

Los Indicadores de Desempeño de la Distribución Urbana de Mercancías: Un Análisis Bibliométrico

Performance Indicators for Urban Goods Distribution: A Bibliometric Analysis

Artículo/Article

ID: e157

Publicado en línea
/Published online:
05/02/2024

Disclaimer: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of ACI and/or the editor(s). ACI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.

Alejandro Molina Villa¹ 

Cristian Giovanni Gómez Marín¹ 

Conrado Augusto Serna-Uran¹ 

¹Instituto Tecnológico Metropolitano, Departamento de Calidad y Producción, Medellín, Colombia.

Email: alejandromolina244949@correo.itm.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.157>

Abstract

This paper presents a systematic literature review of Urban Freight Transport (UFT) in last mile logistics, using the PRISMA methodology, and a bibliometric analysis based on statistical assessments of both quality and quantity. The search was conducted in Scopus and Web of Science databases, identifying trends, co-authorships, and patterns over time. An annual increase in publications is highlighted, along with recurring keywords, influential authors, and relevant journals in the field of urban deliveries. A classification taxonomy with ten different performance index for UFT with three evaluation types and their applications was proposed. This quantitative and qualitative analysis provides a robust foundation for future research in urban logistics and goods distribution.

Keywords: City logistics, Urban Freight Transport, Performance Index, Performance Factors

Resumen

Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura sobre Distribución Urbana de Mercancías (DUM) en logística de última milla, utilizando la metodología PRISMA y un análisis bibliométrico basado en análisis estadísticos de calidad y cantidad. Se realizaron búsquedas en bases de datos como Scopus y Web of Science, identificando tendencias, coautorías y patrones a lo largo del tiempo. Se destaca un crecimiento anual en las publicaciones, junto con palabras clave recurrentes, autores influyentes y revistas relevantes en el ámbito de las entregas urbanas. Se propone una taxonomía de clasificación con diez diferentes tipos de indicadores de desempeño en la DUM con tres métodos diferentes de evaluación y su campo de aplicación. Este análisis cuantitativo y cualitativo proporciona una base sólida para futuras investigaciones en logística urbana y distribución de mercancías.

Palabras clave: Logística de ciudad, Distribución Urbana, Indicadores de Desempeño, Factores de Desempeño

La demanda de entregas en la última milla ha experimentado un notable incremento, generando desafíos significativos en términos económicos, sociales y ambientales [1, 2]. El comercio en línea ha sido uno de los grandes impulsores de este incremento, lo que ha resultado en una mayor frecuencia y flexibilidad de los envíos y entregas a pequeña escala. El aumento en la frecuencia de envíos produce un incremento en el número de viajes realizados por vehículos medianos y pequeños en el transporte de carga urbano [3], generando ineficiencias en las entregas de última milla [4]. Además, conlleva a problemas de congestión vial, impacto ambiental y costos elevados de transporte [5].

En Estados Unidos, este aumento en la actividad de transporte ha suscitado preocupaciones entre las que se encuentra el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 24%, situando al sector como el principal contribuyente a las emisiones en comparación con otros sectores [6] y el elevado costo del transporte en la última milla dentro de la cadena de suministro [7], [8]. Este panorama ha motivado la necesidad de abordar el impacto ambiental asociado [9], las externalidades negativas generadas por el movimiento de mercancías en entornos urbanos, así como aliviar la congestión vehicular en estas áreas [10], que mejore la eficiencia en las operaciones de transporte considerando a las partes interesadas involucradas y la importancia de abordar estos desafíos en términos de ciudades sostenibles e inteligentes.

En este contexto, se ha resaltado la relevancia de explorar alternativas de modo de transporte, como el uso de drones, vehículos eléctricos y bicicletas, lo que ha dado lugar a un enfoque multimodal en la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) [11,12]. En la literatura actual se observa una brecha en el abordaje de la evaluación de indicadores que permitan medir y optimizar la DUM bajo una perspectiva de sostenibilidad. Dicha brecha se torna aún más relevante dado el incremento exponencial en la demanda de productos a través de plataformas digitales [13]. Esta revisión sistemática de la literatura proporciona una visión completa y objetiva de los indicadores de desempeño abordados y empleados en la DUM. Adicionalmente explora diferentes alternativas de solución y evaluación de estos indicadores.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la introducción, en la Sección 2 se expone la metodología seguida en el artículo, el análisis bibliométrico se muestra en la Sección 3 en las secciones 4 y 5 se detallan los resultados. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

Materiales y métodos

Una revisión de la literatura eficiente implica consultar diferentes fuentes de información y seguir unas etapas que permitan identificar contribuciones en el área de estudio [14]. Además de que construye conocimiento de manera confiable, la revisión sistemática de la literatura crea una base firme para progresar en el conocimiento y hacer más fácil el desarrollo de la teoría [15].

Este estudio se propone dos objetivos clave. El primero se centra en identificar los principales indicadores de desempeño utilizados en la DUM. El segundo objetivo busca identificar los métodos propuestos para medir y evaluar estos indicadores. Este trabajo pretende evidenciar la diversidad de indicadores y metodologías empleadas

en la evaluación del rendimiento en la logística de última milla y la DUM. Para alcanzar los objetivos se desarrolla la metodología PRISMA de manera similares a como lo plantea [16]. Con esta metodología se llevan a cabo una serie de etapas que brindan una guía progresiva para rastrear la información necesaria de manera eficiente y con mayor precisión con relación al proceso de búsqueda.

En esta revisión sistemática de la literatura se utilizó una estrategia de búsqueda mediante una ecuación que incluía palabras clave relevantes con alcance temporal de delimitado a partir del año 2013 hasta junio de 2023. La ecuación de búsqueda diseñada fue la siguiente: (“city logistic” OR “last mile” OR “urban freight transport” OR “outbound logistics”) AND (“performance measure” OR goal OR objective) AND (simulation OR optimization OR simulating OR optimazing)). Esta ecuación se consultó en las bases de datos Scopus y Web of Science. Los resultados encontrados en Scopus fueron 346 documentos y en Web of Science 175 documentos. En la figura 1 se presenta el flujograma relacionado al proceso de rastreo bibliográfico.

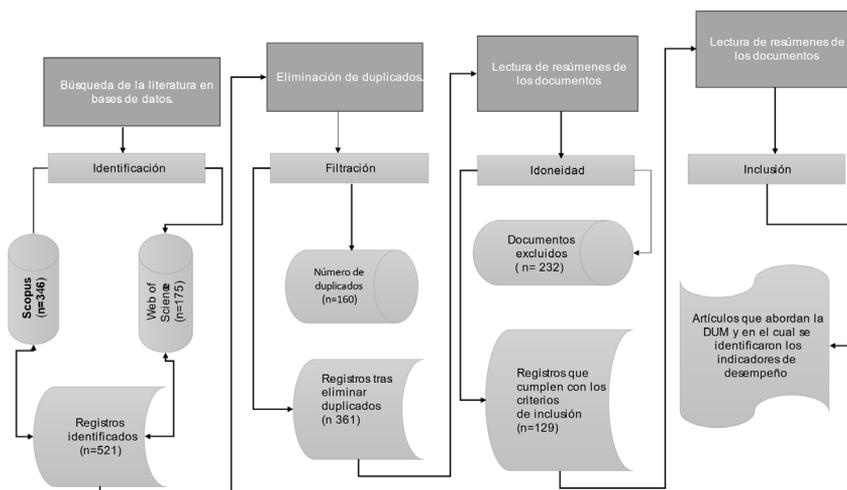


FIGURA 1. Diagrama de flujo metodología de la revisión sistemática de literatura

En el proceso de búsqueda, se aplicaron criterios de inclusión rigurosos, empleando un análisis bibliométrico basado en cualificar y cuantificar los datos, los cuales permitieron identificar problemas relacionados con la DUM, considerando diversas modalidades de transporte de carga. Se excluyeron investigaciones relacionadas con desastres naturales y logística humanitarias, documentos que tienen que ver con redes de distribución en el contexto de telecomunicaciones, el diseño de redes de conectividad de internet. El transporte de pasajeros, y de eslabones distintos a la última milla en la cadena de suministro o problemas de localización de instalaciones empresariales y distribución de mercancías en áreas no urbanas. Se seleccionaron 129 documentos que cumplieron con los criterios de inclusión, mientras que 232 fueron excluidos.

Resultados

Los resultados en la investigación se corresponden a dos momentos: los primeros resultados son derivados del análisis bibliométrico-basados a través del total de



registros obtenidos directamente de las bases de datos, y el segundo momento se corresponde a la revisión sistemática de la literatura con los registros seleccionados.

