

# COMPARACIÓN DE RESULTADOS ECONÓMICOS EN LA MACRO RUTA CENTRAL DE LA CIUDAD DE SOGAMOSO PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Ricardo Javier Pineda-Melgarejo<sup>1</sup>, Edward Fernando Toro-Perea<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Magister en Gerencia de Proyectos, [ricardo.pineda@unad.edu.co](mailto:ricardo.pineda@unad.edu.co)

<sup>2</sup> Doctor en Ingeniería, [edward.toro@unad.edu.co](mailto:edward.toro@unad.edu.co)

<sup>1,2</sup> Docentes de la Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería –ECBTI de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD

## RESUMEN

La comparación de resultados económicos en la Macro ruta central de Sogamoso de la red de aprovechamiento de residuos sólidos parte de la evaluación de alternativas de investigación de operaciones, aplicables a situaciones que exigen toma de decisiones, que pasan desde la optimización de redes, la técnica de proyectos PERT/CPM, hasta el uso de software para medir eficiencia y efectividad en la búsqueda de mejores resultados. Los problemas de redes resultan ser representaciones abstractas de actividades o procesos para la determinación del camino crítico con el uso de menos recursos, en este caso económico. La Macro ruta central de Sogamoso incluye modelos de ruteo a partir de la distancia más corta donde los costos se asocian directamente con esta variable. Los modelos de ruteo considerarán a los nodos como los puntos de recogida o contenedores de punto fijo y los arcos como los caminos entre cada uno de ellos.

**Palabras clave:** Evaluación económica, redes, transporte, ruteo, optimización, Macro ruta central.

Recibido: 14 de marzo de 2024. Aceptado: 21 de mayo de 2024

Received: March 14, 2024. Accepted: May 21, 2024

## COMPARISON OF ECONOMIC RESULTS IN THE CENTRAL MACRO ROUTE OF THE CITY OF SOGAMOSO FOR THE USE OF SOLID WASTES

### ABSTRACT

The comparison of economic results in the Sogamoso central Macro route of the solid waste utilization network is based on the evaluation of operations research alternatives, applicable to situations that require decision making, which range from network optimization, the technique from PERT/CPM projects, to the use of software to measure efficiency and effectiveness in the search for better results. Network problems turn out to be abstract representations of activities or processes for determining the critical path with the use of fewer resources, in this case economic. Sogamoso's Central Macro Route includes routing models based on the shortest distance where costs are directly associated with this variable. The routing models will consider the nodes as the collection points or fixed point containers and the arcs as the paths between each of them.

**Keywords:** Economic evaluation, networks, transport, routing, optimization, Macro central route.

*Cómo citar este artículo:* R. Pineda-Melgarejo, E. Toro-Perea. "Comparación de resultados económicos en la macro ruta central de la ciudad de Sogamoso para el aprovechamiento de residuos sólidos", *Revista Politécnica*, vol.20, no.40 pp.94-103, 2024. DOI:10.33571/rpolitec.v20n40a6

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La Resolución 754 de 2014 [1] promueve la optimización de residuos aprovechables de la ciudad de Sogamoso y de allí parte también el objeto de la investigación, la utilización de técnicas de ruteo que pasan desde la investigación de operaciones hasta técnicas de proyectos que generan herramientas para la toma de decisiones en asociaciones de recicladores de la ciudad de Sogamoso, sector de la economía local que da empleo a más de 500 personas y que tiene una estrecha relación con otros socios estratégicos, entre ellos la Empresa de Servicios Públicos de Sogamoso – Coservicios, las ECAS (Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento), generadores de residuos comerciales, industriales y domésticos, Cámara de Comercio de Sogamoso, Secretarías de: Gobierno, Gestión del Riesgo y de la Mujer del Municipio de Sogamoso, entre otros.

Para Pineda (2021) [2] los resultados que optimizan puntos para recolección de los residuos aprovechables en la macro ruta a partir de alternativas de ruteo y costos asociados se relacionan estrechamente con datos económicos. Adicional a lo anterior, Diazgranados (2022) [3] indica que a través de la simulación se pueden identificar variables como la de tiempo para determinar la duración de tareas de recolección y transporte de los residuos aprovechables, eliminando los cuellos de botella que se generan entre las operaciones y que les afectan permanentemente. Así mismo al generar la comparación de resultados económicos a través de alternativas de ruteo (software y algoritmos de ruteo) en la Macro ruta central de Sogamoso, se logra responder preguntas para la planeación de actividades a partir de la definición de la ruta crítica y la simulación de variables relacionadas con el proceso de recolección de los residuos sólidos aprovechables, por ejemplo, Pineda (2021) [4], señala que “la evaluación financiera y económica de las alternativas de simulación pueden predecir una recuperación en las inversiones durante los tiempos de ejecución de los proyectos”, por lo cual se infiere que la simulación de procesos tiene una estrecha relación con las variables y la toma de decisiones según los resultados obtenidos en los cálculos de alternativas de las macro rutas de aprovechamiento.

