

Modelo difuso para un problema de planificación de transporte organizacional

Fuzzy model for an organizational transportation planning problem

Eduardo Sánchez Ansola, Alejandro Rosete Suárez

Introducción

El Problema de Planificación de Autobuses Escolares (SBRP, *School Bus Routing Problem*) se define con la intención de garantizar una política óptima de transportación de los estudiantes de una escuela o un distrito escolar. Es identificado como problema en [1] hace más de 60 años. Sin embargo, no es hasta las últimas décadas que se han aumentado los aportes en la modelación y solución de este problema [2]. Aunque se define con un enfoque orientado a los estudiantes, el mismo problema permite modelar la planificación del transporte obrero y otras situaciones de amplia aplicabilidad práctica.

Según [3, 4] el SBRP puede dividirse en 5 sub-problemas: 1) Preparación de los datos, 2) Selección de las paradas, 3) Generación de las rutas, 4) Calendario de la ruta y 5) Ajuste al tiempo de la campana escolar. Por otra parte, [2] plantea que la preparación de los datos (1) puede ser parte de cada sub-problema, y por tanto lo trata como tal y no como un sub-problema en sí. Asimismo, describe un nuevo sub-problema propuesto en [5] llamado políticas de transportación estratégicas (6).

Existen múltiples enfoques para modelar y solucionar al SBRP. De esta forma, el SBRP puede clasificarse, según [2, 4] por:

- 1) Número de escuelas: una o varias.
- 2) Entorno de servicio: urbano o rural.
- 3) Tipo de carga (estudiantes): mixta o no. Se refiere a si los estudiantes pertenecen o no a la misma escuela.
- 4) Flota: homogénea o heterogénea. Usualmente se trata de si todos los autobuses disponibles tienen la misma capacidad o no.
- 5) Objetivo: generalmente es la minimización de uno o más de los siguientes aspectos:
 - a. Cantidad de autobuses
 - b. Distancia (tiempo) total recorrida por los autobuses
 - c. Distancia (tiempo) total que los estudiantes se encuentran sobre el autobús
 - d. Distancia total caminada por los estudiantes
 - e. Longitud máxima de una ruta
- 6) Restricciones: normalmente en cada modelo de SBRP se plantea cumplir con una o más de las siguientes condiciones:
 - a. Capacidad de los vehículos
 - b. Tiempo máximo de recorrido
 - c. Ventana de tiempo de la escuela
 - d. Distancia máxima a caminar por un estudiante

Desde el punto de vista de las soluciones, múltiples aproximaciones han sido usadas, incluyendo algoritmos exactos, heurísticos o metaheurísticos. Antes del estudio presentado en [4] solo unas pocas soluciones basadas en metaheurísticas se habían publicado. Sin embargo, en los últimos 10 años el interés en el SPBR se ha incrementado notablemente y en especial el uso de metaheurísticas [2], como Algoritmo

Genético [6-8], Colonia de Hormigas [9-11], Búsqueda Tabú [12, 13] o GRASP [14-16]. El uso de metaheurísticas en la solución del SBRP es debido al incremento del tamaño y la complejidad de las instancias a ser resueltas. De esta misma forma, estos algoritmos han demostrado obtener buenas soluciones a problemas similares al SBRP y otros problemas de optimización combinatoria.

Por otra parte, la inclusión de elementos con incertidumbre es una de las vías de obtener modelos más similares a la realidad, debido a que, en esta los elementos necesarios para parametrizar un problema no tienen que ser exactos o necesariamente conocidos. Este elemento es destacado por [2] como una de las vías de trabajo en el SBRP. Entre las técnicas destacadas en la manipulación de la incertidumbre se encuentran las aproximaciones estocásticas [17], donde algunos de los elementos del problema presentan un comportamiento aleatorio, y la optimización difusa [18], donde los elementos pueden involucrar ciertos niveles de subjetividad o ambigüedad.

En el caso de la optimización difusa, se pueden encontrar varios estudios de su aplicación en el Problema de Planificación de Rutas de Vehículos (VRP). Por ejemplo, en [19] varios modelos son desarrollados para variantes del VRP con tiempos de viaje imprecisos, modelados como números triangulares difusos. En [20], se propone un modelo con tratamiento difuso para el Problema de Planificación de Rutas de Camiones y Tráileres (TTRP) con restricciones de capacidad imprecisas. Más recientemente, [21] presenta un Problema de Planificación de Rutas de Inventarios de Producción Integrados (IRP) con aproximación difusa en la demanda de los comerciantes. Asimismo, en [22], se considera el Problema Difuso de Planificación de Rutas de Vehículos Verde (FGVRP) para el diseño de cadenas de suministros, donde la demanda de los clientes es considerada difusa. Finalmente, los autores de [23], introducen un Problema Difuso de Planificación de Rutas de Vehículos Eléctricos con ventanas de tiempo y estaciones de recarga (FEVRPTW), donde números difusos son utilizados para el tratamiento de la incertidumbre de los tiempos de servicio, el consumo de energía y los tiempos de viaje.

