

UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE SISTEMAS DE GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE RUTAS

GIAN PAUL IPARRAGUIRRE LEYVA
<https://orcid.org/0009-0001-1662-338X>
2020100193@ucss.pe
Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú

MARCO ANTONIO CORAL YGNACIO
<https://orcid.org/0000-0001-6628-1528>
mcoral@ucss.edu.pe
Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú

Recibido: 2 de marzo del 2025 / Aprobado: 25 de abril del 2025
doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7797>

RESUMEN. La generación automática de rutas es una herramienta esencial para optimizar la logística, ya que permite reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad en diversos escenarios. En este artículo, se presenta una revisión sistemática de literatura sobre generación automática de rutas basada en la metodología de Kitchenham, que se estructura en tres fases: planificación, realización e informe. Mediante el análisis de artículos relevantes obtenidos de bases de datos como Scopus y ScienceDirect, se identificaron cincuenta estudios relevantes después de las etapas de cribado. Además, se obtuvieron técnicas, modelos y tecnologías avanzadas que abordan los principales desafíos de la planificación logística, incluyendo la adaptación a entornos dinámicos y la toma de decisiones en tiempo real. Los hallazgos destacaron el impacto positivo de los algoritmos híbridos y las tecnologías emergentes como el internet de las cosas y la conectividad de vehículos, lo que ha mejorado significativamente la eficiencia operativa y la sostenibilidad. Sin embargo, persisten retos en su implementación en áreas con infraestructura limitada, lo que subraya la necesidad de soluciones más accesibles y adaptativas para contextos diversos.

PALABRAS CLAVE: rutas / planificación logística / eficiencia operativa / algoritmos híbridos / tecnologías emergentes

A SYSTEMATIC REVIEW OF AUTOMATIC ROUTE GENERATION SYSTEMS

ABSTRACT. Automatic route generation is an essential tool for optimizing logistics, as it reduces operating costs and improves sustainability in a variety of scenarios. This work presents a systematic literature review based on the Kitchenham methodology, which

is structured in three phases: planning, execution and reporting, through the analysis of relevant articles obtained from databases such as Scopus and ScienceDirect, 50 relevant studies were identified after the screening stages, Advanced techniques, models, and technologies were obtained that address the main challenges of logistics planning, including adaptation to dynamic environments and real-time decision-making. The findings highlight the positive impact of hybrid algorithms and emerging technologies such as the Internet of Things and vehicle connectivity, significantly improving operational efficiency and sustainability. However, challenges persist in their implementation in areas with limited infrastructure, underscoring the need for more accessible and adaptive solutions for diverse contexts.

KEYWORDS: logistics planning / operational efficiency / hybrid algorithms / emerging technologies

INTRODUCCIÓN

La logística moderna enfrenta desafíos crecientes debido a la alta demanda en la distribución de bienes y servicios, especialmente en entornos urbanos donde las restricciones de tiempo y espacio complejizan la planificación. En este sentido, la generación automática de rutas se ha consolidado como una solución clave que permite la optimización de recursos y la reducción de costos operativos (Cui et al., 2022).

Desde sus inicios, la planificación de rutas ha evolucionado de enfoques manuales hacia métodos computacionales avanzados, impulsados por algoritmos de optimización y aprendizaje automático (Arifuddin et al., 2024). La incorporación de tecnologías como los algoritmos genéticos y los enfoques híbridos y la optimización por enjambre de partículas, ha permitido abordar problemas complejos, como la distribución de última milla y la integración de vehículos autónomos en redes logísticas (Hu et al., 2024; Zhao et al., 2024).

Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten importantes desafíos, como la adaptabilidad de los modelos a entornos dinámicos, la integración de flotas heterogéneas y la optimización en tiempo real, factores que dificultan la implementación efectiva de estas soluciones (Nouicer et al., 2023). Además, escenarios logísticos específicos, como las restricciones de ventanas de tiempo y costos diferenciados, representan limitaciones adicionales que deben resolverse para lograr sistemas logísticos más eficientes y sostenibles (Y. Shi et al., 2023).

