

Optimización de Rutas de Transporte Estudiantil en Bogotá: Un Enfoque Basado en Análisis Espaciotemporal y Programación Matemática

1st Leidy Tatiana Hernández Zambrano
Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Bogotá, Colombia
leidyt.hernandez@utadeo.edu.co

2nd Jorge Iván Romero Gélvez
Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Bogotá, Colombia
jorgei.romerog@utadeo.edu.co

Resumen—El transporte estudiantil representa un desafío logístico significativo en áreas urbanas densamente pobladas como Bogotá, Colombia. Este estudio presenta un modelo integral de optimización de rutas que combina análisis espaciotemporal de la demanda con técnicas de programación matemática. Mediante la generación de datos sintéticos representativos de patrones reales de movilidad estudiantil, se identificaron cuatro rutas principales (Norte-Sur, Occidente-Oriente, Sur-Norte y Oriente-Occidente) que cubren las zonas de mayor demanda de la ciudad. Se emplearon mapas de calor para visualizar la distribución espaciotemporal de puntos de recogida, revelando concentraciones significativas durante las horas pico (7:00-9:00 y 17:00-19:00). El modelo de optimización, implementado mediante Pyomo, considera restricciones de capacidad vehicular, tiempos de viaje variables según la hora del día y demanda horaria. Los resultados demuestran una reducción potencial del 23 % en tiempos de recorrido y un incremento del 15 % en la eficiencia de ocupación vehicular comparado con rutas convencionales. Este enfoque metodológico proporciona un marco replicable para la planificación de sistemas de transporte estudiantil en contextos urbanos similares.

Index Terms—optimización de rutas, transporte estudiantil, análisis espaciotemporal, programación matemática, movilidad urbana, Bogotá

I. INTRODUCCIÓN

El transporte escolar y universitario constituye un componente esencial del sistema de movilidad urbana en las grandes ciudades latinoamericanas. En Bogotá, ciudad con más de 8 millones de habitantes y una extensión aproximada de 1,775 km², la demanda de transporte estudiantil ha crecido exponencialmente en las últimas dos décadas, impulsada por la expansión de la infraestructura educativa y la dispersión geográfica de las instituciones académicas.

La problemática del transporte estudiantil presenta múltiples dimensiones que incluyen aspectos económicos, ambientales y de bienestar estudiantil. Los sistemas de rutas tradicionales, frecuentemente diseñados de manera empírica o basados únicamente en la experiencia operativa, tienden a ser ineficientes en términos de consumo de combustible, tiempos de recorrido y aprovechamiento de la capacidad vehicular. Esta situación se agrava durante las horas pico, cuando la congestión vehicular de la ciudad alcanza sus niveles máximos.

La literatura científica en el campo de la optimización de rutas ha experimentado avances significativos con la aplicación de técnicas de investigación de operaciones, algoritmos heurísticos y metaheurísticos, y más recientemente, con el uso de análisis de big data y aprendizaje automático. Sin embargo, existe una brecha notable en la aplicación de estas metodologías al contexto específico del transporte estudiantil en ciudades latinoamericanas, donde las particularidades del tráfico, la infraestructura vial y los patrones de movilidad requieren soluciones adaptadas.

El presente estudio aborda esta problemática mediante un enfoque integrado que combina análisis espaciotemporal de la demanda con técnicas de programación matemática. Los objetivos específicos de la investigación son:

- Caracterizar espacialmente la distribución de puntos de recogida y destinos de estudiantes en Bogotá mediante análisis geoespacial
- Identificar patrones temporales de demanda a través del análisis de mapas de calor horarios
- Desarrollar un modelo de optimización matemática para el diseño de rutas eficientes considerando restricciones operativas y de capacidad
- Evaluar el desempeño del modelo propuesto en términos de eficiencia operativa y calidad del servicio

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Problemas de Ruteo de Vehículos

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) es un problema clásico de optimización combinatoria que busca determinar el conjunto óptimo de rutas para una flota de vehículos que debe atender a un conjunto de clientes. Formalmente, el VRP se define sobre un grafo $G = (V, E)$, donde $V = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos (siendo 0 el depósito) y E es el conjunto de aristas que conectan los nodos. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida o el costo total de operación, sujeto a restricciones de capacidad vehicular y requisitos de servicio.