A pesar de que los principios de la optimización difusa han sido aplicados al VRP con resultados satisfactorios, hasta donde se ha podido investigar, técnicas similares no han sido aplicadas al SBRP.

A partir de todo lo mencionado, se define como problema científico ¿Cómo resolver el Problema de Planificación de Autobuses Escolares con flexibilidad en la máxima distancia a caminar por los estudiantes y la capacidad de los vehículos?

Esta investigación tiene como Objeto de Estudio los modelos y soluciones al Problema de Planificación de Autobuses Escolares. Mientras que como Campo de Acción se define el uso de técnicas de optimización difusas en el Problema de Planificación de Autobuses Escolares.

Para resolver el problema planteado, se propone el siguiente objetivo:

Desarrollar un modelo para el Problema de Planificación de Autobuses Escolares con selección de paradas y generación de rutas con flota heterogénea tomando como restricciones difusas la capacidad de los autobuses y la máxima distancia a caminar por los estudiantes.

Esta investigación tiene como novedad científica el desarrollo de un modelo para la solución del SBRP con selección de paradas, generación de rutas y flota heterogénea, teniendo en cuenta ciertos niveles de flexibilidad de la capacidad de los autobuses y la distancia máxima a caminar por los estudiantes.

Como resultados esperados, además del modelo planteado, se tiene obtención de la solución al SBRP lo que permite a los planificadores de rutas y a los decisores, obtener mejores planificaciones de las rutas para sus centros, a partir de la disminución de la distancia recorrida por los autobuses, considerando la posibilidad de sobrepasar (en una cierta medida) la capacidad de los autobuses y la distancia a caminar por los estudiantes, con el fin de disminuir los costos de transportación.

Metodología

La metodología empleada en esta investigación se centra en el desarrollo de un modelo para el Problema de Planificación de Autobuses Escolares (SBRP) que incorpora técnicas de optimización difusa y metaheurísticas. Los pasos seguidos incluyen:

1. Identificación de técnicas de optimización difusa: Se seleccionaron métodos como la aproximación paramétrica para tratar la flexibilidad en las restricciones del modelo, como la capacidad de los autobuses y la distancia máxima a caminar por los estudiantes.
2. Definición del modelo: Se diseñó un modelo para la selección de paradas y la generación de rutas, adaptado a una flota heterogénea con restricciones difusas.
3. Resolución mediante metaheurísticas: Se implementaron algoritmos como Algoritmos Genéticos, Colonia de Hormigas y Búsqueda Tabú, seleccionados por su capacidad para manejar la complejidad del problema.
4. Validación experimental y estudios de caso: Se realizaron experimentos computacionales y estudios prácticos para evaluar el desempeño del modelo en términos de reducción de costos y mejora en la planificación de rutas.

Resultados

Se desarrolló un modelo innovador que integra elementos difusos en las restricciones de capacidad de autobuses y la distancia máxima a caminar, proporcionando mayor flexibilidad en la planificación.

Las soluciones generadas muestran una reducción significativa en las distancias recorridas por los autobuses y los costos de transportación, al permitir cierta flexibilidad en las restricciones.

La aplicación del modelo a escenarios reales demostró su viabilidad práctica y su capacidad para adaptarse a condiciones variables del entorno, como tamaños de flota y distribución geográfica.

Discusión

El estudio destaca cómo el uso de optimización difusa y metaheurísticas aborda las limitaciones de enfoques tradicionales del SBRP, como la rigidez en las restricciones y la escalabilidad frente a problemas complejos. La inclusión de elementos difusos permite representar mejor la incertidumbre inherente al entorno real, como la variabilidad en el número de estudiantes y la capacidad de los vehículos.

Además, los resultados obtenidos respaldan la eficacia de los algoritmos metaheurísticos seleccionados, lo que reafirma su relevancia en problemas de optimización combinatoria similares. Sin embargo, se identificaron desafíos, como la dependencia de parámetros específicos y la necesidad de ajustes según el caso de estudio.

Conclusiones

1. Se desarrolló con éxito un modelo para el SBRP que incorpora técnicas de optimización difusa, ofreciendo mayor flexibilidad en la planificación de rutas escolares.

2. El modelo propuesto demuestra su efectividad en la minimización de costos de transporte y en la mejora de la asignación de rutas, adaptándose a flotas heterogéneas y condiciones inciertas.
3. El uso de metaheurísticas resulta fundamental para manejar la complejidad y escala del problema, obteniendo soluciones de alta calidad en tiempos razonables.
4. La metodología puede extenderse a otros problemas de planificación de rutas, como el transporte laboral o logístico, ampliando su aplicabilidad práctica.
5. Se recomienda profundizar en la calibración de parámetros de los algoritmos y explorar enfoques híbridos para mejorar aún más el desempeño del modelo.