En años recientes, se han desarrollado una variedad de enfoques innovadores para la generación automática de rutas, incluidos algoritmos basados en heurísticas, como el algoritmo de colonia de hormigas mejorado (Guan & Li, 2023) y métodos híbridos que integran técnicas tradicionales con aprendizaje profundo (Y. Zhou et al., 2022). También han surgido modelos específicos diseñados para contextos emergentes, como flotas de drones heterogéneos y vehículos eléctricos, destacando la versatilidad de estos sistemas (Sang et al., 2024; Wang et al., 2023).

Aunque estas investigaciones han logrado avances significativos, muchas de ellas no se adaptan a escenarios logísticos complejos, como entornos urbanos densos o regiones con infraestructura limitada (Jiang et al., 2024). Esto nos motiva a realizar una revisión sistemática de literatura con el propósito de identificar y analizar las técnicas más avanzadas en la generación automática de rutas evaluando su efectividad y viabilidad en diferentes contextos logísticos. Asimismo, se busca ofrecer una visión integral del estado del arte al destacar aquellas propuestas que mejor se adapten a los desafíos contemporáneos en la optimización de rutas (X. Zhou et al., 2024).

Para abordar este objetivo, el trabajo sigue los lineamientos de la metodología de (Kitchenham et al., 2009) utilizando las bases de datos Scopus y ScienceDirect. Este enfoque permite seleccionar artículos relevantes y de alta calidad, pues se ha centrado

en investigaciones recientes que abordan modelos, algoritmos y aplicaciones para la generación automática de rutas.

El presente artículo se organiza en cinco secciones. La segunda sección aborda el estado del arte. La tercera describe la metodología utilizada para la revisión sistemática. La cuarta presenta los resultados del análisis. Finalmente, la quinta incluye las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

ESTADO DEL ARTE

La generación automática de rutas para vehículos ha evolucionado y se ha convertido en un elemento crucial dentro de la gestión logística moderna. Esta tecnología ha permitido enfrentar desafíos como la congestión vehicular, las limitaciones de capacidad y la sostenibilidad ambiental, con el objetivo de optimizar los procesos operativos y reducir los costos. En particular, se ha demostrado que la optimización de rutas tiene un impacto directo en áreas como la logística urbana y las entregas de última milla, lo que ha mejorado la eficiencia operativa mediante el uso de datos en tiempo real. Los métodos avanzados, como los algoritmos híbridos y el aprendizaje automático, han sido fundamentales en este progreso, pues han mejorado la toma de decisiones y aumentado la eficiencia operativa (Nouicer et al., 2023; Y. Zhou et al., 2022).

Inteligencia artificial y aprendizaje automático

La integración de inteligencia artificial (IA) en la planificación de rutas ha facilitado la reducción de costos operativos y tiempos de operación en flotas de vehículos eléctricos. Los enfoques basados en redes neuronales profundas y aprendizaje reforzado han mostrado una notable capacidad para adaptarse a condiciones logísticas cambiantes, lo que mejora la eficiencia y la capacidad de respuesta frente a fluctuaciones en los entornos logísticos. Además, el aprendizaje profundo ha demostrado ser eficaz en la optimización de recursos y ha destacado su potencial para mejorar la sostenibilidad operativa (Nouicer et al., 2023; Y. Zhou et al., 2022).

Innovaciones tecnológicas en la logística

El uso de tecnologías, como el internet de las cosas (*internet of things*, IoT) y los sistemas de información geográfica (*geographical information system*, GIS), ha optimizado significativamente las capacidades de los sistemas de enrutamiento. En sectores como el de la gestión de residuos urbanos, se ha logrado una importante mejora en la reducción de los tiempos operativos gracias a la integración de datos en tiempo real, lo que, a su vez, ha mejorado la toma de decisiones (Idrissi et al., 2024). Además, la aplicación de vehículos autónomos y drones ha demostrado ser eficaz en la optimización de rutas en escenarios de alta demanda, lo que ha evidenciado el impacto positivo de las tecnologías emergentes en la logística urbana (Liang et al., 2021). La

colaboración entre robots móviles ha sido clave en la transformación de la logística, pues ha evidenciado cómo los algoritmos de búsqueda en grafos pueden mejorar la eficiencia operativa en este tipo de entornos (Kawabe et al., 2023).