Lo que busca un análisis económico en el sector de aprovechamiento es brindar oportunidades para la obtención de recursos que apalanquen sus tareas, pero para esto, las asociaciones de recicladores en las ciudades deben estar organizadas y reconocidas legalmente ajustándose a las normas ambientales y de manejo de residuos sólidos para acceder a los estímulos y beneficios gubernamentales y privados en todas sus etapas de operación. Pardo (2018) asegura que “existen varias maneras para financiar proyectos de este tipo, integrándolos con la legislación y socializándolos hasta asegurar la aceptación de los usuarios finales como un reto final en el aprovechamiento de los residuos” [5]. La International Finance Corporation (2014) [6] plantea que no solo los estamentos públicos colaboran con el manejo de residuos sólidos, sino que en los países en vía de desarrollo, las organizaciones privadas son un factor clave en el aporte de técnicas, recursos y estrategias corporativas para el aprovechamiento de los residuos, sin embargo se necesita del trabajo mancomunado con los gobiernos como responsables del cumplimiento de reglamentaciones ambientales y la gestión de proyectos como fuentes de financiación para aprovechamiento de los residuos sólidos en las ciudades.

Pero no todo se basa en realizar una comparación de resultados económicos de alternativas de ruteo desligándolos de la importancia de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sino que a partir de estos se debe relacionar con el cumplimiento de los mismos en las organizaciones que desarrollan sobre todo trabajos de tipo ambiental. El ODS11 – Ciudades, Desarrollo Sostenible es elemental para entender la finalidad de esta investigación. Giraldo y Zumbado (2020) [7], relacionan el desarrollo sostenible y el ordenamiento territorial, como una necesidad para analizar desde los conflictos territoriales y la inclusión del Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 (ODS11) en todos los procesos de planeación y gestión en Colombia y Costa Rica. En este mismo artículo se concluye la carencia de un enfoque sistémico en el análisis y el conocimiento de las problemáticas territoriales como punto de partida para el planteamiento de soluciones desde la gestión ambiental del territorio dentro del marco del ODS11.

Así mismo, para Aguirre y Ortega (2022) [8] los costos operativos que se generan en la tareas de aprovechamiento de residuos sólidos son el punto de partida para la comprensión de la forma de cómo esos costos influyen en 13 ciudades de Ecuador, tomadas como referencia para el estudio. A partir del análisis de información recolectadas de fuentes oficiales correspondiente al año 2019 se logra estimar algunos indicadores como la proporción de residuos sólidos recolectados y sus costos asociados. Algunas conclusiones de los autores se basan en que las ciudades estudiadas no proyectan los recursos necesarios para atender los procesos de recolección de residuos sólidos en los hogares y que por tanto la sostenibilidad de los procesos a largo plazo se encuentra en riesgo.

## 2. MATERIALES Y METODO

Por ser una investigación de tipo descriptiva, implica el reconocimiento de los procesos de aprovechamiento de residuos sólidos en la Macro ruta central de Sogamoso y su evaluación económica. La evaluación de alternativas se realiza a partir de algoritmos y técnicas de redes y ruteo que se usan en investigación de operaciones y en evaluación de proyectos. Los resultados que se logran con la analítica de datos permiten generar una aproximación eficiente de la red de aprovechamiento para estimar escenarios y comportamientos futuros de la Macro ruta central según el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo, ya sean por factores internos o externos relacionados con el aprovechamiento de residuos sólidos en la Macro ruta central de Sogamoso.

El procedimiento de análisis de la información y sus resultados, fueron:

*Diagnóstico de la Macro ruta central.* Identificación de debilidades y amenazas con base en la matriz FODA. Con base en las características identificadas se puede observar el cumplimiento y alcance del Decreto 596 de 2016 [9] relacionado con la salud pública de Sogamoso y el desarrollo eficiente de las operaciones de aprovechamiento. Un instrumento de recolección de información tipo encuesta aplicado a 59 recicladores de oficio de la ciudad, permitió identificar aspectos relevantes para el estudio de investigación, tales como los factores internos del sistema. Además de lo anterior, las fortalezas evidencian la pertinencia en los procesos de recolección y por ende las ventajas positivas frente a las tareas de aprovechamiento, mientras que las debilidades se presentan como situaciones que hacen vulnerable la ejecución de las actividades.

