFUcpkIILnO8dG8kkg-ILyjI#v=onepage&q=Dror%2C%20M.%20\(2000\).%20Arc%20Routing.%20Theory%2C%20Solutions%20and%20Applications.%20Kluwer%20Academic%20Publishers.&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LQXTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=Dror,+M.+(2000).+Arc+Routing.+Theory,+Solutions+and+Applications.+Kluwer+Academic+Publishers.&ots=CGU6grOKx5&sig=VwpGFUcpkIILnO8dG8kkg-ILyjI#v=onepage&q=Dror%2C%20M.%20(2000).%20Arc%20Routing.%20Theory%2C%20Solutions%20and%20Applications.%20Kluwer%20Academic%20Publishers.&f=false)
- Duarte Muñoz, A., Pantrigo Fernández, J. J., & Gallego Carrillo, M. (2007). *Metaheurísticas*.  
<https://books.google.com/books/about/Metaheur%C3%ADsticas.html?hl=es&id=KHWqm14sf1cC>

- Escudero Andino, F. F. (2021). *Diseño de un modelo matemático para optimizar las rutas de recorrido del proceso de recolección de desechos sólidos para el cantón Valencia.*
- Espinal, A. A. C., Florez, J. M. C., & Lopez, J. C. S. (2011). Solución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad usando la teoría de grafos. *Avances En Sistemas e Informática*, 8(3), 27–32. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/avances/article/view/20064>
- Espinoza Flores, J., Hernández Silva, J. F., López Varela, C. G., & Ochoa Gallegos, J. R. (2015). *DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN.*
- Estayno, M. G., Dapozo, G. N., Cuenca Pletsch, L. R., & Greiner, C. L. (2009). *MODELOS Y MÉTRICAS PARA EVALUAR CALIDAD DE SOFTWARE.*
- European Environment Agency. (2018). *Generación de residuos - Agencia Europea de Medio Ambiente.* <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/waste-generation>
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/IJERPH16061060>
- Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2016). *Multiple Criteria Decision Analysis.* 233. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>
- Fuentes, C., Carpio, J., Prado, J., & Sánchez, P. (2008). *Gestión de residuos sólidos municipales.* <https://repositorio.esan.edu.pe//handle/20.500.12640/627>
- Fuentes Penna, A. (2014a). *Problema del agente viajero.* <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n3/e5.html>

Fuentes Penna, A. (2014b). *Problema del agente viajero*.

<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n3/e5.html>

Garroppo, R. G., Giordano, S., & Tavanti, L. (2010). A survey on multi-constrained optimal path computation: Exact and approximate algorithms. *Computer Networks*, 54(17), 3081–3107.

<https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2010.05.017>

Glover, F., & Kochenberger, G. (2006). *Handbook of Metaheuristics*.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P-](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P-HpBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Glover,+F.+W.,+%26+Kochenberger,+G.+A.+(Eds.).+(2006).%C2%A0Handbook+of+metaheuristics%C2%A0(Vol.+57).+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=4npZ_30Moe&sig=5VvLqoa6oqb9iiWJlxBvkm-OhyI#v=onepage&q&f=false)

[HpBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Glover,+F.+W.,+%26+Kochenberger,+G.+A.+\(Eds.\).+\(2006\).%C2%A0Handbook+of+metaheuristics%C2%A0\(Vol.+57\).+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=4npZ\\_30Moe&sig=5VvLqoa6oqb9iiWJlxBvkm-](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P-HpBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Glover,+F.+W.,+%26+Kochenberger,+G.+A.+(Eds.).+(2006).%C2%A0Handbook+of+metaheuristics%C2%A0(Vol.+57).+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=4npZ_30Moe&sig=5VvLqoa6oqb9iiWJlxBvkm-OhyI#v=onepage&q&f=false)

[OhyI#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P-HpBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Glover,+F.+W.,+%26+Kochenberger,+G.+A.+(Eds.).+(2006).%C2%A0Handbook+of+metaheuristics%C2%A0(Vol.+57).+Springer+Science+%26+Business+Media.&ots=4npZ_30Moe&sig=5VvLqoa6oqb9iiWJlxBvkm-OhyI#v=onepage&q&f=false)

Golden, B. L., & Wong, R. T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11(3), 305–315. <https://doi.org/10.1002/NET.3230110308>

González Ariza, A. L. (2007). *Manual práctico de investigación de operaciones I 3a*.

[https://books.google.com/books/about/Manual\\_pr%C3%A1ctico\\_de\\_investigaci%C3%B3n\\_de\\_op.html?hl=es&id=fzRT8M13nzoC](https://books.google.com/books/about/Manual_pr%C3%A1ctico_de_investigaci%C3%B3n_de_op.html?hl=es&id=fzRT8M13nzoC)

González, J. A. G. (2016). Residuos sólidos: problema, conceptos básicos y algunas estrategias de solución. *Revista Gestión y Región*, 22, 101–119.

<https://revistas.ucp.edu.co/index.php/gestionyregion/article/view/149>

González Restrepo, D. A., & Gómez Veloza, D. Y. (2020). *Solución al problema de ruteo de vehículos con entregas y recogidas aplicando el algoritmo de pétalos y la heurística del vecino más cercano - hdl:11349/23505*.

