

<https://doi.org/10.47633/0sar0k26>

Carpooling y optimización del flujo vehicular: un análisis de beneficios operacionales en zonas urbanas¹

Carpooling and Traffic Flow Optimization: An Analysis of Operational Benefits in Urban Areas

Carona solidária e otimização do fluxo de tráfego: uma análise dos benefícios operacionais em áreas urbanas

Sarah Priscilla Quesada-Chaves

Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica

<https://ror.org/04zhfrn38>

<https://orcid.org/0009-0005-1334-9556>



prisilla2003@gmail.com

Paolo Induni-Ocampo

Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica

<https://ror.org/04zhfrn38>

<https://orcid.org/0009-0000-7748-4128>



paolo.induniocampo@gmail.com

Recibido 14-10-2025 | Revisado 25-11-2025 | Aceptado 20-1-2026

¹ Parte del contenido textual y la revisión de redacción de este trabajo fue asistida mediante la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI), utilizada para mejorar la claridad, coherencia y estilo académico del texto. Su uso se limitó a funciones de apoyo lingüístico, sin sustituir el criterio ni la autoría de los investigadores.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resumen

La congestión del tráfico en las zonas urbanas causa desafíos para la circulación vehicular eficiente y, a su vez, para la sostenibilidad ambiental. En esta investigación se evaluó el impacto del carpooling mediante el uso de estrategias de optimización. Se combinó un análisis bibliométrico centrado en la temática con un modelo de programación entera lineal que buscó minimizar la cantidad de vehículos requeridos en circulación para cumplir con su objetivo. A través de un conjunto de datos simulados y generados aleatoriamente, y de restricciones de compatibilidad espacial y temporal, se comprobó que es posible reducir considerablemente el sobreuso de vehículos sin comprometer la cobertura o la logística de los viajes. Como consecuencia, se observaron beneficios operacionales y ambientales.

Palabras clave: Asignación de viajes; Carpooling; Movilidad urbana; Optimización matemática; Simulación de tráfico

Abstract

Traffic congestion in urban areas causes challenges for efficient vehicular circulation, and in turn, environmental sustainability. This research evaluates the impact of carpooling through the use of optimization strategies, combining a bibliometric analysis focused on the subject with a linear integer programming model that seeks to minimize the number of vehicles required in circulation to meet its objective. Through a randomly generated simulated data set, and spatial and temporal compatibility restrictions, it was possible to verify that it is possible to considerably reduce vehicle overuse without necessarily compromising trip coverage or logistics. By doing so, operational and environmental benefits can consequently be observed.

Keywords: Carpooling; Mathematical Optimization; Trip Assignment; Traffic Simulation; Urban Mobility



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resumo

A congestão do tráfego nas zonas urbanas gera desafios para a circulação veicular eficiente e, simultaneamente, para a sustentabilidade ambiental. Nesta pesquisa, avalia-se o impacto do carpooling por meio do uso de estratégias de otimização. Combina-se uma análise bibliométrica centrada na temática com um modelo de programação inteira linear que busca minimizar a quantidade de veículos em circulação necessária para atingir seu objetivo. Por meio de um conjunto de dados simulados e gerados aleatoriamente, bem como de restrições de compatibilidade espacial e temporal, foi possível comprovar que é viável reduzir consideravelmente o uso excessivo de veículos sem necessariamente comprometer a cobertura ou a logística das viagens. Como consequência, observam-se benefícios operacionais e ambientais.

Palavras-chave: Alocação de viagens; Carpooling; Mobilidade urbana; Otimização matemática; Simulação de tráfego

Introducción

La congestión del tráfico en las zonas urbanas se trata de uno de los desafíos de mayor relevancia en la actualidad, tanto por su impacto en las vidas cotidianas de las personas circulantes de la vía pública, como para la sostenibilidad ambiental. Bajo estas circunstancias, el concepto de carpooling (compartir vehículos) se presenta como una estrategia potencial ante los problemas que arrastra la congestión vehicular en zonas urbanas, tales como en San José, Costa Rica, donde esta problemática es tanto visible como tangible, hasta convertirse en la realidad diaria de muchas personas. El contexto principal del problema se trata de que las ciudades actuales atraviesan por esta crisis de movilidad y circulación vial, donde se empieza a volver insostenible el uso del vehículo privado e individual. Esta problemática se ve magnificada en entornos y contextos de países con infraestructura vial subdesarrollada en contraste a las necesidades viales actuales y a la cantidad de vehículos que existen dentro del país. Se pretende, dentro del alcance investigativo, evaluar la hipótesis de



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-Compartirlugal 4.0.

que el carpooling pueda reducir considerablemente esta congestión vehicular, sin tener que sacrificar cobertura ni eficiencia.