*Análisis de resultados técnicas de ruteo.* Los algoritmos de redes son herramientas importantes para abordar análisis de rutas, ya que permiten determinar la ruta óptima según diversos criterios, como la distancia o incluso el uso de recursos técnicos, dependiendo de la variable seleccionada para el estudio. Si se toma, por ejemplo, la medida del tiempo como referencia, la mejor ruta será la más rápida. Por otro lado, si la referencia se basa en otra clase de atributo y éste suele ser temporal, ya sea histórico o en tiempo real, la mejor ruta se definirá según la rapidez para una fecha y hora específicas, tal como se evalúa en este caso que para el estudio suele ser la cantidad de residuos sólidos dispuestos en los puntos de recolección denominados nodos en la investigación. En resumen, la mejor opción de ruta se caracteriza por tener la decisión del menor costo, estando esta última relacionada con la distancia. Aunque es posible comparar varias alternativas desde el uso de Software (ArcGis) hasta algoritmos propios de la investigación de operaciones, el análisis del ruteo debe concluir en los menores costos asociados a las alternativas [10].

*Evaluación económica.* La evaluación económica en opciones de ruteo se refiere al análisis y comparación de las distintas alternativas de trayectos recorridos en función de criterios financieros. Al considerar factores como costos operativos, uso de recursos y eficiencia económica, esta evaluación busca determinar la opción de ruteo con mayor rentabilidad y viabilidad económica. Se determina la relación entre las distancias recorridas y el consumo de combustible, tiempo de viaje, mantenimiento de vehículos y otros costos asociados para seleccionar la ruta que optimice el rendimiento económico. En esencia, la evaluación económica en el contexto de opciones de ruteo busca tomar decisiones eficientes y precisas para la planificación de operaciones de la Macro ruta central de Sogamoso y la optimización de los residuos sólidos aprovechables.

## 3. RESULTADOS

Para la investigación se toma como referencia la Macro ruta central de Sogamoso debido a sus condiciones y características. La Macro ruta central se divide en siete micro rutas (rutas pequeñas que dividen una macro ruta en barrios o sectores asociados) y los residuos sólidos aprovechables son de los tres tipos según la clasificación general: residenciales, comerciales e industriales. El primer paso fue realizar un diagnóstico a las condiciones de ruteo en la Macro ruta central, entrevistando a 59 recicladores de oficio seleccionados al azar, las respuestas se sintetizan en la Tabla 1. Matriz FODA.

Tabla 1. Matriz FODA (actividades de reciclaje y aprovechamiento Sogamoso).

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>La recolección de los residuos sólidos No aprovechables sigue siendo prioridad municipal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se debe hacer inversión para captar el interés de la ciudadanía en general.</li> <li>Se debe invertir en la instalación de contenedores y demás programas de aprovechamiento.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las tareas de aprovechamiento permiten su optimización permanente, sobre todo en el número de personas que las realizan.</li> <li>• El recorrido puede optimizarse debido a que el operario solamente recoge el material sin hacer operaciones adicionales.</li> <li>• La asignación de puntos de recolección no requiere mayor inversión.</li> <li>• Las organizaciones de recicladores tienen contratos para las operaciones inherentes a su razón social.</li> <li>• Los recicladores y el gobierno local tienen pleno conocimiento en temas de aprovechamiento.</li> <li>• El recurso humano, técnico y operativo se adaptan fácilmente a nuevas necesidades del mercado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las tareas de recolección deben ajustarse a tiempos y rutas asignadas y los recicladores deben capacitarse para ello.</li> <li>• Poco interés de las empresas de servicios públicos para adelantar nuevos proyectos de selección en la fuente y en puntos fijos.</li> <li>• Los recicladores son apáticos a realizar cambios en sus modos de operar a corto plazo.</li> <li>• No existen procedimientos establecidos para la recolección de residuos en la ciudad.</li> <li>• Carencia de conciencia ciudadana para la implementación de nuevos proyectos de aprovechamiento.</li> </ul>
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>AMENAZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento de las condiciones para el mejoramiento de los procesos.</li> <li>• Volúmenes de residuos aprovechables en aumento.</li> <li>• Incremento de puestos de trabajo generados por la alta producción de residuos sólidos.</li> <li>• Programas de incentivos para el aprovechamiento de residuos desde el origen.</li> <li>• Tecnificación de las tareas de aprovechamiento.</li> <li>• Asociación de recicladores requerida para cumplimiento del decreto 596 de 2016.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cambios en legislación que afecta a recicladores de oficio.</li> <li>• Desconexión con gobiernos locales para promover las operaciones de aprovechamiento.</li> <li>• Penalización a recicladores por no cumplir las normas vigentes.</li> <li>• Precios bajos en residuos aprovechables.</li> <li>• Impacto en la economía por inadecuado tratamiento de los residuos.</li> <li>• No se considera en el presupuesto municipal la implementación de puntos de recogida.</li> </ul>

Según Pineda (2021), los resultados de la matriz FODA, indican que las oportunidades identificadas permitirán la optimización de los procesos de aprovechamiento en la Macro ruta central a nivel económico, social y por supuesto ambiental. El 85% de los encuestados (59 recicladores) están de acuerdo con la necesidad de implementar programas que cumplan con las normas vigentes de los estamentos públicos que tienen relación directa y permanente con dichos procesos.