<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/23505>

- González Velarde, J. L., & Ríos Mercado, R. Z. (1999). *Investigación de Operaciones en Acción: Aplicación del TSP en problemas de manufactura y logística*.
- Gracia, M., Mar-Ortiz, J., & Laureano-Casanova, O. (2015). *Análisis computacional de los problemas del vendedor viajero y patrones de corte*.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432015000100006](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000100006)
- Guidici E, Reinaldo., & Bris Lluch, Angeles. (1997). *Introduccion a la teoria de grafos*.  
[https://books.google.com/books/about/Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_teor%C3%ADa\\_de\\_grafos.html?hl=es&id=tgL-OgYxMqMC](https://books.google.com/books/about/Introducci%C3%B3n_a_la_teor%C3%ADa_de_grafos.html?hl=es&id=tgL-OgYxMqMC)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & del Pilar Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación, 5ta Ed.* www.FreeLibros.com
- Herrera Cayotopa, W., & Zuloeta Atalaya, J. A. (2019). *Análisis de sensibilidad con WinQsb en la optimización de problemas de programación lineal*.  
<http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3595>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*.
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management* (Issue 7). World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/17388>
- IBM. (2021). *¿Qué es CPLEX? - Documentación de IBM*.  
<https://www.ibm.com/docs/es/icos/12.10.0?topic=mc-what-is-cplex>
- Ircio Fernández, J. (2014). *Optimización Entera Mixta para problemas de generación de rutas de vehículos*. <http://addi.ehu.es/handle/10810/15223>
- Johnson, D. S., Mcgeoch, L. A., & Rothberg, E. E. (1996). *Asymptotic Experimental Analysis for the Held-Karp Traveling Salesman Bound*. 341–350.

- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Keshavarz, T., Savelsbergh, M., & Salmasi, N. (2015). A branch-and-bound algorithm for the single machine sequence-dependent group scheduling problem with earliness and tardiness penalties. *Applied Mathematical Modelling*, *39*(20), 6410–6424. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2015.01.069>
- Laporte, G. (1992). The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, *59*(2), 231–247. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90138-Y](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90138-Y)
- López, E., Salas, Ó., & Murillo, Á. (2014a). *EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO: UN ALGORITMO DETERMINÍSTICO USANDO BÚSQUEDA TABÚ THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM: A DETERMINISTIC ALGORITHM USING TABU SEARCH*. *21*(1), 127–144.
- López, E., Salas, Ó., & Murillo, Á. (2014b). *EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO: UN ALGORITMO DETERMINÍSTICO USANDO BÚSQUEDA TABÚ THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM: A DETERMINISTIC ALGORITHM USING TABU SEARCH*. *21*(1), 127–144.
- López Plazas, A. (2023). *La ruta de la basura: Greenpeace alerta sobre el problema de residuos en Bogotá*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/la-ruta-de-la-basura-greenpeace-alerta-sobre-el-problema-de-residuos-en-bogota-789014>
- Macdonald, M. (2017). *Guía de Planeación Estratégica para el Manejo de Residuos Sólidos de Pequeños Municipios en Colombia*.

- Malakahmad, A., Md Bakri, P., Md Mokhtar, M. R., & Khalil, N. (2014). Solid Waste Collection Routes Optimization via GIS Techniques in Ipoh City, Malaysia. *Procedia Engineering*, 77, 20–27. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2014.07.023>
- Maniezzo, V. (2004). *Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support*. <https://www.researchgate.net/publication/242321183>
- Manrique Ortega, F. A. (2020). Sistema de recojo de residuos sólidos domiciliarios y sus efectos ambientales y económicos en el distrito de Pocollay, 2020. *Universidad Privada de Tacna*. <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1660>
- MappingGIS. (2020). *Cómo descargar datos de OpenStreetMap con QGIS - MappingGIS*. <https://mappinggis.com/2020/02/como-descargar-datos-de-openstreetmap-con-qgis/>
- Márquez Pérez, J. N. (2010). *MACRO Y MICRO RUTEO DE RESIDUOS SÓLIDOS RESIDENCIALES*.
- Martínez, C. A. (2011). *Metaheurísticas híbridas aplicadas al problema de ruteo de arcos capacitados*. [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis\\_n4979\\_Martinez](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n4979_Martinez)
- Martínez Vargas, E. (2017a). *BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA “IMPLEMENTACIÓN PARALELA DE UN ALGORITMO GENÉTICO PARA RESOLVER EL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO.”*
- Martínez Vargas, E. (2017b). *Implementación paralela de un algoritmo genético para resolver el problema del agente viajero*. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/14020>
- Mason, A. J. (2013). SolverStudio: A New Tool for Better Optimisation and Simulation Modelling in Excel. *INFORMS Transactions on Education*, 14(1), 45–52. <https://doi.org/10.1287/ITED.2013.0112>