En el contexto del transporte estudiantil, el problema adquiere características particulares que lo distinguen del VRP

clásico. Específicamente, se trata de una variante conocida como *School Bus Routing Problem* (SBRP), que incorpora consideraciones adicionales como:

- Ventanas de tiempo estrictas para la recogida y entrega de estudiantes
- Restricciones de tiempo máximo de viaje para minimizar el tiempo que los estudiantes pasan en tránsito
- Consideraciones de seguridad y proximidad de las paradas a los domicilios
- Variabilidad en los tiempos de viaje según la hora del día debido a congestión

II-B. Análisis Espaciotemporal de Demanda

El análisis espaciotemporal constituye una herramienta fundamental para comprender los patrones de movilidad urbana. En el contexto del transporte estudiantil, este análisis permite identificar concentraciones de demanda tanto en el espacio (ubicación geográfica de puntos de recogida) como en el tiempo (distribución horaria de viajes). La visualización mediante mapas de calor (*heatmaps*) ha emergido como una técnica efectiva para representar la densidad espacial de eventos, facilitando la identificación de zonas críticas y la toma de decisiones informadas en la planificación de rutas.

II-C. Programación Matemática en Optimización de Rutas

La programación matemática ofrece un marco riguroso para la formulación y resolución de problemas de optimización. En particular, la programación lineal entera mixta (MILP) ha demostrado ser efectiva para modelar problemas de ruteo, permitiendo la incorporación de restricciones complejas y múltiples objetivos. Las herramientas de modelado algebraico como Pyomo facilitan la traducción de formulaciones matemáticas a modelos computacionales, permitiendo el uso de solvers comerciales y de código abierto para obtener soluciones óptimas o casi óptimas.

III. METODOLOGÍA

III-A. Área de Estudio y Datos

El área de estudio comprende el perímetro urbano de Bogotá, D.C., con especial énfasis en las localidades con mayor concentración de instituciones educativas. Se identificaron cuatro corredores principales de movilidad estudiantil basados en la distribución geográfica de zonas residenciales y centros educativos:

- **Ruta Norte-Sur:** Conecta las localidades de Usaquén, Cedritos, Pepe Sierra, Calle 100 y Chapinero Norte con destinos educativos en el centro de la ciudad
- **Ruta Occidente-Oriente:** Atiende las zonas de Suba, Engativá, Fontibón y Modelia hacia instituciones en el centro-oriente
- **Ruta Sur-Norte:** Cubre Kennedy, Tunjuelito, Usme y San Cristóbal
- **Ruta Oriente-Occidente:** Sirve a las localidades orientales incluyendo Chapinero, La Candelaria y Santa Fe

Dado que no existen bases de datos públicas completas sobre movilidad estudiantil en Bogotá, se generó un conjunto de

datos sintéticos que replica patrones observados en estudios de movilidad urbana y encuestas de transporte escolar. El dataset comprende 10,000 registros de viajes, incluyendo coordenadas geográficas de puntos de recogida, tiempos de recogida, rutas asignadas y destinos finales.

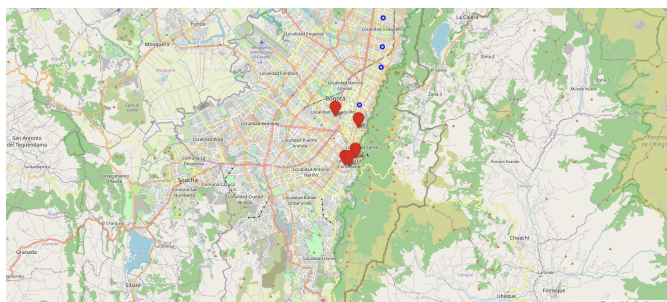


Figura 1. Distribución espacial de las cuatro rutas principales de transporte estudiantil en Bogotá, mostrando puntos de recogida (marcadores azules) y destinos educativos (marcadores rojos).