A pesar que existen programas de incentivos, sobre todo del gobierno nacional (Ministerios de Vivienda; Ciudad y Territorio; Ambiente y Desarrollo Sostenible) y que las micro rutas y macro rutas están establecidas, se carece de estudios técnicos que optimicen la utilización de los recursos en las mismas, generando caos y desorden en las actividades de aprovechamiento, pues dichas micro rutas no tienen puntos fijos de recolección, sino que los usuarios dejan sus residuos en cualquier esquina sin tener un punto establecido por cuadra o manzana, no porque el usuario lo haga de forma arbitraria, sino porque no hay lineamientos del gobierno local y la empresa de servicios públicos para la disposición de puntos de recolección que atiendan las necesidades municipales.

El primer cálculo utilizado para continuar con el estudio de ruteo es la estimación del número contenedores en la Macro ruta central a los cuales en el diseño de redes se les denomina Nodos. Las fórmulas sugeridas por Zafrá (2009) usando la metodología de diseño para recolección de residuos sólidos urbanos a través de sistemas de caja fija, consideran el uso de algunos factores específicos de producción de diseño, fracción reciclable y la capacidad de los contenedores según las características del mercado [11]. Los resultados específicos y completos se muestran en el trabajo de investigación titulado “Propuesta para la optimización de los puntos de recolección de residuos sólidos aprovechables en la Macro ruta – centro en la ciudad de Sogamoso” (Pineda, 2021).

Sintetizados los resultados para la determinación de contenedores, se tiene:

$$\text{Número de contenedores} = \frac{\text{Prd (Producción de diseño/día)}}{p \text{ (Fracción reciclabe)} * V \text{ (Capacidad de contenedores)}}$$

$$\text{Número de contenedores} = \frac{21.624 \text{ Ton}}{0,2 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 2,4 \text{ m}^3} \cong 45 \text{ contenedores}$$