- Melo, A. B., Oliveira, A. M., De Souza, D. S., & Da Cunha, M. J. (2017). Optimization of Garbage Collection Using Genetic Algorithm. *Proceedings - 14th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, MASS 2017*, 672–677.  
<https://doi.org/10.1109/MASS.2017.57>
- Mendoza Casanova, J. J. (2017). *TRAVELING SALESMAN PROBLEM (TSP) Diseño de Algoritmos Heurísticos y Metaheurísticos eficientes para resolver el Problema del Agente Viajero*.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). *Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems\**.
- Minga Quezada, M. I., & Zhiminaycela León, Y. F. (2019). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL*.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *PROCEDIMIENTO - Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos*.
- Ministerio del Medio Ambiente. (1998). *Política para la Gestión Integral de Residuos*.
- Monsalvo Torres, J. P. (2021). *Un prototipo para programar rutas de recolección de desechos domésticos en ambientes urbanos*. Universidad de los Andes.  
<http://hdl.handle.net/1992/53056>
- Montealegre Barba, P. T. (2012). *Redes de autómatas y complejidad computacional*.
- Montes Cortés, C. (2018). *Estudio de los residuos sólidos en Colombia*.  
<https://bdigital.uexternado.edu.co/entities/publication/45d0ca31-23f4-4949-b16d-12320551b115>

Muñoz Rodríguez, J. E., & Montañez Márquez, K. A. (2023). *El problema del viajante desde algunos Algoritmos Metaheurísticos*.

<http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/19071>

Muro Chafloque, B., Sánchez Villalobos, B., del Rocío, M., & Vargas Sagástegui Joel David, M. (2019). *MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL RECOJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN EL DISTRITO DE JAYANCA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL SERVICIO - 2018*.

NetworkX, D. (2023). *asadpour\_atsp — NetworkX 3.2.1 documentation*.

[https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.approximation.traveling\\_salesman.asadpour\\_atsp.html](https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/generated/networkx.algorithms.approximation.traveling_salesman.asadpour_atsp.html)

NU. CEPAL. (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora* | CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47309-economia-circular-america-latina-caribe-oportunidad-recuperacion-transformadora>

Olivera, & Alfredo. (2014). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*.

<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/3508>

Orloff, C. S. (1974). A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4(1), 35–64.

<https://doi.org/10.1002/NET.3230040105>

Osman, I. H., & Kelly, J. P. (1997). Meta-Heuristics Theory and Applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(6), 657–657.

<https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.JORS.2600781>

Patiño Chirva, J. A., & Daza Cruz, Y. X. (2015). *Aplicación de Técnicas de Optimización para el Diseño de Rutas de Recolección Selectiva de Residuos Sólidos en Bogotá -*

*hdl:11349/3004*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3004>

- Paucara Pinares, D. (2019). Aplicación del problema del agente viajero a la recolección de residuos sólidos de la Municipalidad Distrital de San Jerónimo. *Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/4570>
- Pérez, M., & Díaz, F. (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. <https://rccd.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/426>
- Pérez Rave, J. I. (2011). *Heurística inspirada en el análisis sistémico del “Vecino más cercano”, para solucionar instancias simétricas TSP, empleando una base comparativa multicriterio*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8756>
- Pontia tech. (2023). *¿Qué Son Las Librerías De Python Y Cómo Funcionan Para El Análisis De Datos?* <https://www.pontia.tech/que-son-las-librerias-de-python/>
- Presidente de la República de Colombia. (2002). *Decreto 1713 de 2002 - Gestor Normativo - Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>
- Puentes Cervantes, R. (2012). *ALCALDIA MUNICIPAL “Un Betulia para Todos” PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL*.
- Pueyo Campos, Á. (1990). *CRITERIOS PARA LA GESTION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN LA ORDENACION DEL TERRITORIO*.
- Ramírez Rodríguez, L. E. (2016a). *Una Solución al Problema de Ruteo de Vehículos Abierto (Ovrp), Implementando la Heurística del Vecino más Cercano*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2985>

- Ramírez Rodríguez, L. E. (2016b). *Una Solución al Problema de Ruteo de Vehículos Abierto (Ovrp), Implementando la Heurística del Vecino más Cercano*. - hdl:11349/2985.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2985>
- Ramos González, J. L. (2015). *Rediseño de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos en el municipio de León, Guanajuato, México. Recorrido mínimo AG-TPS-google*.  
<https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/112>
- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2007). The open vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 58(3), 355–367.  
<https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.JORS.2602143>
- RESOLUCIÓN CRA 720 DE 2015. (2015). *RESOLUCIÓN CRA 720 DE 2015 - COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO*.  
[https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion\\_cra\\_0720\\_2015.htm](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_cra_0720_2015.htm)
- Rivas Arias, C. A. (2018). *PIENSA UN MINUTO ANTES DE ACTUAR: GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS*.
- Rivera Rodríguez, F. A. (2019). *Propuesta de rutas optimizadas para el recojo de residuos sólidos domiciliarios en el distrito de Jauja en el año 2018*.
- Robles Algarín, C. A. (2010). *Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias*.
- Rodríguez Herrera, H. (2012). *Gestión Integral de residuos Sólidos*.  
<https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/518>
- Romero Riaño, E., Martínez Toro, G. M., & Rico Bautista, D. (2018). *ÁRBOL DE CAMINOS MÍNIMOS: ENRUTAMIENTO, ALGORITMOS APROXIMADOS Y COMPLEJIDAD. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 1(31), 11–21.  
<https://doi.org/10.24054/RCTA.V1I31.123>