Producción sobre la DUM y sus indicadores de desempeño

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea

/Published online:

05/02/2024

En el número de publicaciones por año, se observa una tendencia creciente sobre las publicaciones en logística de última milla y los indicadores de desempeño. En la Fig. 2, se puede observar el comportamiento de las publicaciones durante 10 años de registros bibliométricos.

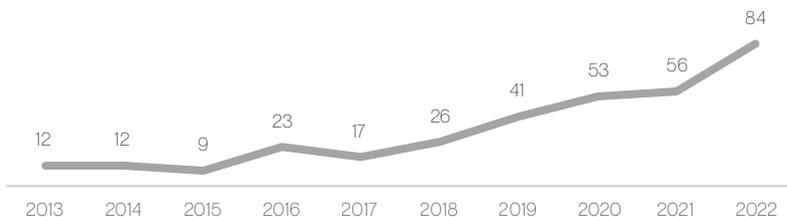


FIGURA 2. Representa el comportamiento anual de las publicaciones durante los diez años observados.

Se puede notar que a partir del 2018 la tendencia a crecer es constante y, además, en el año 2019 el incremento es bastante significativo comparado con los años anteriores, manteniendo el aumento hasta el 2022, donde este último año mencionado, registra el mayor aumento de las publicaciones con respecto a su año anterior en 28 publicaciones más con respecto a las publicaciones por revistas de los 361 artículos revisados en la investigación. En este caso, *Transportation Research Procedia* y *Sustainability (Switzerland)*, fueron las dos revistas con más de 10 publicaciones con respecto a las demás. En cuanto al análisis de calidad, se puede afirmar que estas dos revistas impacto en la han tenido el mayor número de citas con 459 y 409 respectivamente (ver Fig. 3). Las 15 revistas más citadas presentaron aproximadamente el 50% del total de citas, evidenciando la influencia que tienen estas revistas en las publicaciones sobre la DUM y la logística de última milla.

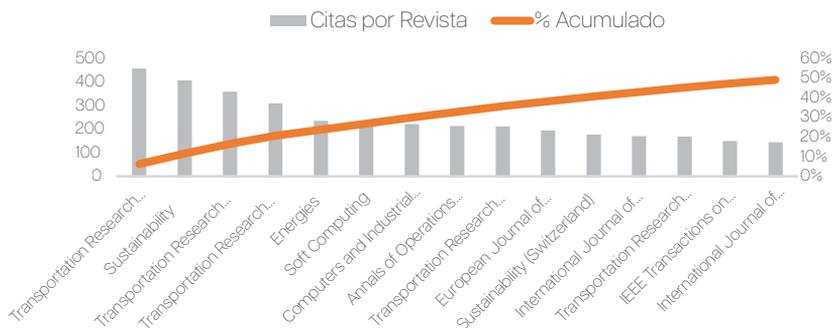


FIGURA 3. Citas por Revista.

Red de Coautoría

Un total de 589 autores que participaron en las publicaciones sobre indicadores en la DUM, de los cuales un solo autor publicó 7 veces, dos autores 4 veces, 11 autores 3 veces, 33 autores dos veces y 542 solo hicieron una publicación. La Fig. 4 representa la red de coautoría en las diferentes las investigaciones. Cabe destacar que el autor que presentó más colaboración con otros autores es Wang Yin Hai, colaborando éste con 11 autores diferentes. Otros de los autores que presentaron una colaboración conjunta y productiva con otros autores fueron Liu Dan y Kaiser Evangelos I., con 10 publicaciones en colaboración cada uno respectivamente.

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea

/Published online:

05/02/2024

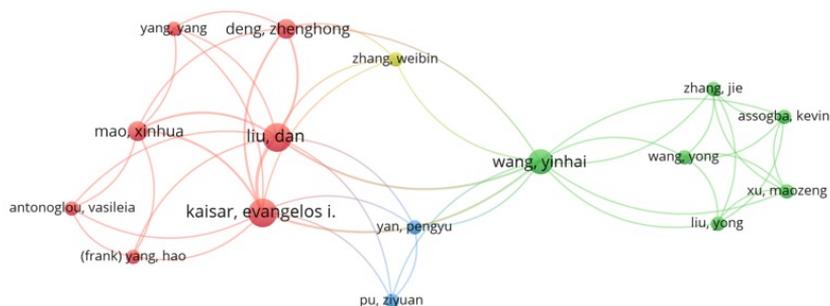


FIGURA 4. Visualización de la red de coautoría. Fuente: Propia utilizando VOSviewer

Red de Coocurrencia

El análisis de clústeres revela áreas clave de investigación, el cual puede observarse en la Fig. 5. El clúster amarillo aborda logística y entregas, especialmente el uso de drones, considerando costos, transporte público y simulación de sistemas. El verde se centra en diseño y optimización, gestionando logística, rutas, impacto ambiental y comercio electrónico. El rojo concentra ubicación de instalaciones, asignación de recursos y distribución de última milla, con énfasis en equidad y optimización multicriterio. El morado se relaciona con el desarrollo de algoritmos, incluyendo búsqueda en vecindarios amplios y sincronización de operaciones. El azul se dedica a transporte por carretera, diseño de redes logísticas y resolución de problemas de rutas y vehículos, incorporando el problema del vendedor viajero y técnicas de metaheurísticas. Las palabras clave *optimization*, *Traveling Salesman Problem*, *Model*, *Impact*, y *Unmanned Aerial Vehicle* resaltan enfoques claves, indicando su importancia y frecuencia en la investigación.

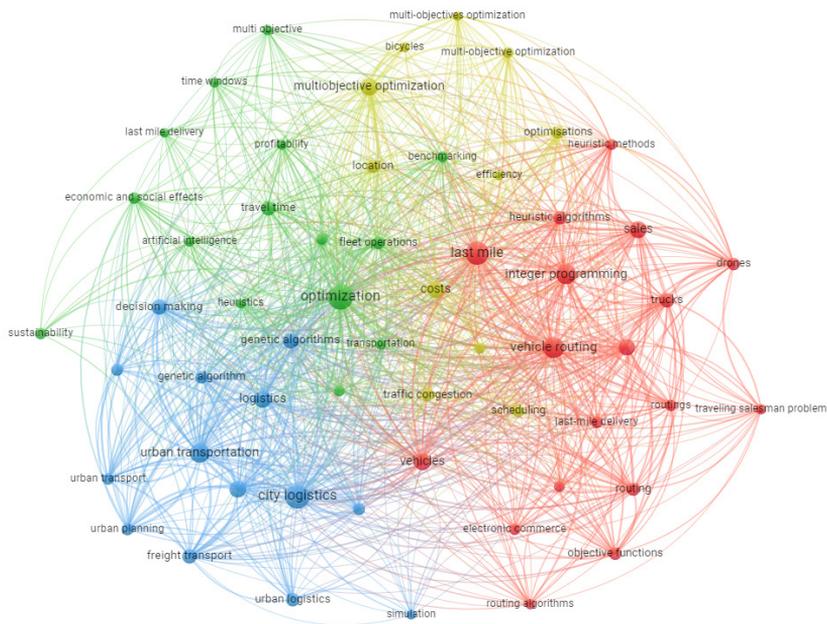


FIGURA 5. Palabras claves del conjunto de documentos revisados.

Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño fueron asociados a una categorización basada en el análisis de la literatura. Esta categorización se puede observar en la Fig. 6 con la frecuencia de utilización del indicador en los diferentes documentos. Cada categoría fue conformada por un conjunto de indicadores, y clasificados de acuerdo con el contexto de uso y el tipo de solución.



FIGURA 6. Categoría de indicadores.

Indicadores de Tiempo

En logística de última milla, indicadores clave para evaluar la eficiencia temporal son el *Tiempo de Viaje*, que cuantifica el tiempo de desplazamiento vehicular [17], y la *Duración de Entrega*, representando el tiempo total de operaciones [18]. Por su parte [19], trabajó el tiempo de entrega repartidores que realizan la entrega caminando.

La duración total de todas las operaciones de entrega y tareas relacionadas desde el inicio hasta la finalización (*Makespan*), es abordado por [20,21]. Los ahorros en el *makespan* evalúan mejoras al introducir operaciones alternativas [22,23]. El *Tiempo de Entrega* indica el tiempo que toma entregar un paquete desde el centro de consolidación hasta el destino final [24] y la *Latencia Total* [25], representa el tiempo total necesario para completar todos los pedidos desde su liberación hasta su entrega. Adicionalmente, [26] aborda el *Tiempo de Transporte Actual*, que significa el tiempo real requerido para llevar a cabo el proceso de transporte, incluyendo el tiempo de viaje y posibles retrasos.