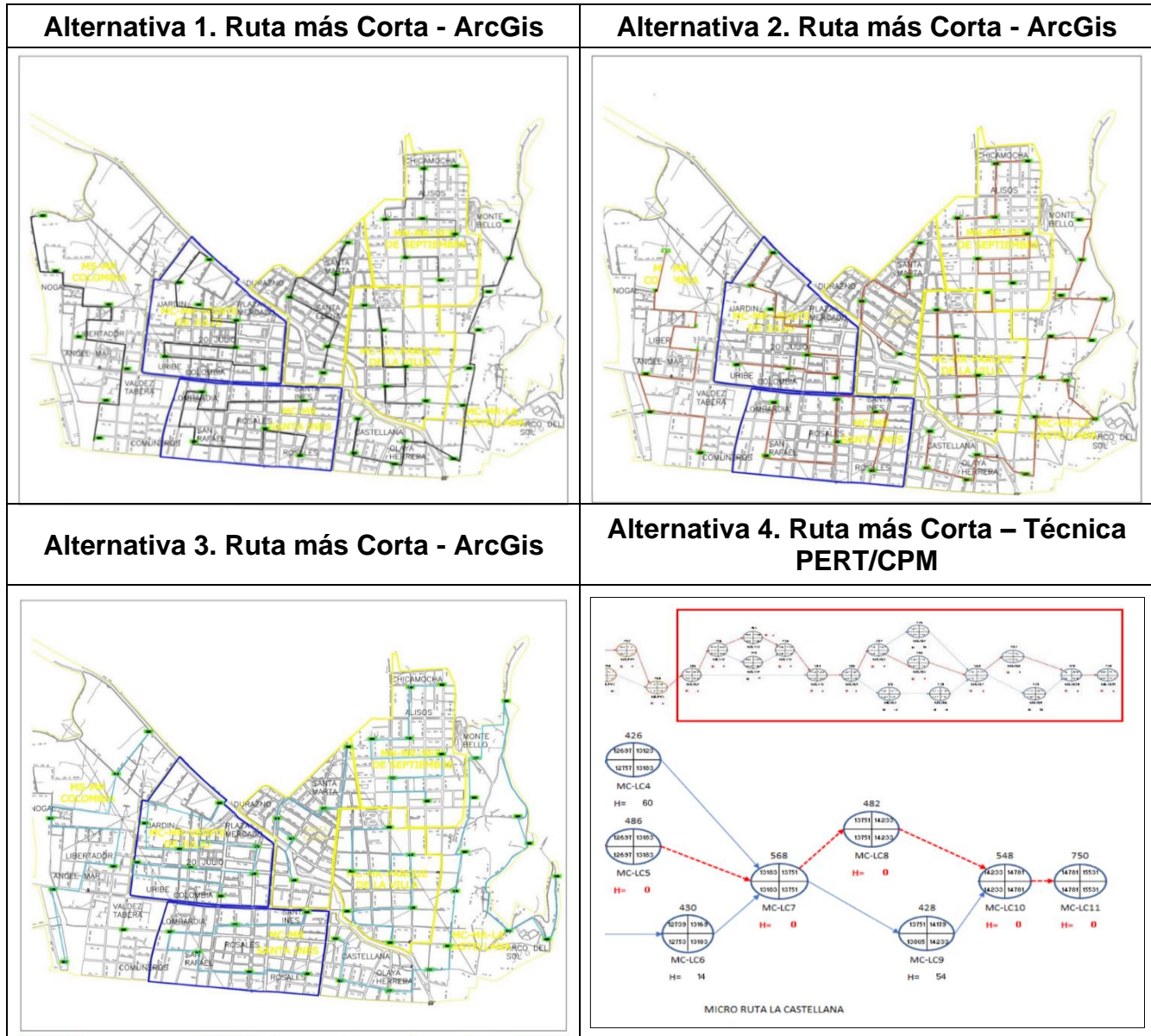
Determinado el número total de contenedores para la Macro ruta central se deben distribuir en cada micro ruta para determinar mediante el modelo de la Ruta más Corta la menor distancia de recorrido entre ellos. El cálculo utilizado se realiza por áreas, asumiendo que la lógica indica: A mayor área de servicio (área geográfica en el mapa de recolección), se presume el mayor número de habitantes por atender, como se consigna en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de contenedores (nodos), alternativas de la Ruta más Corta (1 a la 3) y PERT/CPM (4).

Micro ruta	Area (m <sup>2</sup> )	%	Nodos (punto caja fija)	Alternativa 1 (distancia entre contenedores) mt	Alternativa 2 (distancia entre contenedores) mt	Alternativa 3 (distancia entre contenedores) mt	Alternativa 4 (distancia entre contenedores) mt
Colombia	581.899	16%	7	3.762	3.350	3.470	2.655
Veinte de Julio	584.847	16%	7	2.620	2.778	2.490	1.620
Santa Inés	419.959	12%	5	2.962	2.646	2.250	1.994
Santa Helena	339.574	9%	4	2.006	1.960	2.178	1.642
Parque de la Villa	351.847	10%	5	2.280	2.028	2.114	1.870
Seis de Septiembre	429.401	12%	6	2.694	2.396	2.150	2.246
La Castellana	892.931	25%	11	5.114	5.358	4.714	3.504
<b>Total, Area</b>	<b>3.600.458</b>	<b>100%</b>	<b>45</b>	<b>21.438</b>	<b>20.516</b>	<b>19.366</b>	<b>15.531</b>

Para realizar el cálculo de la Ruta más Corta, se utilizaron cuatro alternativas, donde las tres primeras se hallan mediante el Software ArcGis, el cual se basa en análisis de distancias y recorridos entre los nodos o contenedores de las micros rutas de aprovechamiento. ArcGis (2019) define su Software como una herramienta que a partir de sistemas geográficos de información analizan los datos para presentar alternativas de planificación urbana usada en la gestión de recursos naturales y de emergencias entre otras, para la toma de decisiones. Según lo anterior se realizan varias alternativas, modificando la disposición de los contenedores y se obtienen distancias totales de recorrido en la Macro ruta central. Mientras tanto para la alternativa 4 se utiliza la técnica PERT/CPM, que según Pineda (2021) con el uso de la técnica PERT/CPM se asegura una ruta crítica sincronizada con las operaciones de aprovechamiento. Las tareas de recolección de los residuos aprovechables están consideradas dentro de la atención en los nodos para que las operaciones queden siempre atendidas, de manera que a lo largo del tiempo estos tiempos reduzcan proporcionalmente con las habilidades y destrezas desarrolladas por los operarios (recicladores de oficio). La Tabla 3, muestra las rutas según las alternativas simuladas por la ruta más corta de ArcGis y la técnica PERT/CPM.