Marco teórico

La congestión vehicular urbana es un desafío constante que afecta la calidad de vida y el medio ambiente. El carpooling o ride-sharing surge como estrategia para reducir viajes individuales y aprovechar la capacidad ociosa de los automóviles. Sin embargo, su éxito depende de algoritmos que emparejen pasajeros en tiempo real y resuelvan retos de optimización de rutas y ventanas de tiempo. Estos servicios se enmarcan en un mercado bilateral donde usuarios y conductores interactúan mediante plataformas digitales; un marco analítico general permite entender cómo se relacionan la demanda, la oferta, las decisiones operativas de las plataformas y la regulación.

La literatura identifica diversas aproximaciones. Lima Azevedo et al. (2016) desarrollaron una microsimulación con la plataforma SimMobility paramodelar un servicio de movilidad autónoma bajo demanda en Singapur, estimando tamaño de flota, ubicaciones de parqueo y cambios en los patrones de viaje. Cao et al. propusieron un modelo que optimiza las rutas de ride-hailing con restricciones de capacidad y beneficios, resuelto con un algoritmo genético. Gurumurthy y Kockelman, usando datos de telefonía móvil, estimaron en Orlando que hasta 60 % de los desplazamientos individuales podrían combinarse con un aumento de cinco minutos en el tiempo de viaje y que una flota de 120000 vehículos autónomos cubriría casi la mitad de la demanda regional. Smet (2021) desarrolló un metaheurístico de aceptaciótardía que asigna roles de conductor y pasajero de forma flexibley permite caminatas cortas a puntos de recogida, demostrando que la flexibilidad reduce las emisiones de CO₂.

Yu et al. (2021) integraron ride-sharing y transporte público mediante un algoritmo de agrupamiento angular que considera tiempo de conducción, duración total y número de transbordos. A nivel teórico, Zhang y Pavone (2016) modelaron los sistemas de movilidad autónoma como redes de colas cerradas y mostraron que



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-Compartirlgual 4.0.

se puede obtener una política de reequilibrio óptima mediante programación lineal; en Manhattan bastaría con unos 8 000 vehículos autónomos para satisfacer la demanda de taxis. Estas aportaciones evidencian que la optimización, mediante programación lineal, metaheurísticas o modelos estocásticos, es central para evaluar cómo el carpooling reduce congestión, costos y emisiones.