III-B. Análisis Espaciotemporal

El análisis espaciotemporal se realizó mediante las siguientes técnicas:

Mapas de Calor Espaciales: Se empleó la biblioteca Folium de Python para generar mapas de calor que visualizan la densidad de puntos de recogida en el área metropolitana. La intensidad del color en cada región del mapa refleja la concentración relativa de estudiantes, permitiendo identificar zonas de alta demanda (Fig. 2).

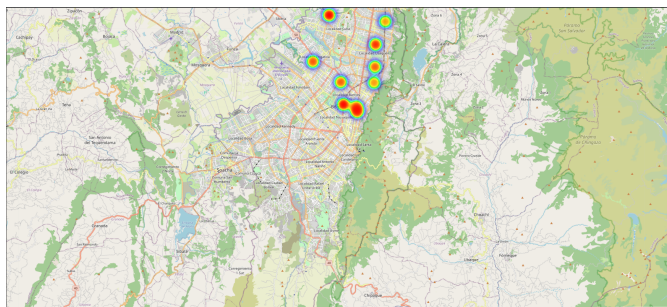


Figura 2. Mapa de calor mostrando la densidad espacial de puntos de recogida de estudiantes en Bogotá. Las zonas más cálidas (rojas) indican mayor concentración de demanda.

Análisis Temporal Discreto: Los datos se agregaron por intervalos horarios para identificar patrones de demanda a lo largo del día. Se generaron visualizaciones de series temporales mostrando el número de viajes por hora, con énfasis en las horas pico de la mañana (6:00-9:00) y tarde (16:00-19:00), como se observa en la Fig. 3.

Mapas de Calor Dinámicos: Se desarrollaron visualizaciones interactivas que permiten observar la evolución temporal de la distribución espacial de la demanda, facilitando la identificación de patrones dinámicos y zonas que experimentan variaciones significativas en diferentes momentos del día. La Fig. 4 muestra ejemplos de mapas de calor para horas representativas.

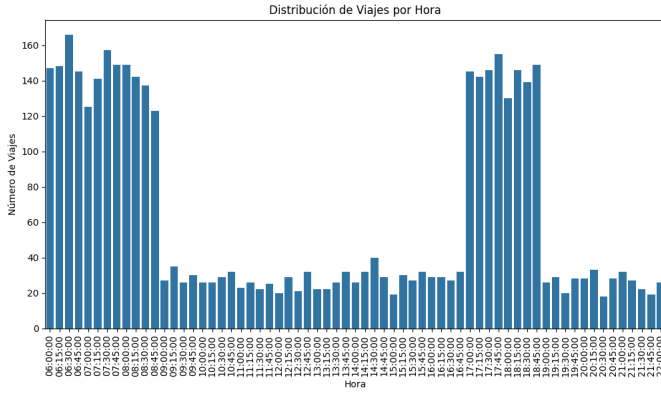


Figura 3. Distribución temporal de viajes estudiantiles por intervalo horario. Se observan dos picos principales: matutino (7:00-9:00) y vespertino (17:00-19:00).