Tabla 3. Alternativas de Ruteo (Ruta más Corta y Técnica PERT/CPM).



En la Tabla 4, se resumen los costos estimados según distancias de la ruta más corta y la técnica PERT/CPM. Una medida que relaciona el estudio de ruteo con el estudio económico es la distancia, donde se pueden determinar algunos costos en las operaciones de aprovechamiento que tienen afinidad directa con la recolección y transporte desde los puntos de recolección (nodos) hasta las bodegas de selección. Los carros sugeridos para las tareas de transporte son tipo Carry, con un consumo promedio de combustible (42 km/galón). En la misma tabla se observan las características de ruteo, la relación de \$/Km actualizados a marzo de 2024 según los precios del galón de gasolina, aceites, impuestos, seguros, etc..

Tabla 4. Alternativas de Ruteo.

Ítem	Promedios alternativa 1	Promedios alternativa 2	Promedios alternativa 3	Promedios alternativa 4 (Red PERT/CPM)
Kg residuos/día	22.000	22.000	22.000	22.000

Relación volumen/peso (kg) - carro	580	580	580	580
Cantidad de carros	4	4	4	4
Viajes al día	9	9	9	9
Viajes por carro	2	2	2	2
Metros Macro ruta central	21.438	20.516	19.366	15.531
Total, metros a parada	8.350	7.860	7.310	3.370
Total, metros/viaje	70.618	62.271	63.241	44.808
Total, metros recorridos (promedio 104 días al año)	7.344.283	6.996.152	6.577.014	4.660.074
Consumo medio OIL (mt)	40.000	40.000	40.000	40.000
Relación metros – galón de gasolina	183,6	174,9	164,4	116,5
Valor combustible (pesos Col)	\$ 141.012.480	\$ 134.326.118	\$ 126.278.669	\$ 89.473.421
Costos mantenimiento, impuestos, seguros, etc.	\$ 4.300.000	\$ 4.300.000	\$ 4.300.000	\$ 4.300.000
<b>Total, consumo al año</b>	<b>\$ 145.312.480</b>	<b>\$ 138.626.118</b>	<b>\$ 130.578.669</b>	<b>\$ 93.773.421</b>

Como se observa el menor costo asociado a la distancia, obviamente es el de la alternativa 4, sin embargo es importante traducirlo a dinero para dimensionar el ahorro significativo entre la alternativa más económica de redes a la encontrada por la técnica PERT/CPM, el cual pasa de \$130.578.869 a \$93.773.421, siendo entonces el ahorro de \$36.805.248 en un año.

#### 4. DISCUSIÓN - ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el trabajo de Caro (2012) [12], se concluye sobre la falta de recogida y gestión adecuada de residuos reciclables proporcionados por la alcaldía a la comunidad, examinando diversos aspectos y la percepción de los residentes del municipio. Los resultados concluyeron que un 43% de los usuarios consideran que el tiempo de los desechos en las vías antes de ser recogido es demasiado, lo que genera malas condiciones para la comunidad y el medio ambiente en general. En un diagnóstico actual de la Macro ruta central se puede observar que el 85% de los encuestados están de acuerdo con llevar a cabo la implementación de programas que cumplan la normatividad y que sea la administración municipal la que se haga cargo de dichos procesos para atender los requerimientos y se llegue a la comunidad con incentivos o propuestas de interés (Secretarías municipales de Sogamoso y Coservicios ).

Asimismo, el 95% de los recicladores de oficio afirman que cada ocasión derivada de los estudios de alta gestión y las tareas de aprovechamiento contribuyen a la mejora de los recursos inherentes en los procesos de gestión de residuos en Sogamoso, especialmente en la Macro ruta central, con beneficios evidentes en términos monetarios y socio-ambientales.

Las alternativas de ruteo presentan mejoras y optimizaciones tras cada nueva distribución de contenedores en la red. El ruteo calculado a través del uso de Software encuentra mejoras entre cada una de ellas del 5% aproximadamente sobre los resultados de la anterior alternativa, es decir entre la 1 a la 2 y de la alternativa 2 a la 3. La técnica de proyectos PERT/CPM, según Hajdu, y Bokor (2014) [13], es eficaz para relacionar los cronogramas de actividades con la importancia de la distribución y duración de las tareas en los proyectos. Además logró demostrar que la metodología actual de la técnica PERT/CPM está sustentada en suposiciones que han sido extensamente estudiadas y objeto de críticas intensas. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta el verdadero impacto de los cronogramas de actividades cuando existen múltiples rutas críticas y/o estas se relacionan entre sí. Así mismo Pineda (2021) asegura que la ruta crítica debe considerar la atención a todos los puntos de recogida y que su diseño va más allá de suposiciones personales a demostrarse con datos reales de distancia que cubran cada nodo o contenedor a lo largo de la ruta y que la experiencia y el objeto de estudio puede basarse en las técnicas de la gestión para entender que dichos nodos se puedan interpretar como actividades y la distancia entre esos nodos como tiempos necesarios para desarrollar las actividades.