- Ruiz Liza, I. J., & Vidal Urdiales, W. M. (2016). Modelo de optimización del sistema de recojo de residuos sólidos en el distrito de Reque para mejorar la eficiencia de operaciones Chiclayo-2016. *Repositorio Institucional - USS*.  
<http://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/2314>
- Sánchez, D. E., & Gutiérrez, E. (2022). Aplicación de la p-mediana y ruteo de vehículos para la reducción de distancias en una empresa de servicio postal. *Información Tecnológica*, 33(1), 121–130. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000100121>
- Santiago Tumialán, J. P. (2023). TEORÍA DE INVENTARIOS APLICACIÓN DE LA TEORIA DE INVENTARIOS EN LA EMPRESA KJANTU COLLECTION S.A.C. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de La Información*, 10(20), 127–134.  
<https://doi.org/10.21017/RIMCI.2023.V10.N20.A147>
- SCHIMMER, M. (2020). *Optimising master routes leads to savings in waste collection | AMCS Group*. <https://www.amcsgroup.com/blogs/optimising-master-routes-leads-to-10-to-20-savings-in-waste-collection/>
- ServiAseo S.A. E.S.P. (2022a). *Contrato de Condiciones Uniformes San Juan de Betulia - Sucre*.
- ServiAseo S.A. E.S.P. (2022b). *PROGRAMA PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO PÚBLICO DE ASEO DE SAN JUAN DE BETULIA - SUCRE*.
- Silva Rodríguez, J., & Ramírez Gil, E. (2019). *Modelo de recolección de residuos sólidos basados en el Problema del Cartero Chino / Solid waste collection model based on the chinese postman problem*.
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K., & Bates, J. (2001). *Waste management options and climate change*. <http://europa.eu.int/comm/environment/pubs/home.htm>

- Taha, H. A. (2012). *HAMDY A. TAHA 40 Novena edición INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*. [www.pearsoneducacion.net](http://www.pearsoneducacion.net)
- Tchobanoglous, G., Theissen, H., & Eliassen, R. (1982). *DESECHOS SÓLIDOS PRINCIPIOS DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN*.
- Thimbleby, H. (2003). The directed Chinese Postman Problem. *Software: Practice and Experience*, 33(11), 1081–1096. <https://doi.org/10.1002/SPE.540>
- Tito Ontaneda, J. E., & Yacelga Pinto, M. E. (2018). *Comparación de un método exacto y aproximado en la resolución del TSP para una WSN*.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24033>
- Toro, E. R., Szantó, M., Juan, N., Pacheco, F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*.
- UNEP. (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/es/resources/informe/perspectiva-de-la-gestion-de-residuos-en-america-latina-y-el-caribe>
- United, N. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- United, N. (2018). *Cómo la basura afecta al desarrollo de América Latina | Noticias ONU*.  
<https://news.un.org/es/story/2018/10/1443562>
- Valenzuela Alcaraz, V. M. (2017). *Algoritmo metaheurístico GRASP aplicado al problema de ruteo por arcos con capacidad limitada en los vehículos*.
- Villamarín Santi, E. A. (2020). *Optimización logística de las rutas de recolección de desechos sólidos en la zona urbana del Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Pastaza*

*para la reducción del costo operativo.*

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15667>

Williamson, D., & Shmoys, D. (2011). *The Design of Approximation Algorithms - David P.*

*Williamson, David B. Shmoys - Google Libros.*

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Cc\\_Fdqf3bBgC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Williamson,+D.+P.,+%26+Shmoys,+D.+B.+\(2011\).%C2%A0The+design+of+approximation+algorithms.+Cambridge+university+press&ots=MkTkjfnf34&sig=bKD27slcY7J\\_nSDNvaLk9OEvwgo#v=onepage&q=Williamson%2C%20D.%20P.%2C%20%26%20Shmoys%2C%20D.%20B.%20\(2011\).%C2%A0The%20design%20of%20approximation%20algorithms.%20Cambridge%20university%20press&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Cc_Fdqf3bBgC&oi=fnd&pg=PR9&dq=Williamson,+D.+P.,+%26+Shmoys,+D.+B.+(2011).%C2%A0The+design+of+approximation+algorithms.+Cambridge+university+press&ots=MkTkjfnf34&sig=bKD27slcY7J_nSDNvaLk9OEvwgo#v=onepage&q=Williamson%2C%20D.%20P.%2C%20%26%20Shmoys%2C%20D.%20B.%20(2011).%C2%A0The%20design%20of%20approximation%20algorithms.%20Cambridge%20university%20press&f=false)

World, B. (2018a). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes.*

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>

World, B. (2018b). *Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los*

*desechos sólidos.* <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>

Yordá Pérez, J. (2014). *Trabajo Fin de Master El problema del cartero chino.*

Zabala, P. (2006). *Problemas de ruteo de vehículos.*

[https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis\\_n3987\\_Zabala](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n3987_Zabala)

Zanakis, S. H., & Evans, J. R. (1981). Heuristic “Optimization”: Why, When, and How to Use It.