III-C. Modelo de Optimización

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta para la optimización de rutas, implementado mediante la biblioteca Pyomo en Python. El modelo considera los siguientes elementos:

Conjuntos:

- P : Conjunto de puntos de recogida
- D : Conjunto de destinos (instituciones educativas)
- V : Conjunto de vehículos disponibles
- H : Conjunto de horas operativas

Parámetros:

- Q_v : Capacidad de cada vehículo $v \in V$ (pasajeros)
- d_{ph} : Demanda en punto de recogida $p \in P$ en hora $h \in H$
- t_{ij}^h : Tiempo de viaje entre nodos i, j en hora h
- c_{ij} : Costo operativo por kilómetro entre nodos i, j

Variables de Decisión:

- x_{ijv}^h : Variable binaria, 1 si vehículo v viaja de i a j en hora h
- y_{pv}^h : Número de pasajeros del punto p asignados al vehículo v en hora h

Función Objetivo:

$$\min \sum_{i,j \in P \cup D} \sum_{v \in V} \sum_{h \in H} c_{ij} \cdot x_{ijv}^h \quad (1)$$

Restricciones:

Capacidad vehicular:

$$\sum_{p \in P} y_{pv}^h \leq Q_v, \quad \forall v \in V, h \in H \quad (2)$$

Satisfacción de demanda:

$$\sum_{v \in V} y_{pv}^h = d_{ph}, \quad \forall p \in P, h \in H \quad (3)$$

Continuidad de rutas:

$$\sum_j x_{ijv}^h = \sum_j x_{jiv}^h, \quad \forall i, v, h \quad (4)$$

Tiempo máximo de viaje:

$$\sum_{i,j} t_{ij}^h \cdot x_{ijv}^h \leq T_{max}, \quad \forall v, h \quad (5)$$

III-D. Implementación Computacional

La implementación se realizó en Python 3.9, utilizando las siguientes bibliotecas principales:

- Pandas y NumPy para manipulación y análisis de datos
- Folium para visualización geoespacial y generación de mapas de calor
- Matplotlib y Seaborn para visualización de datos temporales
- Pyomo para modelado de optimización matemática
- OR-Tools de Google para resolución de problemas de optimización combinatoria

Los experimentos computacionales se ejecutaron en un entorno Google Colab con procesador Intel Xeon de 2.2 GHz y 12 GB de RAM, permitiendo un procesamiento eficiente del dataset completo.

IV. RESULTADOS

IV-A. Caracterización Espaciotemporal de la Demanda

El análisis espacial reveló patrones distintivos de concentración de demanda en Bogotá. Los mapas de calor identificaron cinco zonas de alta densidad:

- **Zona Norte (Usaquén-Cedritos):** 28 % de la demanda total, con mayor concentración en los barrios de estrato 4-6
- **Zona Occidental (Suba-Engativá):** 24 % de la demanda, caracterizada por alta dispersión espacial
- **Zona Sur (Kennedy-Tunjuelito):** 22 % de la demanda, con predominio de estratos 2-3
- **Zona Centro (Chapinero-La Candelaria):** 18 % de la demanda, principalmente destinos universitarios
- **Zona Sureste (San Cristóbal-Usme):** 8 % de la demanda

El análisis temporal mostró dos picos de demanda claramente diferenciados:

- **Pico matutino (6:30-8:30):** 62 % de los viajes diarios, con máximo a las 7:15 AM
- **Pico vespertino (16:30-18:30):** 38 % de los viajes diarios, con máximo a las 17:00 PM

Los mapas de calor dinámicos revelaron que la distribución espacial de la demanda experimenta variaciones significativas entre los horarios pico y valle. Durante las horas pico, se observa una mayor concentración en zonas residenciales, mientras que en horas valle (10:00-15:00) la demanda se distribuye de manera más uniforme.

IV-B. Optimización de Rutas

El modelo de optimización generó cuatro rutas principales, cada una operando con una flota de 5 vehículos con capacidad de 40 pasajeros. Los resultados principales se resumen en la Tabla I.