Rojas y Reyes (2019) [14] afirman que mediante la técnica PERT/CPM se logra una eficiencia de la gestión de proyectos, por lo cual si se usa correctamente el ahorro es del 80% en la duración de las tareas pasando de 45 a

---

25 días de cierre de los ciclos de las mismas en un ejemplo práctico desarrollado por esta técnica. Sin embargo, existe incremento en el tiempo total de cierre del proyecto del 33%, una tercera parte más de lo planeado. La última alternativa que se basa en el uso de la técnica PERT/CPM aplicada sobre la Macro ruta central evidencia una optimización de la red, en comparación con la propuesta anterior que abarca una distancia de 19,366 metros. La nueva alternativa reduce la distancia a 15,531 metros, representando una mejora del 20% en relación con el nuevo cálculo de ruteo realizado mediante el algoritmo de la Ruta más Corta. Esto demuestra que PERT/CPM genera resultados óptimos e implica una planificación más efectiva de la ejecución de tareas en la ruta, mediante la caracterización de ruta crítica considerada elemental para cumplir con el proceso de recolección de residuos sólidos. En esta ruta crítica, se conectan nodos distantes entre sí, mientras que aquellos con distancias más cortas se consideran actividades con holguras que deben llevarse a cabo de manera simultánea (Pineda, 2021).

Se observa que la mejor alternativa evaluada por el ahorro de distancias es la técnica PERT/CPM, donde se evaluaron los costos asociados para la transición de vehículos de tracción animal a mecánicos, se realiza un análisis donde intervienen algunos aspectos anuales como la distancia recorrida en metros por viaje, total de viajes realizados, consumo de combustible, relación distancia consumo, mantenimiento, seguros, impuestos, etc. Un ahorro de \$36.805.248 al año entre la alternativa más económica de la Ruta más Corta y la de PERT/CPM, resulta ser significativo para usarlo en otras necesidades en las asociaciones de recicladores de la ciudad de Sogamoso.

## 5. CONCLUSIONES

Caracterizada la ruta de aprovechamiento de residuos sólidos en Macro ruta central de Sogamoso, se observa que en ésta se recolectan residuos de todo tipo, residenciales, comerciales e industriales, observando además que el Decreto 596 de 2016 en lo concerniente a la eficiencia de la red de aprovechamiento no se está cumpliendo, por lo cual quedan en evidencia debilidades en las operaciones inherentes al manejo de los residuos sólidos y deficiencias de operatividad en las asociaciones de recicladores por falta de programas ajustados a la norma y de acciones técnicas que vengan desde entidades externas ya sean gubernamentales o privadas que aporten en el mejoramiento de sus capacidades y potenciales de operación.

Las opciones de ruteo se consideran a partir del sistema de caja fija la cual aproxima un número total de contenedores para la Macro ruta central (45 contenedores), los cuales sirven para ser considerados como los nodos en la red de aprovechamiento. Mediante el uso de herramientas de ruteo (Ruta más Corta) y técnicas de evaluación de proyectos, se lleva a cabo el cálculo de diversas alternativas y variables de análisis, como la distancia. La primera alternativa arroja una distancia de 21,438 metros, la segunda de 20,516 metros, y la tercera alternativa una distancia de 19,366 metros, lo que implica un ahorro cercano al 5% en comparación con la alternativa anterior. Se considera que serían necesarias múltiples cálculos de ruteo para lograr mayores ahorros.

Al implementar una cuarta alternativa a partir de la técnica PERT/CPM, es posible alcanzar una reducción en la distancia a 15,531 metros, lo que optimiza en un 20% el cálculo de ruteo previo (alternativa 3) basada en el algoritmo de la Ruta más Corta. Como conclusión se evidencia que la gestión de proyectos mejora el uso de los recursos debido a la teoría de la ruta crítica, fundamental en la finalización de actividades, en este caso, la recolección de residuos sólidos.