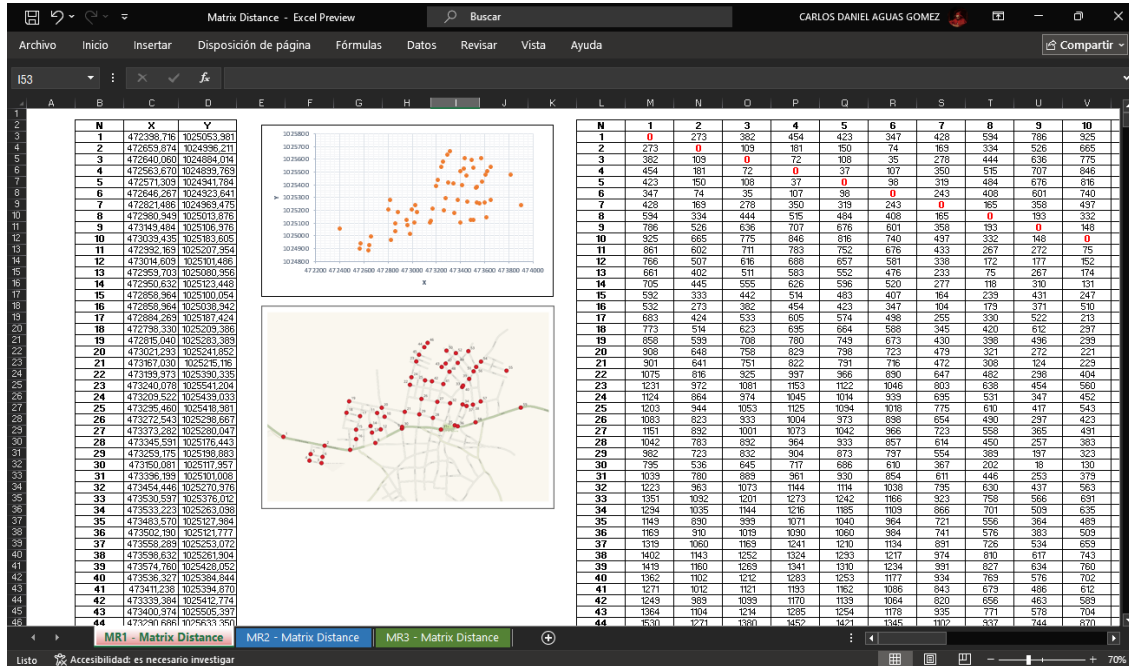
<https://doi.org/10.1287/Inte.11.5.84>, 11(5), 84–91. <https://doi.org/10.1287/INTE.11.5.84>

Zuñiga, B. C., & Mendoza, A. M. (2018). *Propuesta de un modelo de ruteo de vehículos abierto en una institución prestadora de servicios de salud* \*. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4761>

## Apéndices

### Apéndice A

#### Matriz de distancia por Macrorutas de recolección propuestas



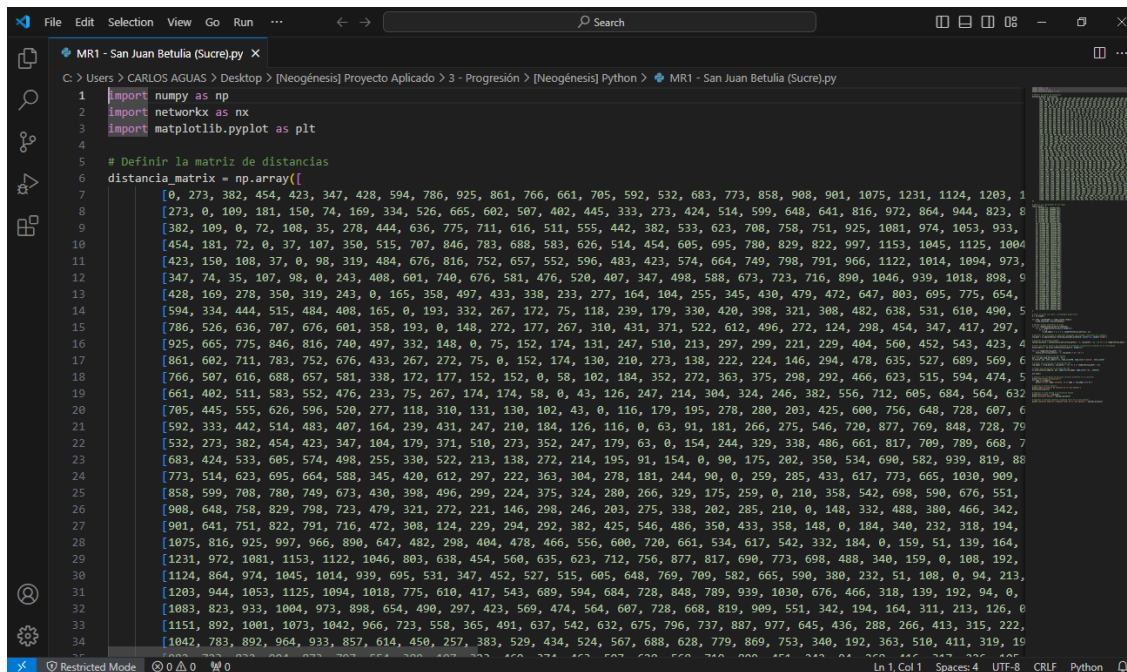
Nota: Coordenadas UTF y distancias reales georreferenciadas entre nodos por ruta