Referencias bibliográficas

- [1] R. Newton and W. Thomas, "Design of school bus routes by computer," *Socio-Econ. Plan. Sci.*, vol. 3, pp. 75-85, 1969.
- [2] W. Ellegood, S. Solomon, J. North, and J. Campbell, "School bus routing problem: contemporary trends and research directions," *Omega*, 2019.
- [3] J. Desrosiers, J. Ferland, J. Rousseau, G. Lapalme, and L. Chapleau, "An overview of a school busing system," in *Scientific Management of Transport Systems*, N. Jaiswal, Ed., ed Amsterdam, North-Holland, 1981, pp. 235-243.
- [4] J. Park and B. Kim, "The school bus routing problem. A review.," *European Journal of Operational Research*, vol. 202, pp. 311-319, 2010.
- [5] W. A. Ellegood, J. F. Campbell, and J. North, "Continuous approximation models for mixed load school bus routing," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 77, pp. 182-198, 2015/07/01/ 2015.
- [6] M. Kang, S. Kim, J. Felan, H. Rim, and M. Cho, "Development of a genetic algorithm for the school bus routing problem," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 9, pp. 107-126, 2015.
- [7] L. Sales, C. Sousa, T. Oliveira, and B. Athayde, "Memetic algorithm for the heterogeneous fleet school bus routing problem," *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 144, 2018.
- [8] O. Unsal and T. Yigit, "Using the genetic algorithm for the optimization of dynamic school bus routing problem," *Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, vol. 9, Mayo 2018.
- [9] H. Lingmei, Y. Guifeng, F. Bowen, W. Hongzhou, and G. Weitao, "School bus routing problem based on ant colony optimization algorithm," in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, pp. 1-5.
- [10] B. Yao, Q. Cao, Z. Wang, P. Hu, M. Zhang, and B. Yu, "A two-stage heuristic algorithm for the school bus routing problem with mixed load plan," *Transportation Letters*, vol. 8, pp. 205-219, 2016/08/07 2016.
- [11] N.-a. Mokhtari and V. Ghezavati, "Integration of efficient multi-objective ant-colony and a heuristic method to solve a novel multi-objective mixed load school bus routing model," *Applied Soft Computing*, vol. 68, pp. 92-109, 2018/07/01/ 2018.
- [12] J. Pacheco, R. Caballero, M. Laguna, and J. Molina, "Bi-Objective Bus Routing: An Application to School Buses in Rural Areas," *Transportation Science*, vol. 47, pp. 397-411, 2013.
- [13] P. Aparicio Ruiz, J. Muñuzuri Sanz, and J. Guadix Martín, "Mixed Trips in the School Bus Routing Problem with Public Subsidy," in *Enhancing Synergies in a Collaborative Environment*, P. Cortés, E. Maeso-González, and A. Escudero-Santana, Eds., ed Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 105-113.

- [14] P. Schittekat, J. Kinable, K. Sörensen, M. Sevaux, F. Spieksma, and J. Springael, "A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection," *European Journal of Operational Research*, 2013.
- [15] M. F. Faraj, J. F. Sarubbi, C. M. Silva, M. F. Porto, and N. T. R. Nunes, "A real geographical application for the School Bus Routing Problem," in *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, pp. 2762-2767.
- [16] V. S. de Siqueira, E. N. da Silva, R. V. S. da Silva, and M. L. Rocha, "Implementation of the metaheuristic grasp applied to the school bus routing problem," *International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning*, vol. 6, pp. 137-145, 2016.
- [17] C. Erbao and L. Mingyong, "The open vehicle routing problem with fuzzy demands," *Expert Systems with Applications*, pp. 2405–2411, 2010.
- [18] A. Ebrahimnejad and J. L. Verdegay, *Fuzzy Sets-Based Methods and Techniques for Modern Analytics*: Springer, Cham, 2018.
- [19] J. Brito, F. J. Martínez, J. A. Moreno, and J. L. Verdegay, "Fuzzy approach for Vehicle Routing Problems with fuzzy travel time," in *International Conference on Fuzzy Systems*, 2010, pp. 1-8.
- [20] I. Torres, C. Cruz, and J. L. Verdegay, "Solving the Truck and Trailer Routing Problem with Fuzzy Constraints," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 8, pp. 713-724, 2015/07/04 2015.
- [21] A. Ghasemkhani, R. Tavakkoli-Moghaddam, S. Shahnejat-Bushehri, S. Momen, and H. Tavakkoli-Moghaddam, "An integrated production inventory routing problem for multi perishable products with fuzzy demands and time windows," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, pp. 523-528, 2019/01/01/ 2019.
- [22] A. Giallanza and G. L. Puma, "Fuzzy green vehicle routing problem for designing a three echelons supply chain," *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, p. 120774, 2020/06/20/ 2020.
- [23] S. Zhang, M. Chen, W. Zhang, and X. Zhuang, "Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations," *Expert Systems with Applications*, vol. 145, p. 113123, 2020/05/01/ 2020.