Enfoques algorítmicos y modelos de optimización

El desarrollo de algoritmos híbridos, como los que combinan el aprendizaje por refuerzo con las colonias de hormigas, ha demostrado su eficacia para resolver problemas de enrutamiento dinámico. Esta combinación ha permitido mejorar la eficiencia de las operaciones logísticas, especialmente en escenarios cambiantes (Zhao et al., 2024). Asimismo, la integración de algoritmos genéticos y técnicas bioinspiradas, como el comportamiento del lobo gris, ha mostrado ser efectiva en la optimización de rutas bajo restricciones de capacidad (Arifuddin et al., 2024). Los modelos de optimización multiobjetivo han sido particularmente útiles, pues han equilibrado factores como los costos y los tiempos de operación sin comprometer la sostenibilidad, lo que ha permitido mejorar la eficiencia operativa (Wang et al., 2023).

Desafíos en la implementación de la generación automática de rutas

A pesar de los avances, la implementación de la generación automática de rutas enfrenta varios desafíos. La complejidad de los algoritmos de aprendizaje profundo y refuerzo exige una comprensión avanzada de la teoría de la IA, lo cual puede ser una barrera significativa para su adopción (Pal, 2023). Las limitaciones en la capacidad de las baterías de los vehículos eléctricos también restringen el rango de conducción, lo que dificulta la optimización de las rutas (Martins et al., 2021). Además, la integración de vehículos guiados automáticamente (*automatic guided vehicle*, AGV) en los entornos logísticos puede resultar costosa y compleja, mientras que la adaptación de los modelos teóricos a escenarios prácticos, como la recolección de residuos, presenta obstáculos operativos y resistencia por parte de los operadores, lo que dificulta su implementación (Arifuddin et al., 2024; Mojtahedi et al., 2021; Tsolakis et al., 2022).

Impacto en la eficiencia operativa y sostenibilidad

La optimización de rutas mediante IA ha mostrado beneficios claros en términos de eficiencia operativa y sostenibilidad. Se ha logrado una reducción significativa en los costos operativos, como se observa en estudios de recolección de residuos, donde los costos totales se redujeron hasta en un 66 % (Mahdavi et al., 2022). La automatización y el uso de AGV han incrementado la productividad en terminales portuarias y otros entornos logísticos, lo que ha resultado en mejoras en la eficiencia operativa (Tsolakis et al., 2022). Además, la optimización de rutas ha demostrado ser clave en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al minimizar las distancias recorridas y mejorar la eficiencia del combustible (Pal, 2023; R. Liu & Wang, 2022).

Asimismo, la integración de vehículos eléctricos en las rutas sostenibles ha contribuido a la reducción de la huella de carbono, lo que promueve prácticas de transporte más ecológicas (Martins et al., 2021). Las tecnologías emergentes, como el transporte internet (TI), también han logrado un ahorro energético significativo, pues han alcanzado hasta un 36 % de eficiencia en comparación con los sistemas tradicionales (J. Li et al., 2023). Finalmente, la optimización de rutas no solo beneficia la logística, sino que también mejora la calidad de vida en áreas urbanas al reducir el tráfico y las emisiones, lo que contribuyen a un entorno más saludable (Abdullahi et al., 2021; Hmamed et al., 2023).

METODOLOGÍA

La revisión sistemática de literatura se basó en las recomendaciones del marco metodológico de Kitchenham et al. (2009), el cual se estructura en tres fases: planificación, realización e informe. En la fase de planificación, se establecieron los objetivos de la revisión y se definieron los criterios para la búsqueda y selección de estudios. En la fase de realización, se recopilaron y analizaron los artículos relevantes siguiendo un procedimiento estandarizado. Finalmente, en la fase de informe, se sintetizaron los hallazgos obtenidos para estructurar los resultados y extraer conclusiones sobre los avances en la generación automática de rutas.