Indicadores de Tiempo de Espera

En este tipo de indicadores de hallaron factores como el *Tiempo de Espera*, que es el tiempo que se pasa aguardando para entregar las mercancías dentro de las ventanas de tiempo especificadas [27]. También se refiere al tiempo que la carga debe esperar para ser recogida [28] utilizó este concepto como el tiempo que un vehículo debe esperar en cada parada durante la realización de tareas como carga, descarga, interacción con clientes y otras operaciones. El tiempo de espera también fue utilizado en la preparación de pedidos como lo hacen recogida [29]. Por su parte recogida [20] trabajó el *Tiempo de Hovering de Vehículos*, como el tiempo que los vehículos pasan en espera antes de que se les asigne una tarea específica. Por último, [22,30] identificaron el *Retraso Total en la Entrega* para medir la cantidad total de tiempo que cada cliente debe esperar más allá de sus ventanas de tiempo de entrega especificadas para recibir sus productos.

Impacto ambiental

Estos indicadores incluyen métricas como la sostenibilidad ambiental, que se refiere a la capacidad de reducir el impacto ambiental de la cadena de suministro y el buen uso de los recursos naturales y la adopción de prácticas sostenibles en las operaciones logísticas y productivas [31]. También se enfocan en la emisión de contaminantes atmosféricos, como gases de escape de vehículos, que afectan la calidad del aire y la salud pública en áreas urbanas [13]

Algunos autores que trabajaron este tipo de indicadores como [32] destacaron la *Sostenibilidad Ambiental* como la capacidad de reducir el impacto ambiental y adoptar prácticas sostenibles. [33] propuso el *Porcentaje de Emisiones de Carbono respecto a la Carga Total* (CO_2 / TC) para evaluar la intensidad de carbono en operaciones de distribución, mientras que [3, 34,35], se enfocaron en la *Emisión de CO_2* , representada por la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como resultado de las actividades de transporte.

En cuanto al impacto ambiental y sostenibilidad energética, [36] midieron el *Consumo de Combustible*, como la cantidad consumida de combustible durante el proceso de transporte. [37] analizaron la *Eficiencia Energética de los vehículos de reparto* medida como el consumo de energía de los vehículos eléctricos y la capacidad de sus baterías [38] evaluaron el *Impacto en el Uso del Suelo* derivado de las operaciones en la DUM. Además, [31] contribuyen con la *Reducción del Ruido* en entregas urbanas para un entorno más silencioso.

Finalmente [3] ofrecieron perspectivas valiosas en la comparación de *Combustible entre Diesel y gas licuado de petróleo (GLP)*, lo cual genera la comprensión de la sostenibilidad desde la perspectiva del tipo de combustible utilizado.

Impacto económico

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea

/Published online:

05/02/2024

En el análisis de indicadores relacionados con el impacto económico en la DUM, se distinguen los siguientes autores. [39] aborda los *costos económicos* vinculados directamente con la adquisición y operación de vehículos de distribución, abarcando aspectos como la compra, el mantenimiento y los costos energéticos. [33] se focalizaron en los elementos fijos asociados con la operación de vehículos de distribución denominado (*Costo Fijo de los Vehículos (FC)*). A su vez, [40] contribuyeron con el *Costo Operativo Promedio*, evaluando los gastos promedio para operar vehículos autónomos en entregas urbanas.

Entre los costos asociados a la ruta, los indicadores utilizados fueron: el *costo por entrega (CPD)*, utilizado por [29] como un indicador esencial para evaluar los costos asociados con la entrega de pedidos. [41] aportaron con el *Travel Cost*, que calcula el costo total de viaje de todos los vehículos en el servicio de entrega. Por otro lado, [19] evaluaron el costo global vinculado con el enrutamiento de vehículos mediante el *Costo Total de Ruta*.

Como indicadores financieros, [42] proponen el *KPI Financiero (Key Performance Indicator)*, basado en datos financieros de transportistas. [43] examinaron los *Ingresos (Revenue)* generados por el servicio de distribución urbana, considerando la entrega de paquetes. [44] trabajó las ganancias como un índice de rentabilidad. Además, [32] usaron con métricas clave como la *Relación Beneficio-Costo (BCR)* y el *Valor Presente Neto (VPN)*, evaluando la viabilidad económica de proyectos logísticos urbanos. En esta misma dirección [39,40] evalúan la rentabilidad del sistema de transporte de carga en áreas urbanas el *Costo Total del Sistema Promedio* como un indicador integral que considera los costos totales en la distribución urbana.

Eficiencia operativa y rendimiento operacional

En la DUM, diversos indicadores han sido identificados para evaluar la eficiencia y rendimiento de las operaciones logísticas. [30] resaltó la importancia de la *distancia total recorrida por todos los vehículos para completar entregas*. [45] consideraron la *distancia recorrida durante la operación*, medida durante el consumo de combustible. [46] subrayaron la influencia de la *densidad de la ruta* en la eficiencia de la planificación de la ruta, calculada como la proporción entre el tiempo de viaje y el tiempo de carga y descarga. [29] definieron la *distancia de viaje* como la distancia total recorrida para realizar entregas.

En términos de *eficiencia operativa*, [47] resaltaron la importancia de la eficiencia en tareas como el ensamblaje y la preparación de pedidos en las operaciones de última milla. [20] describieron la *programación eficiente de tareas* como la optimización de la secuencia y horario de tareas en cada parada del camión, incluyendo la gestión de vehículos y la interacción con los clientes. [17] abordaron la *eficiencia en el movimiento de los vehículos* durante las operaciones, evaluando la *velocidad promedio* y su *variabilidad*.

En cuanto al rendimiento, [26] trabajaron el indicador de *rendimiento*, que evalúa la *velocidad real en comparación con la velocidad planificada*, midiendo la eficiencia en el transporte durante las operaciones. [48] investigaron cómo la *variación de la relación de velocidad* afecta indicadores de desempeño, como los costos totales de entrega. [25] definen la *velocidad de los vehículos* en las entregas como la velocidad a la que el vehículo se desplaza durante su entrega.

En el contexto del impacto vial, [35] proponen la *Tasa de Accidentes* para medir la frecuencia y severidad de accidentes relacionados con el transporte de carga, contribuyendo a mejorar la seguridad vial. [49] introduce el *Riesgo de Seguridad al Transportar Valores*, evaluando el riesgo asociado al transportar cargas valiosas en rutas. [50] midieron el *Gradient Longitudinal (LG)*, que se refiere a la pendiente de carreteras urbanas, crucial para influir en la velocidad de conducción, costos de transporte y seguridad. [8] presenta la *Tasa de Participación de Incidentes*, centrada en minimizar incidentes relacionados con el transporte de carga para mejorar la seguridad en las operaciones.

En cuanto a la congestión vehicular, [51] evalúan el *Tráfico Congestionado* y *Emisiones de CO₂*, enfocándose en el impacto ambiental de la congestión vehicular en operaciones de última milla y las emisiones de CO₂ asociadas. [52] trataron el *Impacto en la Congestión del Tráfico*, utilizando datos sobre la velocidad del tráfico y variaciones para entender cómo el transporte de carga afecta la congestión del tráfico. [53] midieron la *Congestión del Tráfico* mediante la frecuencia y duración de embotellamientos, evaluando cómo afecta la eficiencia de la última milla y la logística en general. [54] abordaron el *Número Promedio de Vehículos Estacionados Ilegalmente*, midiendo el impacto del estacionamiento ilegal en la congestión vehicular. [55] introdujeron el *Alivio de la Congestión del Tráfico (TAR)*, cuantificando la reducción de la congestión causada por el transporte de carga. Finalmente, [56] consideraron la *Eficiencia de Tráfico*, centrándose en mejorar el flujo de tráfico en la ciudad para reducir tiempos de viaje y emisiones.

Gestión de infraestructura

En la gestión de infraestructura, el indicador *Tasa de Ocupación* fue utilizado por [57] para evaluar la eficiencia y uso de áreas de entrega o instalaciones logísticas urbanas. [8] también lo aplicó para estimar la utilización de la infraestructura de carreteras por parte de vehículos de carga, traduciéndola en unidades equivalentes de automóviles de pasajeros (PCU). [58] utilizan la *Disponibilidad de Infraestructura* para evaluar la capacidad y facilidad con la que se utilizan los recursos necesarios para operaciones en la red logística. Por su parte [8] midió la necesidad de recursos para respaldar eficientemente las operaciones logísticas y de transporte, incluyendo lugares de entrega, rotación de vehículos y áreas de estacionamiento bajo el indicador *Demanda de Infraestructura de Transporte de Mercancías*.

se refiere la necesidad de recursos para respaldar eficientemente las operaciones logísticas y de transporte, incluyendo lugares de entrega, rotación de vehículos y áreas de estacionamiento.