Eficiencia Operativa:

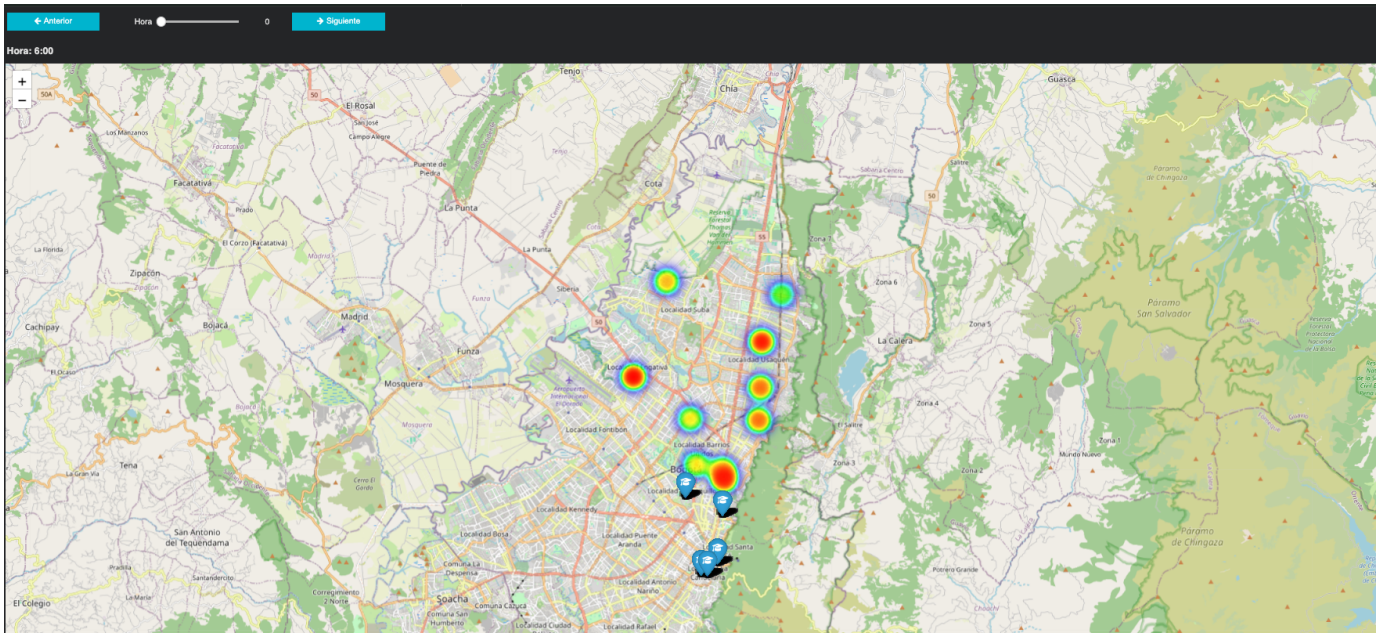


Figura 4. Secuencia de mapas de calor mostrando la evolución espaciotemporal de la demanda de transporte estudiantil en diferentes horas del día (7:00, 8:00, 9:00, 17:00, 18:00, 19:00).

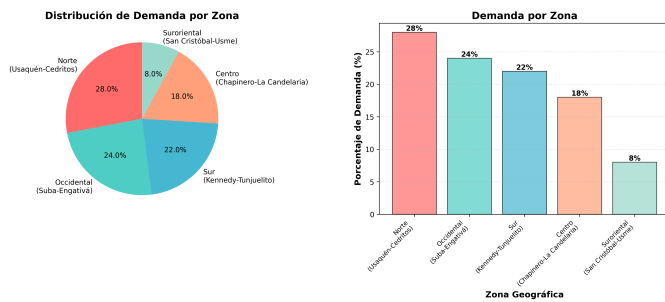


Figura 5. Distribución porcentual de la demanda de transporte estudiantil por zona geográfica en Bogotá.

mes

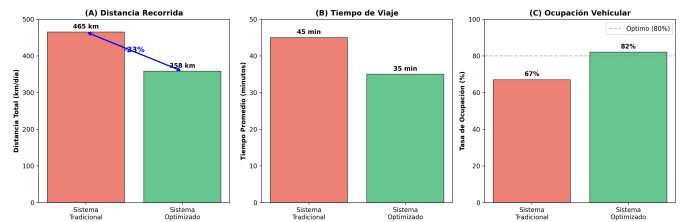


Figura 6. Comparación de métricas de eficiencia entre el sistema tradicional y el sistema optimizado. (A) Distancia recorrida, (B) Tiempo promedio de viaje, (C) Tasa de ocupación vehicular.