Planificación de la revisión

En la fase de planificación, se estableció el tema de investigación con el objetivo de delimitar el alcance de la revisión sistemática y garantizar un enfoque estructurado. A partir de este marco, se definieron preguntas clave que guían el proceso de búsqueda y análisis de información relevante. Las preguntas planteadas fueron las siguientes:

- P1: ¿qué técnicas algorítmicas se utilizan para la generación automática de rutas y cuáles son las más eficientes para optimizar rutas de entrega?
- P2: ¿qué modelos se utilizan para la generación automática de rutas en sistemas de entregas?
- P3: ¿qué tecnologías son utilizadas en sistemas de generación de rutas?
- P4: ¿qué técnicas de integración se utilizan en sistemas de generación de rutas?
- P5: ¿qué factores tecnológicos son considerados en la construcción de sistemas de generación de rutas?

Realización de la revisión

En esta fase se describió el procedimiento para la revisión de literatura, que incluyó tanto la búsqueda como la selección de las fuentes bibliográficas relevantes.

Estrategias de búsqueda

Para la búsqueda de fuentes bibliográficas, se emplearon palabras clave relacionadas con las preguntas de investigación sobre la generación automática de rutas. Estas palabras clave se utilizaron para construir cadenas de búsqueda específicas que facilitaron la identificación de estudios relevantes. Por ejemplo, se utilizó la siguiente cadena de búsqueda: ("*route generation*" OR "*route planning*") AND *vehicles* AND (*techniques* OR *optimization* OR *technologies* OR "*route system*" OR *implementation* OR *delivery*). Esta estrategia facilitó la obtención de una selección adecuada de literatura para su análisis y síntesis.

Se establecieron criterios estrictos para garantizar la calidad y pertinencia de los artículos seleccionados. Los artículos debían ser recientes, con una antigüedad no superior a cinco años, y preferentemente publicados en inglés. Además, se exigió que los artículos cuenten con un identificador de objeto digital (*digital object identifier*, DOI), lo que asegura su fiabilidad. Se priorizaron aquellos trabajos que abordaban específicamente la generación automática de rutas para entregas, con propuestas de implementación o aplicaciones en contextos reales. Los criterios de inclusión y exclusión utilizados para la búsqueda y selección de los artículos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos que traten sobre generación automática de rutas para entregas	Artículos no indexados
Artículos con DOI	Trabajos que no muestren el proceso de Implementación
Publicación en inglés	Artículos que no se relacionen con la generación de rutas para vehículos de entrega
Artículos centrados en técnicas, metodologías, tecnologías o herramientas para la generación y optimización de rutas	Informes, revistas, boletines, comentarios
Artículos limitados a ciencias de la computación	Publicaciones a partir del año 2021