Materiales y métodos

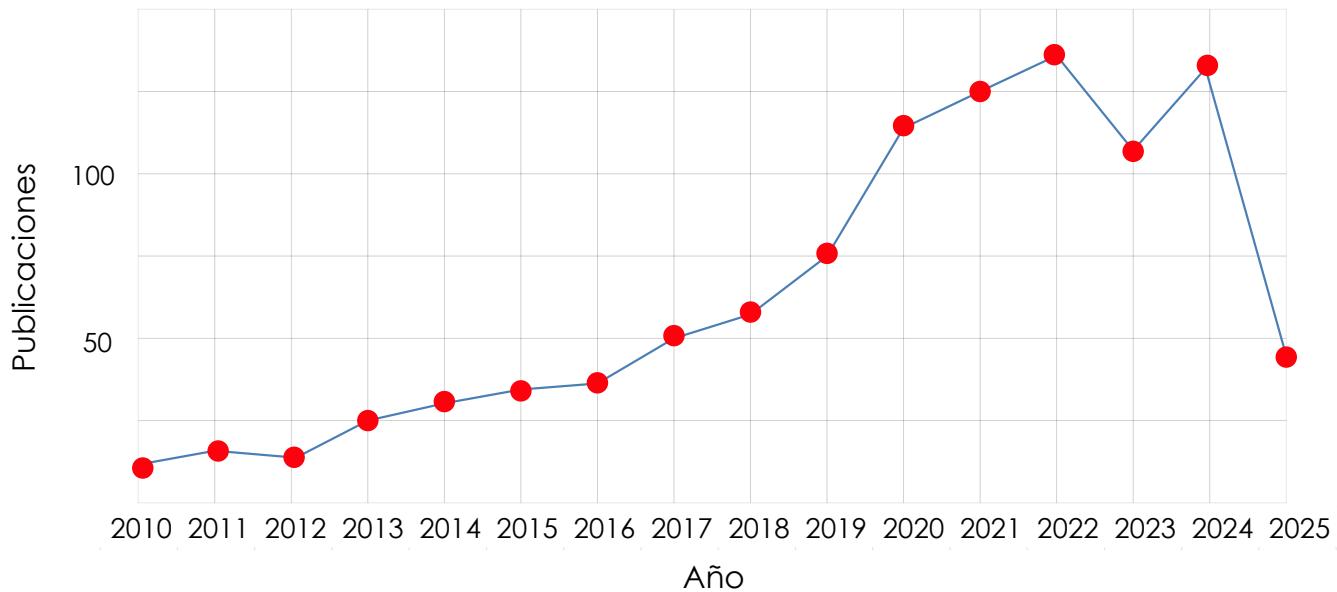
La investigación se desarrolló en dos fases. Primero se realizó un análisis bibliométrico para mapear las tendencias sobre carpooling y ride-sharing. Se consultó Web of Science con términos como "ride-sharing", "carpool", "vehicle routing", "matching algorithms", "traffic optimization" y "emissions", limitando la búsqueda a 2010-2025 y a áreas de ingeniería, transporte, ciencias ambientales y computación. Los registros se analizaron con Bibliometrix para obtener la tendencia anual de publicaciones, palabras clave frecuentes, redes de cocitación y autores influyentes. Específicamente, uno de los gráficos más importantes fue el de tendencia anual de publicaciones sobre carpooling entre 2010 y 2025, ya que aunque haya sido un tema muy popular en la segunda década del siglo XXI, muestra un repunte reciente de interés en la investigación académica (Figura 1).



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Figura 1.

Tendencia anual de publicaciones sobre carpooling entre 2010 y 2025



Fuente: elaboración propia.

Este trabajo se apoya en revisiones previas sobre retos de optimización en ride-sharing y en marcos que describen la dinámica de los sistemas de ridesourcing. En la segunda fase se desarrolló un modelo de programación entera lineal (ILP) para simular escenarios urbanos de carpooling. Se generaron datos sintéticos de 30 usuarios con origen, destino, hora de partida y tolerancia de espera. Con esos datos se construyó una matriz de compatibilidad que identifica pares de usuarios que pueden compartir vehículo según distancia y ventanas temporales. La función objetivo minimiza el número total de vehículos, con restricciones de capacidad (máximo cuatro pasajeros) y de compatibilidad espacio-temporal. Este enfoque sigue trabajos que demuestran que las políticas óptimas de reasignación de flotas pueden formularse como problemas lineales, aunque la literatura también sugiere metaheurísticas para casos de mayor escala. El modelo se implementó en R con las librerías `ompr`, `ompr.roi`, `ROI`, `ROI.plugin.glpk` y `dplyr`, y se resolvió con GLPK. Los parámetros de simulación tomaron en cuenta hallazgos de estudios sobre servicios autónomos y de modelos de optimización de rutas para ride-hailing, adaptados aquí a un contexto de carpooling convencional con datos simulados.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Desarrollo de la propuesta

La propuesta metodológica se centró en la aplicación del modelo de programación entera lineal (ILP) para optimizar el flujo vehicular en un escenario urbano de carpooling. Este enfoque abordó la brecha de conocimiento identificada en la literatura: aunque existen numerosos estudios sobre ride-sharing y movilidad autónoma, pocos han aplicado modelos lineales enteros para evaluar de forma cuantitativa el impacto de compartir vehículos en contextos urbanos de países en desarrollo como Costa Rica.

Así, el estudio aporta una contribución novedosa, al adaptar una formulación matemática rigurosa (común en entornos de transporte avanzado) a un marco de simulación accesible y replicable con recursos abiertos. El modelo considera que cada usuario debe ser asignado a un único vehículo, con una capacidad máxima de cuatro pasajeros. La función objetivo busca minimizar el número total de vehículos utilizados, mientras que las restricciones aseguran la compatibilidad espacial (proximidad entre origen y destino) y temporal (ventanas de inicio y espera).