En los estudios de ruteo se busca la mejor alternativa que optimice los recursos, se ha empleado el software para el uso de algoritmos de la Ruta más Corta que utiliza procedimientos precisos de salida de datos que debe ser comprendido por el programador para que la disposición de los nodos sea lo más eficiente posible. En la actualidad esos Software pueden ser más precisos o recalculados con ayuda de georreferenciadores que acudan a condiciones reales como flujo de vías, tráfico, horas pico, distancias, bloqueos de vías, contra vías, etc. Permitiendo con ello tener cálculos con menores márgenes de error para la asignación de rutas reales y ajustadas a la realidad. A pesar que existen algoritmos mucho más sofisticados y de última generación como los usados en la Ciencia de Datos y la Analítica el objetivo de ésta investigación era comprobar que siempre se podrán optimizar las rutas y los recursos utilizados en ellas si se emplean nuevas técnicas ajustadas a las necesidades, las problemáticas y los contextos reales y que la economía se maximizará a medida que se identifiquen las variables críticas del sistema y puedan ser controladas de manera responsable.



## 6. AGRADECIMIENTOS

La Universidad Nacional, Abierta y a Distancia siempre nos permite los espacios y recursos para el desarrollo de las investigaciones y desde sus funciones sustantivas de Desarrollo Regional e Inclusión Social podemos acercarnos a las comunidades e identificar algunas necesidades en las que es posible coadyuvar desde nuestro rol docente.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministerio de Vivienda, Ambiente y Desarrollo Territorial. (2014). Resolución 754 de 2014. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-08/resolucion-754-de-2014.pdf>.
- [2] Pineda Melgarejo, R. J., Rojas Baracaldo, A.J., Toro Perea, E.F., y Patiño Avella, S.M. (2023). Estudio de optimización de la red de aprovechamiento del servicio público de aseo de la Ciudad de Sogamoso a partir de su evaluación económica [Trabajo de investigación, UNAD, Colombia] Repositorio Institucional – UNAD.
- [3] Diazgranados Pineda, D. Y. (2022). Simulación de la red de aprovechamiento de Sogamoso para optimizar los procesos de recolección y transporte mediante el uso del software Promodel [Trabajo de Grado, UNAD, Colombia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/49837>.
- [4] Pineda Melgarejo, R. J. (2021). Propuesta para la optimización de los puntos de recolección de residuos sólidos aprovechables en la Macro ruta – centro en la ciudad de Sogamoso [Tesis de Maestría, UNAD, Colombia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/42473>.
- [5] Pardo Ospina, J. D. (2018). Análisis de proyectos de aprovechamiento de residuos sólidos bajo el esquema de asociación público privada en Colombia. Caso de estudio: nuevo esquema de aseo de Bogotá [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. <https://repository.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/4ce259ca-4116-4076-ae5d-52dc027aa7db/content>
- [6] International Finance Corporation. (2014). Waste PPPs. Handshake, IFC's quarterly journal on public-private partnerships. <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/library/waste-ppps-handshake-issue-12>.
- [7] Giraldo Ospina, T. y Zumbado Morales, F. (2020). Gestión territorial y sus implicaciones con el ODS 11. Reflexiones desde Colombia y Costa Rica. Revista de Arquitectura (Bogotá), 22(2), 141-152. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.3033>
- [8] Aguirre López, J. y Ortega Castro, J. C. (2022). Costos Operativos de los sistemas de recolección de residuos sólidos en los cantones de Ecuador. Revista FIPCAEC (Ecuador), 31(7), 412-429. DOI: <https://doi.org/10.23857/fipcaec.v7i1.529>
- [9] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. 2016. Decreto 596 del 11 de abril de 2016. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0596%20-%202016.pdf>
- [10] ArcGIS (2019). Módulos de ruteo en ArcGIS. <https://www.arcgis.com>
- [11] Zafra Mejía, C. A. (2009). Metodología de diseño para la recogida de residuos sólidos urbanos mediante factores punta de generación: sistemas de caja fija (SCF). Revista Ingeniería e Investigación (Colombia), 29(2), 119-126. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64311752020>
- [12] Caro Martínez, L.Z. (2012). Estudio descriptivo sobre las condiciones existentes en el manejo de recolección transporte y disposición final de los residuos sólidos en la cabecera municipal de San Cayetano Cundinamarca [Tesis Pregrado, Universidad la Gran Colombia, Colombia]. <https://biblioteca.ugc.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=187049>.
- [13] Hajdu, M. y Bokor, O. (2014). The Effects of Different Activity Distributions on Project Duration in PERT Networks. Revista Procedia-Social and Behavioral Sciences (Hungría), 119 (2014), 766-775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.086>

---

[14] Rojas Lazo, G. y Reyes Albarrecín, S. (2019). Aplicación del Pert Cpm para reducir el tiempo de ciclo del cierre de proyectos en la empresa Semi Perú Montajes S.A.C. [Trabajo de Grado, Universidad Ricardo Palma, Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2748>