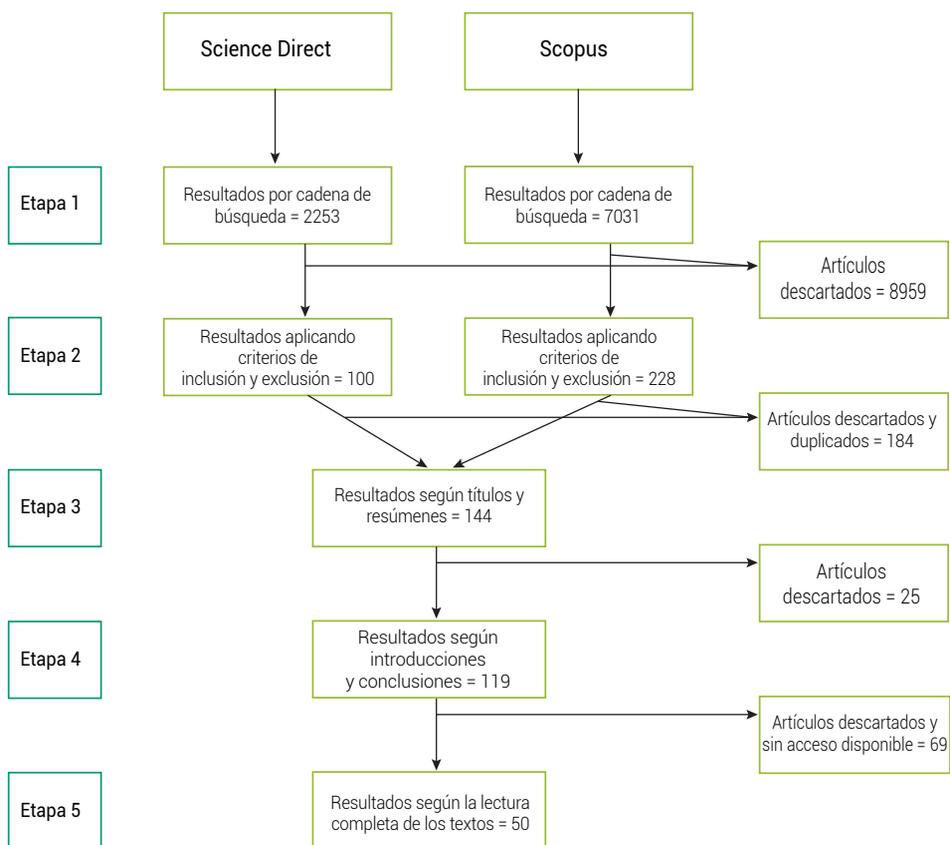
Selección de estudios

A partir de la cadena de búsqueda, en la primera etapa del filtrado se identificaron 2253 artículos en la base de datos Scopus y 7031 artículos en la base de datos ScienceDirect. En la segunda etapa, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 1, y se seleccionaron 228 artículos de Scopus y 100 artículos de ScienceDirect, lo que resultó en un total de 328 artículos. En la tercera etapa, los artículos obtenidos de ambas bases de datos se combinaron, se eliminaron los duplicados y se revisaron

tanto los títulos como los resúmenes relacionados con la generación automática de rutas para entregas, de los cuales se conservaron 144 artículos. En la cuarta etapa, se revisaron las conclusiones e introducciones de los artículos seleccionados para asegurar su relevancia y pertinencia, lo que resultó en la selección de 119 artículos. Finalmente, en la quinta etapa, se llevó a cabo la lectura completa de los textos, de los cuales se eligieron 50 artículos (Figura 1).

Figura 1

Diagrama de flujo del filtrado de artículos



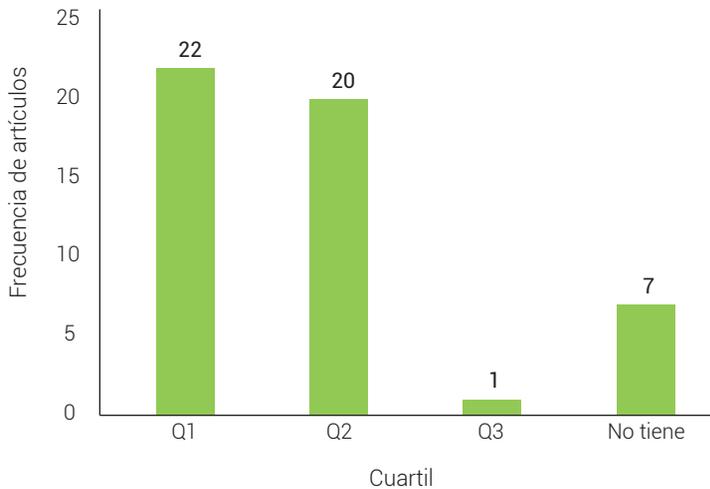
Extracción y análisis de datos

Se realizó un análisis cuantitativo¹, el cual se presenta mediante gráficos estadísticos generados a partir de los datos obtenidos durante la revisión. Este análisis permite visualizar y comprender de manera más clara las tendencias y patrones identificados en los artículos seleccionados.