Esta formulación refleja de forma simplificada los desafíos reales de agrupamiento de pasajeros en plataformas de movilidad compartida, como UberPool o InDriveShare, pero adaptada a un entorno de simulación académica. La generación de datos se basó en un conjunto aleatorio reproducible mediante semillas fijas en R. Los orígenes y destinos se distribuyeron en una cuadrícula urbana hipotética de 10×10 km, mientras que las horas de salida se asignaron en intervalos uniformes de 5 minutos, con tolerancias de espera entre 0 y 15 minutos. Esto permitió evaluar cómo las restricciones temporales afectan la eficiencia del modelo, ofreciendo una base sólida para validar la hipótesis de que el carpooling puede reducir significativamente el número de vehículos sin comprometer la cobertura del servicio. En conjunto, el modelo ILP permitió comprobar de manera cuantitativa el potencial del carpooling como estrategia de mitigación de congestión y emisiones, aportando evidencia replicable y metodológicamente sólida dentro del campo de la optimización del transporte urbano.



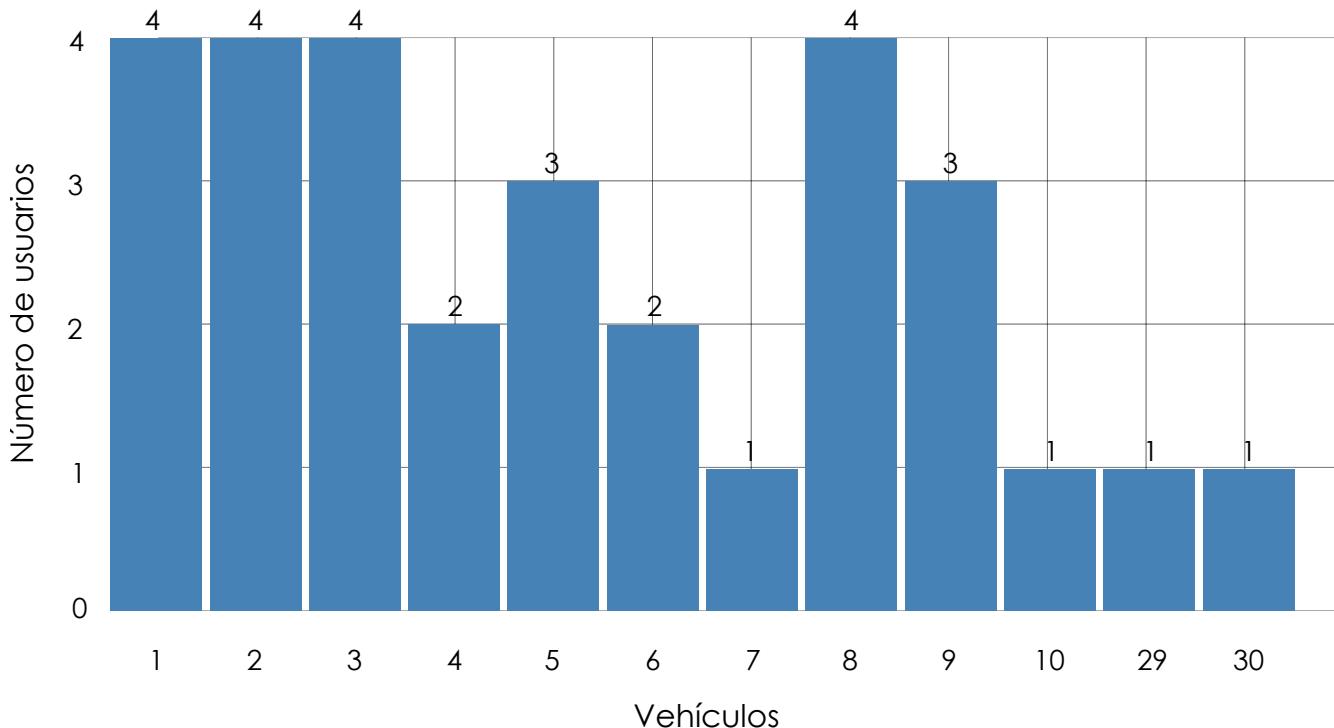
Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Resultados y discusión

1. El modelo logró asignar a 30 usuarios en 12 vehículos, respetando la capacidad de cada vehículo, y realizando el match con compatibilidad.
2. Como podemos observar, el modelo redujo en un 60% la cantidad de vehículos necesarios respecto a un escenario realista, simulado y completamente aleatorio. Estos resultados son coherentes con los hallazgos de Santi et al. (2014), quienes demostraron que una proporción significativa de viajes urbanos puede agruparse sin pérdida sustancial de eficiencia, y con Alonso-Mora et al. (2017), que evidenciaron el potencial de los modelos de asignación dinámica para reducir el número de vehículos en operación manteniendo la calidad del servicio.