En la infraestructura para vehículos eléctricos [11] introdujeron el indicador de *Infraestructura de Carga para Vehículos Eléctricos (EFV)*, centrándose en la disponibilidad y distribución de puntos de carga. También, [59] resaltaron la importancia de evaluar la *Disponibilidad de la Infraestructura de Carga*, crucial para determinar la viabilidad de la operación de vehículos eléctricos modulares. Además, [48] cuantificaron el número de estaciones de vehículos para evaluar la cantidad de ubicaciones donde pueden operar los vehículos.

Utilización de los recursos

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea
/Published online:

05/02/2024

Para evaluar la gestión de la utilización de los recursos se han utilizado algunos indicadores, entre ellos el concepto de *Vehículo Equivalente* [60], que compara el número de vehículos que utilizan los subcontratistas que operan de manera tradicional y aquellos que adoptan enfoques sostenibles. Esta métrica se calcula convirtiendo unidades de transporte, como bicicletas a furgonetas, y se determina como la suma del tiempo de trabajo de cada ciclista, dividido por las horas de trabajo de un subcontratista tradicional en un turno completo.

Los mismos autores utilizan la Minimización del *Número Total de Trabajadores y Vehículos*, que busca optimizar las operaciones de última milla al reducir el número total de trabajadores y vehículos necesarios para realizar entregas a los clientes. Por otro lado, la *Tasa de Uso Compartido de Vehículos (ST Rate)* [61], se refiere a la tasa de recorridos en los que un vehículo tiene una ubicación de partida diferente de la de llegada, indicando que se completó mediante el uso compartido de flota. Este indicador evalúa el nivel de uso compartido de flotas y cómo varía en diferentes escenarios.

El *Balanceo de Ruta* indica la distribución justa de la carga de trabajo de los empleados entre vehículos en operaciones de entrega, optimizando rutas y tareas para prevenir fatiga y agotamiento [9]. Por su parte [62] evaluaron la posibilidad de reducción de la *carga de trabajo de los conductores*, lo cual permite la realización de entregas simultáneas y la paralelización de tareas.

Otros

En el análisis de la DUM, se destacaron indicadores clave como la *Densidad de Población*, evaluada por [17], que ofrece perspectivas sobre la concentración urbana. *Las Relaciones Comerciales*, según [63], influyen en la colaboración efectiva en la cadena de suministro evaluada a través de factores como confianza, lealtad, oportunismo, estética de la información y alianzas corporativas.

El *OEE (Overall Equipment Effectiveness)*, examinado por [26], el cual mide la eficacia de los sistemas de transporte. Además, el Impacto en la Salud Pública (DALYs), indicado por [38] evalúa las repercusiones ambientales y de salud por la exposición a emisiones de transporte.

Indicadores de Calidad

La evaluación de las operaciones en la DUM involucró indicadores fundamentales relacionados con la calidad del servicio y su impacto ambiental. Para medir la capacidad de satisfacer la demanda de los clientes y puntos de recogida [31,64] usan el indicador *Cobertura de Clientes*. El *Factor de Carga (Calidad)*, propuesto [26,45], para medir la proporción de pedidos entregados dentro de las ventanas de tiempo especificadas en comparación con el total de pedidos entregados. La *Satisfacción de la Demanda*, que cuantifica la diferencia entre la demanda de pedidos y la capacidad de los vehículos, así como la *experiencia del cliente*, donde se midió la satisfacción general del cliente con el servicio de entrega, considerando factores como el tiempo de entrega, la puntualidad y la calidad de los productos entregados son abordados por [29].

En términos de *calidad ambiental*, la *Calidad de Vida*, según [9], examina cómo las operaciones de transporte afectan la calidad de vida de los ciudadanos, considerando aspectos como la contaminación del aire, el ruido, la seguridad vial y la experiencia de los visitantes en zonas antiguas de las ciudades. El *Objetivo de Nivel de Servicio*, respaldado por [65], contribuyó a mejorar la calidad de vida al reducir la contaminación y mejorar la eficiencia logística.

Indicadores de Solución del Modelo y Eficiencia Computacional

La calidad de las soluciones de los modelos orientados a solucionar problemas de la DUM se evalúa mediante diversos indicadores. La *Desviación Porcentual*, como propuesto por [66] para calcular la diferencia porcentual entre los valores obtenidos en soluciones robustas y determinísticas, ofreciendo una evaluación de la robustez y calidad bajo diferentes niveles de incertidumbre y tamaños de problemas. El *Hypervolume Indicator (HV)*, según [67], mide la precisión y diversidad de las soluciones generadas por algoritmos, indicando la eficacia en la generación de soluciones de alta calidad.

Además, los indicadores de rendimiento y eficiencia computacional son cruciales. El *Throughput*, medido en mensajes por milisegundo y propuesto por [68], indica la capacidad del sistema para procesar y transmitir información eficientemente. Otros indicadores incluyen el *Tiempo de Ejecución de la Heurística* para medir la eficiencia computacional [69-71] el *Número de Mejores Soluciones Encontradas* para evaluar la capacidad del algoritmo en comparación con otros métodos [72] la *Desviación Porcentual Relativa (RPD)* para cuantificar la precisión de las soluciones y el *Promedio de Desviaciones Porcentuales Relativas (ARPD)* para resumir el rendimiento promedio a lo largo de instancias de prueba [2] y el *Tiempo de Cálculo* para evaluar el tiempo necesario para resolver cada instancia del problema.

Métodos Empleados en la Literatura para Medir y Evaluar Los Indicadores de Desempeño en la DUM

Métodos de Aproximación (Heurísticas y Metaheurísticas)

En la literatura se encuentran diversos métodos metaheurísticos y heurísticos, como enfoques computacionales para resolver problemas de optimización y búsqueda. Estos métodos son estrategias generales diseñadas para guiar la exploración eficiente del espacio de soluciones en problemas complejos. En el contexto logístico, se han identificado y utilizado varios de estos métodos, cada uno adaptándose a diferentes desafíos y contextos específicos.

Heurísticos

Entre los métodos identificados, se encuentran el *Algoritmo de Búsqueda Local y de Vecindad Grande (LNS)* para el PLRP-PS [19] el *Algoritmo SBPI para problemas MDP* el *Algoritmo VLSN para problemas de gran escala* [66] *Recocido Simulado (SA)* y *Variable Búsqueda de vecindario Variable (VNS)* [20] *Tabu Search (TS)* con el enfoque *Búsqueda tabú Multi-Punto (MSTS)* [73] *Algoritmo de Operador de Inserción* para servicios dinámicos de compartición de viajes [74] *Algoritmo de Agrupamiento* para asignación eficiente de vehículos [41], y el *Esperar y Regresar ("WR" y "WI")* para la toma de decisiones en tiempo activo de solicitudes solicitud [75].

Metaheurísticas

Las metaheurísticas como estrategias de optimización en espacios complejos, ofrecen flexibilidad y eficiencia para solucionar problemas en el contexto logístico. Entre este tipo se encontraron en la revisión sistemática las siguientes: Algoritmo *HY-NSGA-II* K. [76] y *HY-NSGA-II* [77] se destacan por su enfoque evolutivo multiobjetivo. Los *Algoritmos Genéticos*, inspirados en la evolución biológica [35, 36, 65]. Por otro lado, los *Algoritmos Inmunológicos (IA)* e *Inmunológico Híbrido (HIA)* incorporan conceptos de inmunidad y enfermedades epidémicas [2].

La *Optimización por Enjambre de Partículas (PSO)* modela partículas virtuales para buscar soluciones óptimas [3, 55]. La *Optimización Heurística (Black Hole)* se inspira en agujeros negros para adaptarse y optimizar soluciones. *Colonia de Hormigas (ACO)*, basada en el comportamiento de hormigas, guía la búsqueda de rutas óptimas [37]. La *Optimización Híbrida Basada en Biogeografía (HBBO)* combina elementos de biogeografía y optimización para resolver problemas específicos [64].

Por último, Las estrategias de optimización logística incluyen la *Optimización Multiobjetivo*, que busca soluciones óptimas bajo múltiples criterios [79].

Exactos

El Modelo *Multinomial Logit (MNL)* se aplica a elecciones discretas con varias opciones, como el método de entrega [80]. Las *Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP)* modelan cambios en funciones con respecto a múltiples variables [81]. La *Programación Estocástica* aborda decisiones bajo incertidumbre, centrándose en la variabilidad de datos como la demanda o costos [82]. En la *Optimización Combinatoria* se buscan las mejores combinaciones de elementos o alternativas [83] mientras que la *Programación Lineal Entera Mixta (MILP)* utiliza variables enteras y continuas para resolver problemas complejos [67]. La *Optimización Estocástica (Sample Average Approximation - SAA)* aborda la incertidumbre en preferencias y decisiones [44]

Experimentación

En la experimentación, se recurre a diversas técnicas de simulación. Los *Modelos de Elección Discreta (DCMs)* analizan preferencias mediante encuestas [83]. La *Simulación Dinámica* observa la evolución de sistemas complejos en el tiempo [57, 84] El *Modelo MARS* de la Universidad de Tecnología de Viena aborda interacciones en entornos metropolitanos [85]. La *Simulación por Autómatas Celulares* modela actividades de agentes [86]. La Simulación de Eventos Discretos es útil para sistemas con eventos en momentos específicos [54]. Finalmente, la Simulación Microscópica considera interacciones individuales, especialmente en la dinámica del tráfico [56].