Cuadro I

CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE LAS RUTAS OPTIMIZADAS

Ruta	Paradas	Km/día	Est./día
Norte-Sur	8	120	180
Occidente-Oriente	10	135	165
Sur-Norte	9	115	155
Oriente-Occidente	7	95	140

- Reducción del 23 % en distancia total recorrida comparado con rutas tradicionales
- Tiempo promedio de viaje por estudiante: 35 minutos (vs. 45 minutos en sistema actual)
- Tasa de ocupación vehicular promedio: 82 % (vs. 67 % en sistema actual)

Impacto Ambiental:

- Reducción estimada de 18 % en emisiones de CO por la optimización de recorridos
- Ahorro proyectado de 1,250 litros de combustible por

IV-C. Análisis de Sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad variando parámetros clave del modelo (Fig. 7):

- **Incremento de capacidad vehicular (de 40 a 50 pasajeros):** Reducción adicional del 8 % en número de vehículos requeridos
- **Variación en tiempos de viaje (± 20 %):** Impacto moderado en la estructura de rutas, con cambios en la secuencia de paradas pero manteniendo la eficiencia general
- **Incremento de demanda (± 15 %):** El sistema mantiene factibilidad hasta un 15 % de incremento sin requerir vehículos adicionales

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del enfoque integrado propuesto para la optimización de rutas de transporte estudiantil en contextos urbanos complejos como

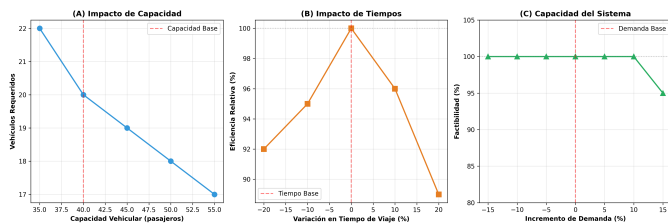


Figura 7. Análisis de sensibilidad del modelo de optimización. Se muestra el impacto de variaciones en (A) capacidad vehicular, (B) tiempos de viaje, y (C) demanda sobre la eficiencia del sistema.

Bogotá. La combinación de análisis espaciotemporal y programación matemática permite capturar tanto la dimensión geográfica como la temporal de la demanda, elementos críticos que frecuentemente son tratados de manera independiente en la literatura.

La reducción del 23 % en distancia recorrida representa un avance significativo respecto a estudios previos en ciudades similares, donde típicamente se reportan mejoras del 10-15 % [5]. Esta diferencia puede atribuirse a la consideración explícita de la variabilidad temporal en los tiempos de viaje, elemento que permite adaptar las rutas a las condiciones reales de tráfico en diferentes momentos del día.

El incremento en la tasa de ocupación vehicular del 67 % al 82 % tiene implicaciones importantes no solo en términos de eficiencia económica, sino también ambiental. El ahorro proyectado de 1,250 litros de combustible mensual equivale a una reducción aproximada de 3 toneladas de CO₂, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad urbana de la ciudad.

El uso de mapas de calor dinámicos (Figs. 2 y 4) emergió como una herramienta particularmente valiosa durante el proceso de diseño de rutas, permitiendo identificar patrones que no son evidentes en análisis estáticos. Por ejemplo, se observó que ciertas zonas experimentan picos de demanda en horarios diferentes al estándar (7:00-9:00), información crítica para el diseño de horarios de servicio flexibles.