Figura 2.

Ocupación de vehículos asignados en el modelo ILP ($n = 30$ usuarios)



Fuente: elaboración propia.



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

3. El modelo se resolvió mediante el solver GLPK en un tiempo computacional razonable, confirmando la eficiencia del enfoque de programación entera lineal frente a métodos más complejos o estocásticos, como los metaheurísticos utilizados por Smet (2021). En conjunto, los resultados respaldan el uso del ILP como herramienta válida para estimar el impacto potencial del carpooling en contextos urbanos donde los datos reales aún son limitados.

Conclusiones

La investigación comprobó la hipótesis de que el carpooling puede disminuir considerablemente la cantidad de vehículos requeridos, logrando una reducción del 60 % bajo restricciones realistas. Se concluyó que esta disminución generó beneficios directos en términos de congestión, emisiones contaminantes y consumo de combustible. Futuros estudios podrían incluir variables dinámicas de tráfico real y ampliar los criterios de compatibilidad para poner a prueba esta hipótesis en entornos más complejos. Metodológicamente, el uso del modelo ILP demostró ser una herramienta eficaz para cuantificar los efectos potenciales del carpooling con recursos computacionales limitados. No obstante, futuras investigaciones podrían complementar este enfoque con herramientas de calidad, como Pareto o Ishikawa, para analizar de manera estructurada las causas principales de congestión y priorizar factores de mejora operativa, lo cual fortalecería la triangulación metodológica del estudio.

Referencias

Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.028>

Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., & Rus, D. (2017). On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(3), 462–467. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611675114>



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-Compartirlugal 4.0.

Cao, Y., Wang, S., & Li, J. (2021). The Optimization Model of Ride-Sharing Route for Ride Hailing Considering Both System Optimization and User Fairness. *Sustainability*, 13(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13020902>

Gurumurthy, K. M., & Kockelman, K. M. (2018). Analyzing the dynamic ride-sharing potential for shared autonomous vehicle fleets using cellphone data from Orlando, Florida. *Computers, Environment and Urban Systems*, 71, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.05.008>

Lima Azevedo, C., Marczuk, K., Raveau, S., Soh, H., Adnan, M., Basak, K., Loganathan, H., Deshmunkh, N., Lee, D.-H., Fazzoli, E., & Ben-Akiva, M. (2016). Microsimulation of demand and supply of autonomous mobility-on-demand A Lisbon case study. *Transportation Research Procedia*, 19, 276–290. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.081>

Ma, S., Zheng, Y., & Wolfson, O. (2014). Real-time city-scale taxi ridesharing. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 7(27), 1782–1795.

Santi, P., Resta, G., Szell, M., Sobolevsky, S., Strogatz, S. H., & Ratti, C. (2014). Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(37), 13290–13294. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403657111>

Smet, P. (2021). Ride sharing with flexible participants: A metaheuristic approach for large-scale problems. *International Transactions in Operational Research*, 28(1), 91–118. <https://doi.org/10.1111/itor.12737>

Vazifeh, M. M., Santi, P., Resta, G., Strogatz, S. H., & Ratti, C. (2018). Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility. *Nature*, 557(7706), 534–538. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0095-1>

Wang, H., & Yang, H. (2019). Ridesourcing systems: A framework and review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 129, 122–155. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.009>



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-Compartirlgual 4.0.

Yu, X., Miao, H., Bayram, A., Yu, M., & Chen, X. (2021). Optimal routing of multimodal mobility systems with ride-sharing. *International Transactions in Operational Research*, 28(3), 1164–1189. <https://doi.org/10.1111/itor.12870>

Zhang, R., & Pavone, M. (2016). Control of robotic mobility-on-demand systems: A queueing-theoretical perspective. *The International Journal of Robotics Research*, 35(1–3), 186–203. <https://doi.org/10.1177/0278364915581863>



Nuestros artículos son publicados bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Atribucion-NoComercial-CompartirIgual 4.0.