La Tabla 1 presenta una taxonomía de los indicadores de desempeño, proporcionando una visión integral de los resultados de la investigación. Las columnas de la tabla se componen de 4 elementos cruciales: los indicadores enumerados como se indicó, los autores que abordaron los indicadores, el tipo de problema planteado y los métodos particulares de solución.

TABLA 1. Taxonomía de los indicadores de desempeño

Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución
1, 9	De Oliveira Mota, 2021	Asignación	Aproximación	2, 6, 7, 17	Paul & Doreswamy, 2021	Ruteo	Experimentación
1, 6	Salama & Srinivas, 2022b	Múltiple objetivo	Aproximación	1, 6, 17	Ratnagiri et al., 2022	Múltiple objetivo	Aproximación
3, 7	González-Varona et al., 2020b	Ruteo	Experimentación	1, 19	Betti Sorbelli et al., 2022	Múltiple objetivo	Aproximación
1, 3, 4, 5, 7	Muñoz-Villamizar et al., 2019	Gestión de flotas	Exacto	8, 19	Xu et al., 2022	Múltiple objetivo	Aproximación
1, 3, 5, 6, 19	Tan et al., 2019	Ruteo	Aproximación	1, 2, 6, 19	Le Colleter et al., 2023	Ruteo	Aproximación
4, 8, 17	Gruzauskas et al., 2023	Múltiple objetivo	Experimentación	2, 6, 7, 14, 19	Fehn et al., 2023b	Otros	Experimentación
1, 2	Zeng et al., 2020	Ruteo	Aproximación	1, 2, 3, 19	Trott et al., 2021	Múltiple objetivo	Exacto
6, 7, 19	Ren et al., 2021	Múltiple objetivo	Aproximación	1, 6, 8, 14, 17, 19	Chu et al., 2023	Ruteo	Aproximación
2, 8, 12, 17	Muñoz-Villamizar et al., 2018	Múltiple objetivo	Exacto	6, 16, 11	Hiremath et al., 2013	Diseño de red	Aproximación
7, 14, 15, 19	Luo et al., 2022	Ruteo	Aproximación	19	Jiang, Zang, Alghoul, et al., 2022	Diseño de red	Aproximación
8, 10, 16	Muriel et al., 2022	Ruteo	Experimentación	1, 6, 16	Ko et al., 2018	Otros	Aproximación
3, 8, 14	Perboli & Rosano, 2019	Gestión de flotas	Experimentación	4, 6, 17	S. feng Ji et al., 2019	Asignación	Exacto
3, 6	Validi et al., 2020	Múltiple objetivo	Exacto	6, 16	Sawik et al., 2022	Localización	Exacto
19	Amiri & Farvaresh, 2023	Gestión de flotas	Exacto	6, 19	Jiang et al., 2022	Ruteo	Aproximación
6, 10, 11	Hu et al., 2020	Localización	Exacto	7, 17, 19	Y. H. Lin et al., 2020	Localización	Exacto
19, 12	Yuan et al., 2021	Ruteo	Aproximación	4, 6, 8, 17	Das et al., 2023	Asignación	Exacto
1, 3, 6, 8, 13, 16	Emberger & Pfaffenbichler, 2020	Otros	Experimentación	3, 4, 10, 14, 17	Giret et al., 2018	Ruteo	Probabilístico

1. Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia; 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 18. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional

Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema	Tipo de solución
1, 6, 7, 14	Jacyna, 2013	Otros	Exacto	6, 7, 16, 19	C. Wang et al., 2021	Múltiple objetivo	Probabilístico
3, 6, 17	Durand et al., 2013	Gestión de flotas	Experimentación	3, 4, 7, 14, 19	Kunnapapdeelert et al., 2022	Ruteo	Aproximación
2, 8, 16, 19	Ehmke & Campbell, 2014)	Ruteo	Exacto	19	Guimarães, L R., 2022	Ruteo	Aproximación
7, 8, 10, 16	Anand et al., 2014	Otros	Experimentación	6, 7, 14, 17	Lu et al., 2022	Múltiple objetivo	Experimentación
3, 4, 6	Vishwanath et al., 2014	Otros	Exacto	2, 6, 7, 8, 12, 19	Haripriya et al., 2022	Ruteo	Aproximación
12, 14	Biondi et al., n.d.	Localización	Exacto	1, 5, 6, 19	Borghetti et al., 2022	Diseño de red	Exacto
5, 7, 10, 14, 16, 19	Crainic Errico F, 2016	Diseño de red	Probabilístico	19	Ji et al., 2017	Localización	Exacto
1, 2, 3, 5, 6, 7, 8	Melo et al., 2017	Ruteo	Experimentación	4, 5, 6, 19	Betti Sorbelli et al., 2022	Múltiple objetivo	Exacto
1, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 13	Thaller et al., 2017	Gestión de flotas	Experimentación	1, 4, 8, 12, 19	C. Wang et al., 2021)	Ruteo	Exacto
1, 8, 10, 13	Iwan & Malecki, 2017	Gestión de flotas	Experimentación	1, 2, 6, 8, 10, 12, 15	Miguel et al., 2019	Ruteo	Aproximación
4, 7, 14	Stinson et al., 2019	Gestión de flotas	Experimentación	1, 6	K. Wang et al., 2020	Ruteo	Aproximación
1, 2, 8, 11	Moufad et al., 2019	Gestión de flotas	Experimentación	6, 7, 8, 15, 19	Li et al., 2022	Ruteo	Exacto
14, 6	Gaudron et al., 2020	Distribución	Experimentación	1, 2, 8, 14	Salama & Srinivas, 2022	Múltiple objetivo	Exacto
1, 2, 6, 8, 11	Moufad & Jawab, 2020	Distribución	Experimentación	2, 7	Wang et al., 2023	Ruteo	Aproximación
3, 6, 10	Anderluh et al., 2021	Ruteo	Aproximación	6, 16, 19	Luo et al., 2021	Ruteo	Aproximación
5, 7, 14, 19	Senardlens de Grancy, 2015	Ruteo	Aproximación	1, 2, 3, 8, 9	Resat, 2020	Diseño de red	Exacto
7, 19	Arbabi et al., 2021	Ruteo	Aproximación	3, 6, 19	Woody et al., 2022	Gestión de flotas	Exacto
3, 4, 5, 6, 18	Olapiriyakul & Nguyen, 2019	Diseño de red	Exacto	1, 19	Yu et al., 2022	Ruteo	Aproximación

1.Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia; 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 18. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional

Indicadores		Autor	Tipo de problema	Tipo de solución	Indicadores	Autor	Tipo de problema
1, 17, 19	Schermer et al., 2019;	Ruteo	Exacto	10, 11, 12, 19	Ezquerro et al., 2020	Múltiple objetivo	Experimentación
7, 19	Liu, Yan, et al., 2021b	Ruteo	Exacto	1, 7, 17, 18, 19	Baudel et al., 2016	Ruteo	Aproximación
19	Y. Lin et al., 2022b	Localización	Aproximación	1, 6, 7, 9, 12	Bozkaya et al., 2017	Ruteo	Exacto
1, 14	Tamke & Buscher, 2021	Ruteo	Exacto	1, 3, 6, 12, 15	Rezgui et al., 2019	Asignación	Aproximación
1, 6, 17	Ensafian	Ruteo	Exacto	19	Jiang et al., 2019	Ruteo	Aproximación
1, 4, 7, 19	Raj & Murray, 2020b	Ruteo	Aproximación	3, 4, 8, 14, 19	Akkad & Bányai, 2020	Múltiple objetivo	Aproximación
19	Dang et al., 2022, Nguyen et al., 2022 ^a	Ruteo	Exacto	3, 6	Li et al., 2021	Múltiple objetivo	Aproximación
6	Xia et al., 2021	Ruteo	Exacto	1, 3, 6	Yeomans, 2021	Ruteo	Aproximación
1, 3, 6, 7, 8, 13, 14	Liu et al., 2023	Ruteo	Aproximación	3, 8, 9, 17, 18	Aloui Hamani & Delahoche, 2021	Diseño de red	Aproximación
3, 5, 6, 13, 17	Wang et al., 2017	Múltiple objetivo	Exacto	6, 17	Hamid et al., 2023	Múltiple objetivo	Aproximación
3, 6, 8, 12, 15, 16	2020, Liu, D	Ruteo	Aproximación	4, 8, 14, 16	Sacramento et al., 2019	Ruteo	Aproximación
3, 6, 16	Liu et al., 2021	Múltiple objetivo	Aproximación	4, 6, 8, 17	Chen & Wang, 2020	Ruteo	Aproximación
6, 15, 19	Hu et al., 2020a	Diseño de red	Aproximación				