La Figura 2 muestra una distribución destacada en el cuartil 1 (Q1), que agrupa 22 de los *journals* seleccionados, lo que refleja un alto rendimiento y calidad en los estudios reportados. El cuartil 2 (Q2) cuenta con una representación ligeramente menor con 20 casos, mientras que el cuartil 3 (Q3) registra solo 1 caso. Por otro lado, se identifican 7 *journals* que no están clasificados en ninguno de los cuartiles, lo que indica que aún no han sido evaluados. Estos resultados destacaron la predominancia de estudios de alta calidad entre los seleccionados, con una representación significativa en los cuartiles superiores.

Figura 2

Cantidad de publicaciones por cuartil



La Tabla 2 presenta la frecuencia del top 10 de palabras clave más utilizadas en los artículos analizados, de los cuales se destacaron términos como *route planning* (21) y *vehicle routing* (15), lo que evidenció el enfoque predominante en la planificación y optimización de rutas. Palabras clave como *genetic algorithms* (11) y técnicas avanzadas como *particle swarm optimization* y *ant colony optimization* (8) subrayaron la relevancia de los métodos bioinspirados en la resolución de problemas complejos.

¹ Los detalles del análisis se pueden ver en el siguiente enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1wPltULsR3InmL9sy46WkVkJDjUpxmmQ1S?usp=drive_link

Además, tecnologías relacionadas con IA, como *deep learning* y *neural networks* (7), reflejaron un interés creciente en soluciones innovadoras. Otros términos, como *clustering algorithms* (6) y *fleet operations* (5), indicaron la importancia de la segmentación de datos y la gestión de recursos. También se incluyeron conceptos como *urban transportation* y *autonomous vehicles* (4), que resaltan enfoques tecnológicos en contextos urbanos. En conjunto, estos términos destacaron el interés en la generación automática de rutas integrando técnicas de optimización, IA y tecnologías emergentes, aunque el top 10 representa solo una parte del amplio panorama de términos relacionados en este campo.

Tabla 2

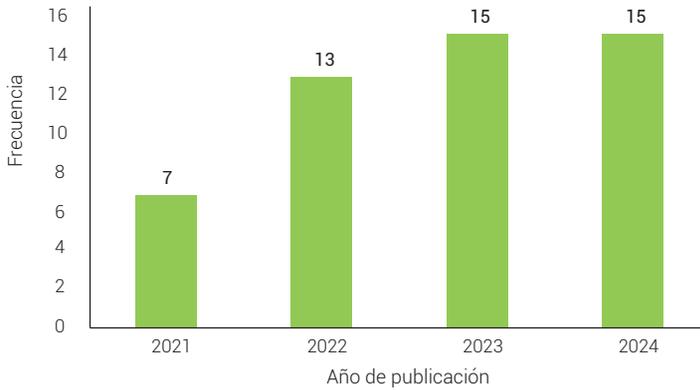
Top 10 de palabras clave

Palabras clave	Frecuencia
<i>Route planning</i>	21
<i>Vehicle routing</i>	15
<i>Optimization, optimisations</i>	12
<i>Genetic algorithms</i>	11
<i>Unmanned aerial vehicles (UAV)</i>	9
<i>Particle swarm optimization (PSO), ant colony optimization, time windows, routings</i>	8
<i>Deep learning, neural networks, reinforcement learning, reinforcement learnings, heuristic algorithms, vehicles, antennas</i>	7
<i>Clustering algorithms, clusterings, motion planning</i>	6
<i>Fleet operations, integer programming, aerial vehicle</i>	5
<i>Urban transportation, electric vehicles, autonomous vehicles, tabu search, multi-objective optimization, travel time, buses, vehicle routing problems</i>	4

La Figura 3 muestra la frecuencia de publicaciones por año relacionadas con el tema de investigación. En el 2021, se registraron 7 publicaciones, mientras que, en el 2022, aumentó significativamente a 13 publicaciones, lo que reflejó un mayor interés en el área. Este interés se mantuvo en el 2023 y 2024, con un máximo de 15 publicaciones en cada año. Este comportamiento destacó la relevancia del tema como un área de estudio importante, especialmente en el desarrollo de soluciones innovadoras para la generación automática de rutas, impulsada por la necesidad de optimizar procesos logísticos y tecnológicos.