Elaboración propia. [https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/cdaguasg\\_unadvirtual\\_edu\\_co/EU5DzGmSO9pIrzuZhHLAXzc](https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EU5DzGmSO9pIrzuZhHLAXzcBEfMbmFJEufx7OTtX_okpXg?e=InalQm)

[https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/cdaguasg\\_unadvirtual\\_edu\\_co/EU5DzGmSO9pIrzuZhHLAXzcBEfMbmFJEufx7OTtX\\_okpXg?e=InalQm](https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EU5DzGmSO9pIrzuZhHLAXzcBEfMbmFJEufx7OTtX_okpXg?e=InalQm)

## Apéndice B

### Código Python de solución TSP + Nearest Neighbor Heuristic



```

1 import numpy as np
2 import networkx as nx
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 # Definir la matriz de distancias
6 distancia_matrix = np.array([
7     [0, 273, 382, 454, 423, 347, 428, 594, 786, 925, 861, 766, 661, 705, 592, 532, 683, 773, 858, 908, 901, 1075, 1231, 1124, 1203, 1
8     [273, 0, 109, 181, 150, 74, 169, 334, 526, 665, 602, 507, 402, 445, 333, 273, 424, 514, 599, 648, 641, 816, 972, 864, 944, 823, 8
9     [382, 109, 0, 72, 108, 35, 278, 444, 636, 775, 711, 616, 511, 555, 442, 382, 533, 623, 708, 758, 751, 925, 1081, 974, 1053, 933, 8
10    [454, 181, 72, 0, 37, 107, 350, 515, 707, 846, 783, 688, 583, 626, 514, 454, 605, 695, 780, 829, 822, 997, 1153, 1045, 1125, 1004
11    [423, 150, 108, 37, 0, 98, 319, 484, 676, 816, 752, 657, 552, 596, 483, 423, 574, 664, 749, 798, 791, 966, 1122, 1014, 1094, 973,
12    [347, 74, 35, 107, 98, 0, 243, 408, 601, 740, 676, 581, 476, 520, 407, 347, 498, 588, 673, 723, 716, 890, 1046, 939, 1018, 898, 9
13    [428, 169, 278, 350, 319, 243, 0, 165, 358, 497, 433, 338, 233, 277, 164, 104, 255, 345, 430, 479, 472, 647, 803, 695, 775, 654,
14    [594, 334, 444, 515, 484, 408, 165, 0, 193, 332, 267, 172, 75, 118, 239, 179, 330, 420, 398, 321, 308, 482, 638, 531, 610, 490, 5
15    [786, 526, 636, 707, 676, 601, 358, 193, 0, 148, 272, 177, 267, 310, 431, 371, 522, 612, 496, 272, 124, 298, 454, 347, 417, 297,
16    [925, 665, 775, 846, 816, 740, 497, 332, 148, 0, 75, 152, 174, 131, 247, 510, 213, 297, 299, 221, 229, 404, 560, 452, 543, 423, 4
17    [861, 602, 711, 783, 752, 676, 433, 267, 272, 75, 0, 152, 174, 130, 210, 273, 138, 222, 224, 146, 294, 478, 635, 527, 680, 569, 6
18    [766, 507, 616, 688, 657, 581, 338, 172, 177, 152, 152, 0, 58, 102, 184, 352, 272, 363, 375, 298, 792, 466, 623, 515, 594, 474, 5
19    [661, 402, 511, 583, 552, 476, 233, 75, 267, 174, 174, 58, 0, 43, 126, 247, 214, 304, 324, 246, 382, 556, 712, 605, 684, 564, 632
20    [705, 445, 555, 626, 596, 520, 277, 118, 310, 131, 130, 102, 43, 0, 116, 179, 195, 278, 280, 203, 425, 600, 756, 648, 720, 607, 6
21    [592, 333, 442, 514, 483, 407, 164, 239, 431, 247, 210, 184, 126, 116, 0, 63, 91, 181, 266, 275, 546, 720, 877, 769, 848, 728, 79
22    [532, 273, 382, 454, 423, 347, 104, 179, 371, 510, 273, 352, 247, 179, 63, 0, 154, 244, 329, 338, 486, 661, 817, 709, 789, 668, 7
23    [683, 424, 533, 605, 574, 498, 255, 330, 522, 213, 138, 272, 214, 195, 91, 154, 0, 90, 175, 202, 350, 534, 690, 582, 939, 819, 88
24    [773, 514, 623, 695, 664, 588, 345, 420, 612, 297, 222, 363, 304, 278, 181, 244, 90, 0, 259, 285, 433, 617, 773, 665, 1030, 909,
25    [858, 599, 708, 780, 749, 673, 430, 398, 496, 299, 224, 375, 324, 280, 266, 329, 175, 259, 0, 210, 358, 542, 698, 590, 676, 551,
26    [908, 648, 758, 829, 798, 723, 479, 321, 272, 221, 146, 298, 246, 203, 275, 338, 202, 285, 210, 0, 148, 332, 488, 380, 466, 342,
27    [901, 641, 751, 822, 791, 716, 472, 308, 124, 229, 294, 292, 382, 425, 546, 486, 350, 433, 358, 148, 0, 184, 340, 232, 318, 194,
28    [1075, 816, 925, 997, 966, 890, 647, 482, 298, 404, 478, 466, 556, 600, 720, 661, 534, 617, 542, 332, 184, 0, 159, 51, 139, 164,
29    [1231, 972, 1081, 1153, 1122, 1046, 803, 638, 454, 560, 635, 623, 712, 756, 877, 817, 690, 773, 698, 488, 340, 159, 0, 108, 192,
30    [1124, 864, 974, 1045, 1014, 939, 695, 531, 347, 452, 527, 515, 605, 648, 769, 709, 582, 665, 590, 380, 232, 51, 108, 0, 94, 213,
31    [1203, 944, 1053, 1125, 1094, 1018, 775, 610, 417, 543, 689, 594, 684, 728, 848, 789, 939, 1030, 676, 466, 318, 139, 192, 94, 0,
32    [1083, 823, 933, 1004, 973, 898, 654, 490, 297, 423, 569, 474, 564, 607, 728, 668, 819, 909, 551, 342, 194, 164, 311, 213, 126, 0
33    [1151, 892, 1001, 1073, 1042, 966, 723, 558, 365, 491, 637, 542, 632, 675, 796, 737, 887, 977, 645, 436, 288, 266, 413, 315, 222,
34    [1042, 783, 892, 964, 933, 857, 614, 450, 257, 383, 529, 434, 524, 567, 688, 628, 779, 869, 753, 340, 192, 363, 510, 411, 319, 19