1. Indicadores de Tiempo de viaje y eficiencia; 2. Indicadores de Tiempo de Espera; 3. Indicadores de Emisiones y Contaminantes; 4. Indicadores de Impacto Ambiental y Sostenibilidad Energética; 5. Costos Económicos; 6. Costo de Ruta y Financieros; 7. Eficiencia de Desplazamiento; 8. Eficiencia Operativa; 9. Indicadores de seguridad; 10. Indicadores de Congestión Vehicular; 11. Tasa de Ocupación; 12. Disponibilidad de la Infraestructura; 13. Uso de recursos humanos y de vehículos; 14. Balanceo de ruta; 15. Otros indicadores; 16. Calidad del Servicio de Entrega; 17. Impacto en la Calidad de Vida y Medio Ambiente; 18. Indicadores de rendimiento y eficiencia computacional

Conclusiones

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea
/Published online:
05/02/2024

El análisis bibliométrico de la literatura sobre los indicadores de desempeño de logística de última milla y la DUM, revela un crecimiento significativo en la investigación, con un aumento cada vez mayor. La colaboración científica es notable y refleja la superioridad que existe entre los países que predominan el campo de investigación. El análisis de clústeres señala áreas clave, como logística y entregas, diseño y optimización, y transporte por carretera. En esta revisión sistemática de la literatura se puede observar una amplia variedad de indicadores que destacan la complejidad de las operaciones de la DUM, evidenciando la interconexión y relevancia de estos factores. La combinación de indicadores detallados y métodos avanzados de evaluación subraya la importancia crítica de medir y evaluar estas métricas para lograr la adaptabilidad y optimización necesarias en la logística moderna. La diversidad de enfoques resalta la imperativa necesidad de soluciones personalizadas para afrontar de manera efectiva los desafíos específicos en la cadena de suministro y distribución.

En última instancia, el vertiginoso avance tecnológico, especialmente en campos como la inteligencia artificial, vehículos autónomos y análisis de datos, resalta la imperativa necesidad de adaptarse de manera continua a estas tendencias. La incorporación efectiva de estas tecnologías emergentes no solo puede revolucionar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones logísticas, sino que también tiene el potencial de transformar radicalmente la calidad de vida en entornos urbanos. A través de un enfoque transformador, las condiciones de habitabilidad en las ciudades pueden mejorar significativamente, ofreciendo soluciones innovadoras que optimicen la movilidad, reduzcan la congestión y minimicen los impactos ambientales. Este cambio hacia entornos urbanos más habitables se basa en la capacidad de la tecnología para proporcionar soluciones inteligentes y sostenibles que no solo optimizan la logística, sino que también influyen positivamente en la experiencia diaria de los residentes urbanos.

Agradecimientos

Se agradece al programa Jóvenes Investigadores del Instituto Metropolitano de Medellín por el apoyo financiero para el desarrollo de este trabajo.

Contribuciones de los autores

Cristian Gómez y Conrado Serna concibieron la investigación; Alejandro Molina y Cristian Gómez desarrollaron la metodología y realizaron el trabajo metodológico, realizaron la búsqueda bibliográfica, realizaron el respectivo análisis bibliométrico y redactaron el manuscrito; Cristian Gómez revisó críticamente el contenido intelectual del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en relación a la publicación de este artículo.

Referencias

Artículo/Article
ID: 157

Publicado en línea
/Published online:
05/02/2024

- [1] Assis, T. F. de, Abreu, V. H. S. de, Costa, M. G. da, y D'Agosto, M. de A. (2022). Methodology for Prioritizing Best Practices Applied to the Sustainable Last Mile—The Case of a Brazilian Parcel Delivery Service Company. *Sustainability*, 14(7), 3812. doi: <https://doi.org/10.3390/su14073812>
- [2] Liu, D., Deng, Z., Zhang, W., Wang, Y. y Kaiser, E. I. (2021). Design of sustainable urban electronic grocery distribution network. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 145–157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.051>
- [3] Kunnappadeelert, S., Johnson, J. V. y Phalitnonkiat, P. (2022). Green last-mile route planning for efficient e-commerce distribution. *Engineering Management in Production and Services*, 14(1), 1–12. doi: <https://doi.org/10.2478/emj-2022-0001>
- [4] Lin, Y., Wang, Y., Lee, L. H. y Chew, E. P. (2022). Profit-maximizing parcel locker location problem under threshold Luce model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102541. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102541>
- [5] Ensafian, H., Zare Andaryan, A., Bell, M. G. H., Glenn Geers, D., Kilby, P. y Li, J. (2023). Cost-optimal deployment of autonomous mobile lockers co-operating with couriers for simultaneous pickup and delivery operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 146, 103958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103958>
- [6] Woody, M., Craig, M. T., Vaishnav, P. T., Lewis, G. M. y Keoleian, G. A. (2022). Optimizing future cost and emissions of electric delivery vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 26(3), 1108–1122. doi: <https://doi.org/10.1111/jiec.13263>
- [7] González-Varona, J. M., Villafañez, F., Acebes, F., Redondo, A. y Poza, D. (2020). Reusing Newspaper Kiosks for Last-Mile Delivery in Urban Areas. *Sustainability*, 12(22), 9770. doi: <https://doi.org/10.3390/su12229770>
- [8] Kaszubowski, D. (2019). A Method for the Evaluation of Urban Freight Transport Models as a Tool for Improving the Delivery of Sustainable Urban Transport Policy. *Sustainability*, 11(6), 1535. doi: <https://doi.org/10.3390/su11061535>
- [9] Reyes-Rubiano, L., Serrano-Hernandez, A., Montoya-Torres, J. R. y Faulin, J. (2021). The Sustainability Dimensions in Intelligent Urban Transportation: A Paradigm for Smart Cities. *Sustainability*, 13(19), 10653. doi: <https://doi.org/10.3390/su131910653>
- [10] Otte, T. y Meisen, T. (2021). A Reference Framework for the Performance-Based Decision Support of City Authorities in Urban Freight Transport. *2021 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1109/ICISS53185.2021.9533210>
- [11] Galati, A., Giacomarra, M., Concialdi, P. y Crescimanno, M. (2021). Exploring the feasibility of introducing electric freight vehicles in the short food supply chain: A multi-stakeholder approach. *Case Studies on Transport Policy*, 9(2), 950–957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.04.015>
- [12] Zhang, R., Dou, L., Xin, B., Chen, C., Deng, F. y Chen, J. (2023). A Review on the Truck and Drone Cooperative Delivery Problem. *Unmanned Systems*, 1–25. doi: <https://doi.org/10.1142/S2301385024300014>
- [13] Nenni, M. E., Sforza, A. y Sterle, C. (2019). Sustainability-based review of urban freight models. *Soft Computing*, 23(9), 2899–2909. doi: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03786-x>
- [14] Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B. y Roccotelli, M. (2018). A Review of Last Mile Logistics Innovations in an Externalities Cost Reduction Vision. *Sustainability*, 10(3), 782. doi: <https://doi.org/10.3390/su10030782>
- [15] Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- [16] Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. y Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>