Figura 3

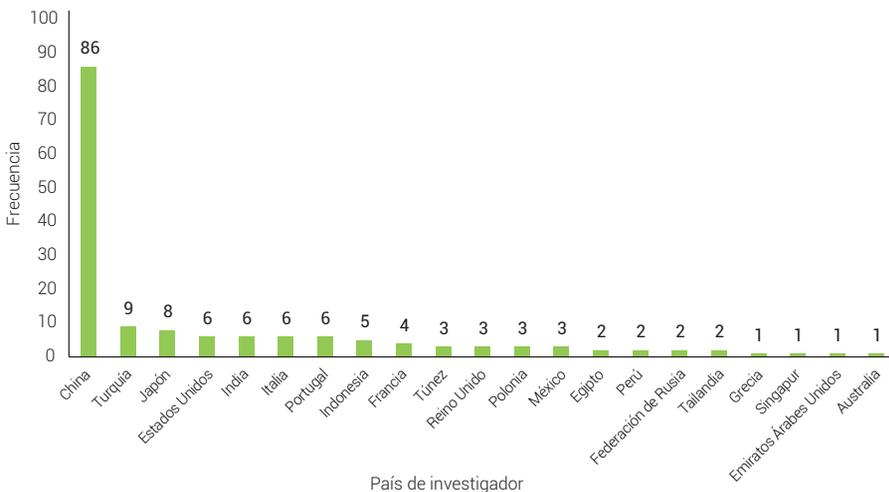
Cantidad de publicaciones por año



La Figura 4 muestra la frecuencia de investigadores por país en el campo de estudio. Se destacó un interés predominante en China, con 86 investigadores, lo que refleja un enfoque significativo en la investigación y desarrollo en esta área. Turquía y Japón también tuvieron una participación relevante con 9 y 8 investigadores, respectivamente, seguidos por países como Estados Unidos, India, Italia y Portugal, cada uno con 6 investigadores. En contraste, países como Francia, Túnez, Reino Unido, Polonia e Indonesia presentaron una menor representación, con 4 o menos investigadores. En América Latina, México (3) y Perú (2) evidenciaron un interés emergente en el tema. Estos hallazgos han resaltado una notable concentración de investigadores en Asia y Europa, con una participación más discreta de América Latina.

Figura 4

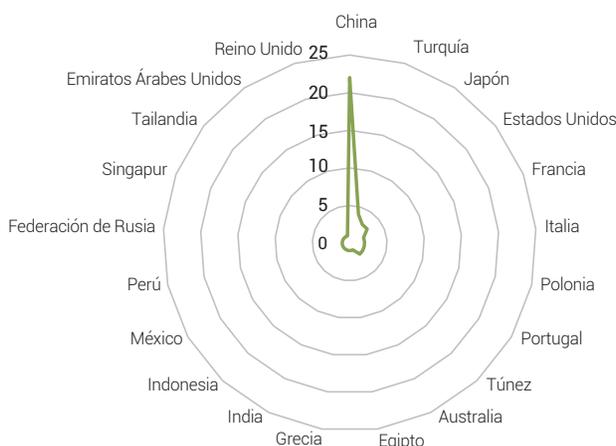
Cantidad de investigadores por país



La Figura 5 muestra la frecuencia de publicaciones por país en el ámbito de estudio. Destacó China (22) como líder en contribuciones, lo que refleja un fuerte interés y enfoque en el desarrollo de estos temas. Turquía ocupó el segundo lugar, seguida por Japón y Estados Unidos, con 3 publicaciones cada uno. Países como Francia, Italia, Polonia, Portugal y Túnez también realizaron aportes significativos, con 2 publicaciones cada uno. Otros países, incluidos Australia, Egipto, Grecia, India, Indonesia, México, Perú, Rusia, Singapur, Tailandia, Emiratos Árabes Unidos y Reino Unido, tuvieron una participación más limitada con 1 publicación cada uno. Estas cifras evidenciaron una notable concentración de investigaciones en Asia, acompañada de una expansión hacia otras regiones como Europa y América Latina, donde países como México y Perú reflejaron un interés emergente, de lo que se subraya el enfoque multidisciplinario de esta tecnología.