```

Nota: Codificación conjunto a las librerías Numpy, NetworkX y Matplotlib

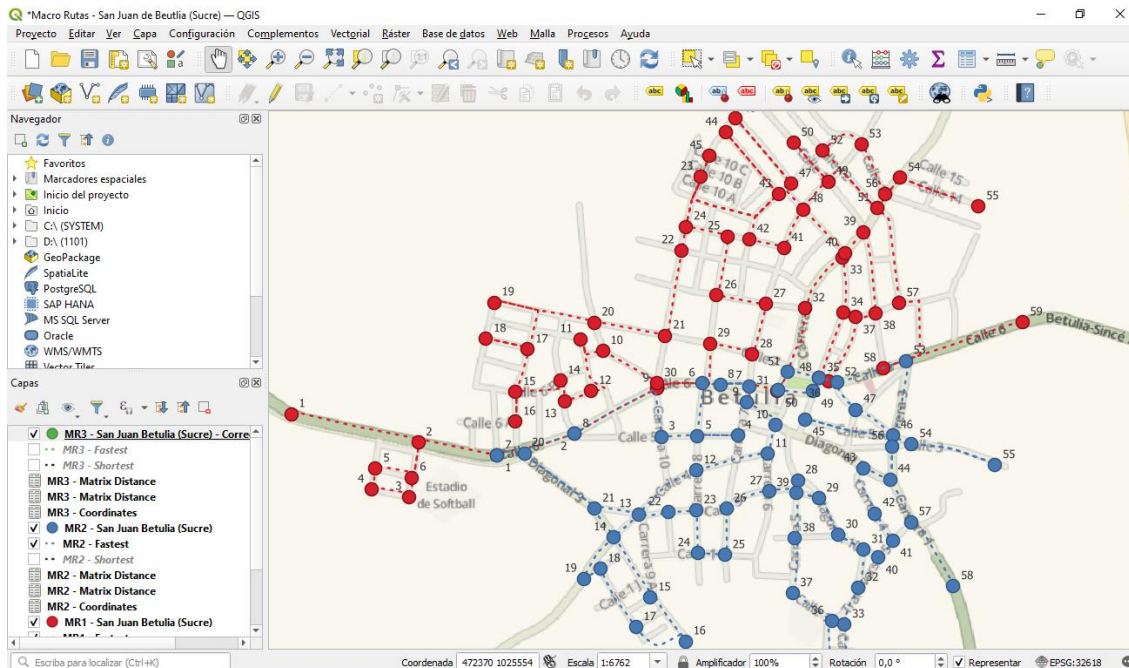
Elaboración propia. <https://unadvirtualedu->

[my.sharepoint.com/:u:/g/personal/cdaguasg\\_unadvirtual\\_edu\\_co/ESCMn5ihsbZLk1e3DC8Ug\\_o](https://my.sharepoint.com/:u:/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/ESCMn5ihsbZLk1e3DC8Ug_o)

[B5U6Ebu\\_CNAI5HbYQbKaO0w?e=ZqYK6k](https://B5U6Ebu_CNAI5HbYQbKaO0w?e=ZqYK6k)