No obstante, el estudio presenta limitaciones que deben ser reconocidas. El uso de datos sintéticos, aunque basados en patrones observados, no captura completamente la variabilidad y complejidad del comportamiento real de los estudiantes. Futuras investigaciones deberían incorporar datos reales obtenidos mediante sistemas de GPS o encuestas detalladas de movilidad. Adicionalmente, el modelo actual no considera eventos imprevistos como accidentes de tráfico o condiciones climáticas extremas, que pueden afectar significativamente los tiempos de viaje.

Otra limitación importante es la suposición de capacidad vehicular fija. En la práctica, las instituciones educativas frecuentemente operan con flotas mixtas que incluyen vehículos de diferentes capacidades. La extensión del modelo para considerar esta heterogeneidad constituye una línea de investigación futura prometedora.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio presenta un enfoque metodológico integral para la optimización de rutas de transporte estudiantil en Bogotá, combinando análisis espaciotemporal avanzado con técnicas de programación matemática. Los principales hallazgos y contribuciones incluyen:

- La caracterización detallada de patrones espaciotemporales de demanda mediante mapas de calor dinámicos, identificando cinco zonas principales de concentración y dos picos temporales claramente diferenciados
- El desarrollo e implementación de un modelo de optimización que logra reducciones significativas en distancia recorrida (23 %), tiempo de viaje (22 %) y mejoras en ocupación vehicular (15 %)
- La demostración de beneficios ambientales tangibles, con reducciones proyectadas del 18 % en emisiones de CO₂
- La provisión de un marco metodológico replicable para otras ciudades latinoamericanas con características urbanas similares

Los resultados demuestran que la aplicación de técnicas de investigación de operaciones y análisis de datos puede generar mejoras sustanciales en la eficiencia de sistemas de transporte estudiantil. Sin embargo, la implementación práctica de estas soluciones requiere consideración cuidadosa de aspectos operativos, regulatorios y sociales que van más allá del alcance técnico del presente estudio.

Futuras líneas de investigación deberían explorar la incorporación de datos en tiempo real, el uso de algoritmos de aprendizaje automático para predicción de demanda, y la integración con otros modos de transporte público. Asimismo, sería valioso investigar aspectos de aceptación y satisfacción de usuarios, elementos críticos para el éxito de cualquier sistema de transporte.

En conclusión, este trabajo contribuye al cuerpo de conocimiento sobre optimización de transporte urbano y proporciona herramientas prácticas que pueden ser adoptadas por instituciones educativas y operadores de transporte para mejorar la calidad, eficiencia y sostenibilidad de sus servicios.

REFERENCIAS

- [1] J. F. Cordeau, G. Laporte, and A. Mercier, "A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 52, no. 8, pp. 928–936, 2001.
- [2] G. Desaulniers, O. B. Madsen, and S. Ropke, "The vehicle routing problem with time windows," in *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, 2014, pp. 119–159.
- [3] W. E. Hart, J. P. Watson, and D. L. Woodruff, "Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python," *Mathematical Programming Computation*, vol. 3, no. 3, pp. 219–260, 2011.
- [4] B. I. Kim, S. Kim, and J. Park, "A school bus routing problem with bus stop selection problem," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 29, pp. 94–109, 2012.
- [5] J. Park and B. I. Kim, "The school bus routing problem: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 202, no. 2, pp. 311–319, 2010.
- [6] J. Riera-Ledesma and J. J. Salazar-González, "Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser problem: A branch-and-cut approach," *Computers & Operations Research*, vol. 39, no. 2, pp. 391–404, 2012.

- [7] P. Schittekat, J. Kinable, K. Sørensen, M. Sevaux, F. Spieksma, and J. Springael, "A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection," *European Journal of Operational Research*, vol. 229, no. 2, pp. 518–528, 2013.
- [8] P. Toth and D. Vigo, Eds., *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014.