- [17] Russo, F. y Comi, A. (2016). Urban freight transport planning towards green goals: Synthetic environmental evidence from tested results. *Sustainability (Switzerland)*, 8(4). doi: <https://doi.org/10.3390/su8040381>
- [18] Trott, M., Baur, N.-F., Auf der Landwehr, M., Rieck, J. y von Viebahn, C. (2021). Evaluating the role of commercial parking bays for urban stakeholders on last-mile deliveries – A consideration of various sustainability aspects. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127462. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127462>
- [19] Le Colleter, T., Dumez, D., Lehuédé, F. y Péton, O. (2023). Small and large neighborhood search for the park-and-loop routing problem with parking selection. *European Journal of Operational Research*, 308(3), 1233–1248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.007>
- [20] Salama, M. R. y Srinivas, S. (2022). Collaborative truck multi-drone routing and scheduling problem: Package delivery with flexible launch and recovery sites. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164, 102788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102788>
- [21] Wang, Y., Tian, X. y Liu, D. (2017). Optimization of urban multi-level logistics distribution network based on the perspective of low carbon. 2017 *Chinese Automation Congress (CAC)*, 4896–4900. doi: <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243646>
- [22] Schermer, D., Moeini, M. y Wendt, O. (2019). A hybrid VNS/Tabu search algorithm for solving the vehicle routing problem with drones and en route operations. *Computers & Operations Research*, 109, 134–158. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.04.021>
- [23] De Oliveira Mota, D. (2021). Dynamic dispatch algorithm proposal for last-mile delivery vehicle. *IEEE Latin America Transactions*, 19(10), 1618–1623. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9477223>
- [24] Ko, S., Cho, S. y Lee, C. (2018). Pricing and Collaboration in Last Mile Delivery Services. *Sustainability*, 10(12), 4560. doi: <https://doi.org/10.3390/su10124560>
- [25] Sacramento, D., Pisinger, D. y Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 289–315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.018>
- [26] Muñoz-Villamizar, A., Santos, J., Montoya-Torres, J.R. y Jaca, C. (2018). Using OEE to evaluate the effectiveness of urban freight transportation systems: A case study. *International Journal of Production Economics*, 197, 232–242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.011>
- [27] Resat, H. G. (2020). Design and Analysis of Novel Hybrid Multi-Objective Optimization Approach for Data-Driven Sustainable Delivery Systems. *IEEE Access*, 8, 90280–90293. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994186>
- [28] Fatnassi, E., Chaouachi, J. y Klibi, W. (2015). Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 440–460. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.016>
- [29] Paul, S. y Doreswamy, G. (2021). Simulation and Optimization Framework for On-Demand Grocery Delivery. 2021 *Winter Simulation Conference (WSC)*, 1–12. doi: <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715480>
- [30] Wang, Y., Ropke, S., Wen, M. y Bergh, S. (2023). The mobile production vehicle routing problem: Using 3D printing in last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 305(3), 1407–1423. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.038>
- [31] Gruzaukas, V., Burinskiene, A. y Krisciunas, A. (2023). Application of Information-Sharing for Resilient and Sustainable Food Delivery in Last-Mile Logistics. *Mathematics*, 11(2), 303. doi: <https://doi.org/10.3390/math11020303>
- [32] Regué, R. y Bristow, A. L. (2013). Appraising Freight Tram Schemes: A Case Study of Barcelona. *EJTIR Issue*, 13(1), 56–78. www.ejtir.tbm.tudelft.nl

- [33] Tan, Y., Deng, L., Li, L. y Yuan, F. (2019). The capacitated pollution routing problem with pickup and delivery in the last mile. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 31(4), 1193–1215. doi: <https://doi.org/10.1108/APJML-06-2018-0217>
- [34] Jiang, L., Chang, H., Zhao, S., Dong, J. y Lu, W. (2019). A Travelling Salesman Problem With Carbon Emission Reduction in the Last Mile Delivery. *IEEE Access*, 7, 61620–61627. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915634>
- [35] Aloui, A., Hamani, N. y Delahoche, L. (2021). An integrated optimization approach using a collaborative strategy for sustainable cities freight transportation: A Case study. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103331. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103331>
- [36] Akkad, M. Z. y Bányai, T. (2020). Multi-Objective Approach for Optimization of City Logistics Considering Energy Efficiency. *Sustainability*, 12(18), 7366. doi: <https://doi.org/10.3390/su12187366>
- [37] Betti Sorbelli, F., Corò, F., Das, S. K., Palazzetti, L. y Pinotti, C. M. (2022). On the Scheduling of Conflictual Deliveries in a last-mile delivery scenario with truck-carried drones. *Pervasive and Mobile Computing*, 87, 101700. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2022.101700>
- [38] Olapiriyakul, S. y Nguyen, T. T. (2019). Land use and public health impact assessment in a supply chain network design problem: A case study. *Journal of Transport Geography*, 75, 70–81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.01.011>
- [39] Muñoz-Villamizar, A., Quintero-Araújo, C. L., Montoya-Torres, J. R. y Faulin, J. (2019). Short- and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks: a case study. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 22(3), 229–252. doi: <https://doi.org/10.1080/13675567.2018.1513467>
- [40] Lu, M., Huang, C. y Teng, J. (2022). Multi-agent Simulation for Online Fresh Food Autonomous Delivery. *Xitong Fangzhen Xuebao / Journal of System Simulation*, 34(6), 1185–1195. doi: <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-1050>
- [41] Ratnagiri, M., O'Dwyer, C., Beaver, L. E., Bang, H., Chalaki, B. y Mallikopoulos, A. A. (2022). A Scalable Last-Mile Delivery Service: From Simulation to Scaled Experiment. *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 4163–4168. doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC55140.2022.9921797>
- [42] Gaudron, A., Tamayo, S. y Fortelle, A. de La. (2020). Interactive simulation for collective decision making in city logistics. *Transportation Research Procedia*, 46, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.176>
- [43] Fehn, F., Engelhardt, R., Dandl, F., Bogenberger, K. y Busch, F. (2023). Integrating parcel deliveries into a ride-pooling service—An agent-based simulation study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.103580>
- [44] Horner, H., Pazour, J. y Mitchell, J. E. (2021). Optimizing driver menus under stochastic selection behavior for ridesharing and crowdsourced delivery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 153, 102419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102419>
- [45] Manchella, K., Haliem, M., Aggarwal, V. y Bhargava, B. (2022). PassGoodPool: Joint Passengers and Goods Fleet Management With Reinforcement Learning Aided Pricing, Matching, and Route Planning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 3866–3877. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3128877>
- [46] Ehmke, J. F. y Campbell, A. M. (2014). Customer acceptance mechanisms for home deliveries in metropolitan areas. *European Journal of Operational Research*, 233(1), 193–207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.028>
- [47] Guzenko, A. y Guzenko, N. (2022). Process optimization for last mile logistics. *Transportation Research Procedia*, 63, 1700–1707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.184>
- [48] Wang, C., Lan, H., Saldanha-da-Gama, F. y Chen, Y. (2021). On Optimizing a Multi-Mode Last-Mile Parcel Delivery System with Vans, Truck and Drone. *Electronics*, 10(20), 2510. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10202510>

- [49] Bozkaya, B., Salman, F. S. y Telciler, K. (2017). An adaptive and diversified vehicle routing approach to reducing the security risk of cash-in-transit operations. *Networks*, 69(3), 256–269. doi: <https://doi.org/10.1002/net.21735>
- [50] Huang, D. y Han, M. (2021). An Optimization Route Selection Method of Urban Oversize Cargo Transportation. *Applied Sciences*, 11(5), 2213. doi: <https://doi.org/10.3390/app11052213>
- [51] Sawik, B., Serrano-Hernandez, A., Muro, A. y Faulin, J. (2022). Multi-Criteria Simulation-Optimization Analysis of Usage of Automated Parcel Lockers: A Practical Approach. *Mathematics*, 10(23), 4423. doi: <https://doi.org/10.3390/math10234423>
- [52] Baudel, T., Dablanc, L., Alguar-Melgarejo, P. y Ashton, J. (2016). Optimizing Urban Freight Deliveries: From Designing and Testing a Prototype System to Addressing Real Life Challenges. *Transportation Research Procedia*, 12, 170–180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.056>
- [53] Šego, D., Hinić, M. L. y Poljičak, A.-M. (2020). Methods of Goods Delivery to the Historic Core of the City of Šibenik During the Tourist Season. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*, 11(1), 88–98. doi: <https://doi.org/10.2478/logi-2020-0009>
- [54] Ezquerro, S., Moura, J. L. y Alonso, B. (2020). Illegal Use of Loading Bays and Its Impact on the Use of Public Space. *Sustainability*, 12(15), 5915. doi: <https://doi.org/10.3390/su12155915>
- [55] Hu, W., Dong, J., Hwang, B., Ren, R. y Chen, Z. (2020). Hybrid optimization procedures applying for two-echelon urban underground logistics network planning: A case study of Beijing. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106452. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106452>
- [56] Muriel, J. E., Zhang, L., Fransoo, J. C. y Perez-Franco, R. (2022). Assessing the impacts of last mile delivery strategies on delivery vehicles and traffic network performance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 144, 103915. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103915>
- [57] Moufad, I., Jawab, F. y Bouklata, A. (2019). A simulation framework to study the impacts of loading/unloading areas on the urban traffic. *2019 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUEA)*, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUEA.2019.8907304>
- [58] Hiremath, N. C., Sahu, S. y Tiwari, M. K. (2013). Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(6), 1071–1084. doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0635-8>
- [59] Rezgui, D., Chaouachi Siala, J., Aggoune-Mtalaa, W. y Bouziri, H. (2019). Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 537–550. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.001>
- [60] Perboli, G. y Rosano, M. (2019). Parcel delivery in urban areas: Opportunities and threats for the mix of traditional and green business models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99, 19–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.006>
- [61] Xia, Y., Zeng, W., Xing, X., Zhan, Y., Tan, K. H. y Kumar, A. (2023). Joint optimisation of drone routing and battery wear for sustainable supply chain development: a mixed-integer programming model based on blockchain-enabled fleet sharing. *Annals of Operations Research*, 327(1), 89–127. doi: <https://doi.org/10.1007/s10079-021-04459-5>
- [62] Tamke, F. y Buscher, U. (2021). A branch-and-cut algorithm for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 144, 174–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.11.011>
- [63] Lagin, M., Håkansson, J., Nordström, C., Nyberg, R. G. y Öberg, C. (2022). Last-mile logistics of perishable products: a review of effectiveness and efficiency measures used in empirical research. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 50(13), 116–139. doi: <https://doi.org/10.1108/IJRDM-02-2021-0080>