## Apéndice C

### *Demostración visual de validación en campo de rutas propuestas*



*Nota: Elevación satelital de las rutas propuestas en QGIS en Google Earth*

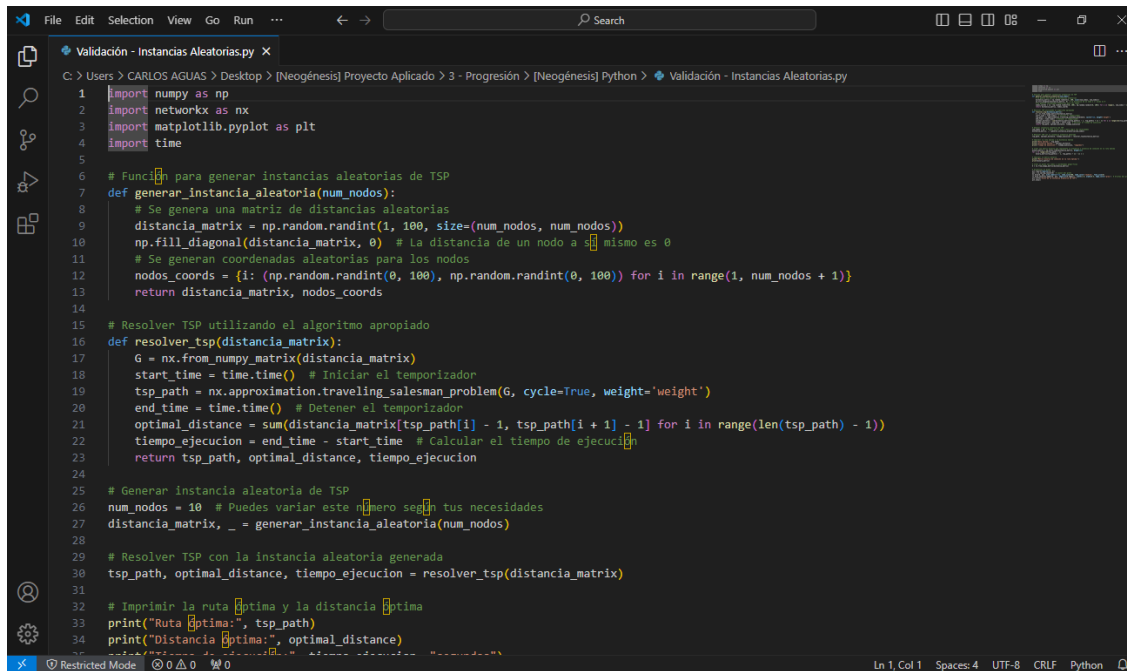
Elaboración propia. <https://unadvirtualedu->

[my.sharepoint.com/:u:/g/personal/cdaguasg\\_unadvirtual\\_edu\\_co/EUocJjc4mNEvLYv1VZcN4gB](https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:u:/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EUocJjc4mNEvLYv1VZcN4gB)

[PkF9lZ88eKq3Ve6jvalIpw?e=yAfJku](https://unadvirtualedu-my.sharepoint.com/:u:/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EUocJjc4mNEvLYv1VZcN4gB)

## Apéndice D

### Código Python de validación TSP + Nearest Neighbor Heuristic por Instancias Aleatorias



```

1 import numpy as np
2 import networkx as nx
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import time
5
6 # Función para generar instancias aleatorias de TSP
7 def generar_instancia_aleatoria(num_nodos):
8     # Se genera una matriz de distancias aleatorias
9     distancia_matrix = np.random.randint(1, 100, size=(num_nodos, num_nodos))
10    np.fill_diagonal(distancia_matrix, 0) # La distancia de un nodo a sí mismo es 0
11    # Se generan coordenadas aleatorias para los nodos
12    nodos_coords = [(np.random.randint(0, 100), np.random.randint(0, 100)) for i in range(1, num_nodos + 1)]
13    return distancia_matrix, nodos_coords
14
15 # Resolver TSP utilizando el algoritmo apropiado
16 def resolver_tsp(distancia_matrix):
17    G = nx.from_numpy_matrix(distancia_matrix)
18    start_time = time.time() # Iniciar el temporizador
19    tsp_path = nx.approximation.traveling_salesman_problem(G, cycle=True, weight='weight')
20    end_time = time.time() # Detener el temporizador
21    optimal_distance = sum(distancia_matrix[tsp_path[i] - 1, tsp_path[i + 1] - 1] for i in range(len(tsp_path) - 1))
22    tiempo_ejecucion = end_time - start_time # Calcular el tiempo de ejecución
23    return tsp_path, optimal_distance, tiempo_ejecucion
24
25 # Generar instancia aleatoria de TSP
26 num_nodos = 10 # Puedes variar este número según tus necesidades
27 distancia_matrix, _ = generar_instancia_aleatoria(num_nodos)
28
29 # Resolver TSP con la instancia aleatoria generada
30 tsp_path, optimal_distance, tiempo_ejecucion = resolver_tsp(distancia_matrix)
31
32 # Imprimir la ruta óptima y la distancia óptima
33 print("Ruta óptima:", tsp_path)
34 print("Distancia óptima:", optimal_distance)

```

Nota: Código Python y librerías de resolución TSP en distintos escenarios de simulación

Elaboración propia. <https://unadvirtualedu->

[my.sharepoint.com/:u/g/personal/cdaguasg\\_unadvirtual\\_edu\\_co/EVIK1iy9pGJNqC0AszIIS28B](https://my.sharepoint.com/:u/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EVIK1iy9pGJNqC0AszIIS28B)

[CacM5IQKEvG78fhGMMN3NQ?e=xx1gR0](https://my.sharepoint.com/:u/g/personal/cdaguasg_unadvirtual_edu_co/EVIK1iy9pGJNqC0AszIIS28B/CacM5IQKEvG78fhGMMN3NQ?e=xx1gR0)