- [64] Jiang, L., Zang, X., Alghoul, I. I. Y., Fang, X., Dong, J. y Liang, C. (2022). Scheduling the covering delivery problem in last mile delivery. *Expert Systems with Applications*, 187, 115894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115894>
- [65] Li, S., Liang, Y., Wang, Z. y Zhang, D. (2021). An Optimization Model of a Sustainable City Logistics Network Design Based on Goal Programming. *Sustainability*, 13(13), 7418. doi: <https://doi.org/10.3390/su13137418>
- [66] HariPriya, K. y Ganesan, V. K. (2022). Solving Large Scale Vehicle Routing Problems with Hard Time Windows under Travel Time Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 233–238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.394>
- [67] Li, J., Fang, Y. y Tang, N. (2022). A cluster-based optimization framework for vehicle routing problem with workload balance. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108221>
- [68] Gómez-Marín, C. G., Mosquera-Tobón, J. D. y Serna-Urán, C. A. (2023). Integrating Multi-agent System and Microsimulation for Dynamic Modeling of Urban Freight Transport. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 51(4), 409–416. doi: <https://doi.org/10.3311/PPtr.21024>
- [69] Guimarães, L. R., de Sousa, J. P. y Prata, B. de A. (2022). Variable fixing heuristics for the capacitated multicommodity network flow problem with multiple transport lines, a heterogeneous fleet and time windows. *Transportation Letters*, 14(2), 84–93. doi: <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1815143>
- [70] Chen, F. y Wang, Y. (2020). Downward compatible loading optimization with inter-set cost in automobile outbound logistics. *European Journal of Operational Research*, 287(1), 106–118. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.029>
- [71] Raj, R. y Murray, C. (2020). The multiple flying sidekicks traveling salesman problem with variable drone speeds. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102813. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102813>
- [72] Nguyen, M. A., Dang, G. T.-H., Hà, M. H. y Pham, M.-T. (2022). The min-cost parallel drone scheduling vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 299(3), 910–930. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.008>
- [73] Luo, Z., Poon, M., Zhang, Z., Liu, Z. y Lim, A. (2021). The Multi-visit Traveling Salesman Problem with Multi-Drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128, 103172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103172>
- [74] Xu, Y., Tong, Y., Shi, Y., Tao, G., Xu, K. y Li, W. (2019). An Efficient Insertion Operator in Dynamic Ridesharing Services. *2019 IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE), 2019-April*, 1022–1033. doi: <https://doi.org/10.1109/ICDE.2019.00095>
- [75] Yu, H., Luo, X. y Wu, T. (2022). Online pickup and delivery problem with constrained capacity to minimize latency. *Journal of Combinatorial Optimization*, 43(5), 974–993. doi: <https://doi.org/10.1007/s10878-020-00615-y>
- [76] Wang, K., Yuan, B., Zhao, M. y Lu, Y. (2020). Cooperative route planning for the drone and truck in delivery services: A bi-objective optimisation approach. *Journal of the Operational Research Society*, 71(10), 1657–1674. doi: <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1621671>
- [77] Miguel, F., Frutos, M., Tohme, F. y Babey, M. M. (2019). A Decision Support Tool for Urban Freight Transport Planning Based on a Multi-Objective Evolutionary Algorithm. *IEEE Access*, 7, 156707–156721. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949948>
- [78] Bányai, T. (2018). Real-Time Decision Making in First Mile and Last Mile Logistics: How Smart Scheduling Affects Energy Efficiency of Hyperconnected Supply Chain Solutions. *Energies*, 11(7), 1833. doi: <https://doi.org/10.3390/en11071833>
- [79] Ji, Y., Gu, S. y Yu, Z. (2017). Bi-level multi-objective optimization model for last mile delivery using a discrete approach. *Journal of Difference Equations and Applications*, 23(1–2), 179–190. doi: <https://doi.org/10.1080/10236198.2016.1210607>

- [80] Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R. y Barabino, B. (2022). The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy. *Sustainability*, 14(3), 1766. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031766>
- [81] Keimer, A., Laurent-Brouty, N., Farokhi, F., Signargout, H., Cvetkovic, V., Bayen, A. M. y Johansson, K. H. (2018). Information Patterns in the Modeling and Design of Mobility Management Services. *Proceedings of the IEEE*, 106(4), 554–576. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2800001>
- [82] Crainic, T. G., Errico, F., Rei, W. y Ricciardi, N. (2016). Modeling Demand Uncertainty in Two-Tier City Logistics Tactical Planning. *Transportation Science*, 50(2), 559–578. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0606>
- [83] Chu, H., Zhang, W., Bai, P. y Chen, Y. (2023). Data-driven optimization for last-mile delivery. *Complex & Intelligent Systems*, 9(3), 2271–2284. doi: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00293-1>
- [84] Le Pira, M., Marcucci, E., Gatta, V., Inturri, G., Ignaccolo, M. y Pluchino, A. (2017). Integrating discrete choice models and agent-based models for ex-ante evaluation of stakeholder policy acceptability in urban freight transport. *Research in Transportation Economics*, 64, 13–25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.08.002>
- [85] Thaller, C., Niemann, F., Dahmen, B., Clausen, U. y Leerkamp, B. (2017). Describing and explaining urban freight transport by System Dynamics. *Transportation Research Procedia*, 25, 1075–1094. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.480>
- [86] Emberger, G. y Pfaffenbichler, P. (2020). A quantitative analysis of potential impacts of automated vehicles in Austria using a dynamic integrated land use and transport interaction model. *Transport Policy*, 98, 57–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.014>
- [87] Iwan, S. y Malecki, K. (2017). Utilization of cellular automata for analysis of the efficiency of urban freight transport measures based on loading/unloading bays example. *Transportation Research Procedia*, 25, 1021–1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.476>
- [88] Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C. y Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and 'grey zone' customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940–958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- [89] Arbabi, H., Nasiri, M. M. y Bozorgi-Amiri, A. (2021). A hub-and-spoke architecture for a parcel delivery system using the cross-docking distribution strategy. *Engineering Optimization*, 53(9), 1593–1612. doi: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1808973>
- [90] Mohamed Ben, S., Jawab Sidi Mohamed Ben, F., Imane, M. y Fouad, J. (2020). Dassia: A Micro-Simulation Approach To Diagnose Urban Freight Delivery Areas Impacts On Traffic Flow. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(2), 3737–3742. www.ijstr.org
- [91] Pelletier, S., Jabali, O. y Laporte, G. (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225–255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.06.006>
- [92] Stinson, M., Enam, A., Moore, A. y Auld, J. (2019). Citywide Impacts of E-Commerce. *Proceedings of the 2nd ACM/EIGSCC Symposium on Smart Cities and Communities*, 10, 1–7. doi: <https://doi.org/10.1145/3357492.3358633>
- [93] Validi, S., Bhattacharya, A. y Byrne, P. J. (2020). Sustainable distribution system design: a two-phase DoE-guided meta-heuristic solution approach for a three-echelon bi-objective AHP-integrated location-routing model. *Annals of Operations Research*, 290(1–2), 191–222. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2887-y>
- [94] Vishwanath, A., Gan, H. S., Kalyanaraman, S., Winter, S. y Mareels, I. (2014). Personalised Public Transportation: A new mobility model for urban and suburban transportation. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 1831–1836. doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957959>

PREPRINTS
aci

Artículo/Article

ID: 157

Publicado en línea
/Published online:
05/02/2024

- [95] Yeomans, J. S. (2021). A Multicriteria, Bat Algorithm Approach for Computing the Range Limited Routing Problem for Electric Trucks. *Wseas Transactions On Circuits And Systems*, 20, 96–106. doi: <https://doi.org/10.37394/23201.2021.20.13>
- [96] Yuan, Y., Cattaruzza, D., Ogier, M., Semet, F. y Vigo, D. (2021). A column generation based heuristic for the generalized vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102391. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102391>
- [97] Zeng, Y., Tong, Y. y Chen, L. (2020). Last-mile delivery made practical: An efficient route planning framework with theoretical guarantees. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 13(3), 320–333. doi: <https://doi.org/10.14778/3368289.3368297>