Figura 5

Publicaciones por país



RESULTADOS

En esta etapa, se recopilaron los resultados y respuestas a las cinco preguntas de investigación formuladas en la fase inicial, basadas en los hallazgos obtenidos durante la revisión de la literatura. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada una de las preguntas planteadas, con el fin de proporcionar una comprensión clara y concisa de los principales resultados identificados en los estudios seleccionados.

P1: ¿qué técnicas algorítmicas se utilizan para la generación automática de rutas y cuáles son las más eficientes para optimizar rutas de entrega?

Las técnicas algorítmicas son métodos computacionales diseñados para resolver problemas complejos mediante una secuencia de pasos sistemáticos. Para la

generación automática de rutas, estas ayudan a optimizar el proceso de planificación de itinerarios. Algunas de las más eficaces se destacan por su eficiencia, pues son capaces de encontrar soluciones rápidas y de alta calidad con el uso mínimo de recursos.

La efectividad de técnicas algorítmicas, como el ACO-ABC híbrido, el *double* DQN y el GA-GWO híbrido, en la resolución de problemas complejos de generación de rutas, es incuestionable. Estas logran equilibrar de manera eficiente la exploración global con la optimización local al combinar métodos bioinspirados y aprendizaje automático. Sin embargo, su aplicabilidad se ve limitada por la escalabilidad y la dependencia de infraestructuras tecnológicas avanzadas, lo que resalta la necesidad de desarrollar estrategias capaces de funcionar de manera óptima incluso con recursos limitados. Esto permitiría una mayor accesibilidad especialmente en regiones con infraestructuras menos desarrolladas. La Tabla 3 presenta las técnicas algorítmicas utilizadas en la generación automática de rutas.

Tabla 3

Técnicas algorítmicas para la generación automática de rutas y su eficiencia en la optimización de entregas

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
Y. Liu et al. (2022)	Algoritmo heurístico	Técnica que emplea reglas aproximadas o de sentido común para resolver problemas complejos de manera rápida y eficiente.	Se considera eficiente debido a que encuentra soluciones aceptables en tiempo reducido, aunque no garantiza óptimos globales. Es adecuada para problemas complejos con restricciones de tiempo.
Comert & Yazgan (2023)	ACO-ABC híbrido	Optimización combinada entre ACO y ABC, que busca soluciones mediante la exploración cooperativa entre ambas colonias.	Se considera muy eficiente debido a la integración de exploración y refinamiento, lo que mejora la calidad y velocidad de las soluciones. Eficaz en problemas de optimización combinatoria.
Nouicer et al. (2023)	Double DQN	Uso de dos redes neuronales en aprendizaje por refuerzo para evitar sobreestimaciones en las evaluaciones de acción para mejorar la estabilidad del aprendizaje.	Se considera muy eficiente por su capacidad de evitar sobreestimaciones. Ideal para entornos dinámicos y con alta incertidumbre.
Cui et al. (2022)	Algoritmo memético	Técnica que combina la búsqueda global con la mejora local de soluciones a través de un proceso iterativo.	Combinación de búsqueda global y mejora local. Puede ser costoso computacionalmente, pero es útil en problemas con grandes espacios de solución.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
J. Shi et al. (2023)	ALNS	Metaheurística flexible que usa un enfoque iterativo de destrucción y reconstrucción de soluciones para optimizar.	Muy eficiente debido a su enfoque iterativo y flexible, ideal para problemas de optimización de rutas.
Szwarc et al. (2021)	Algoritmo evolutivo	Técnica inspirada en la evolución biológica (selección, cruce y mutación) para encontrar soluciones óptimas mediante un proceso iterativo.	Capaz de encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización con restricciones variadas mediante procesos iterativos de evolución.
Zhao et al. (2024)	ACO-Q-learning	Técnica que combina ACO con Q-Learning para optimizar rutas adaptativamente utilizando exploración colaborativa y decisiones basadas en recompensas.	Muy eficiente debido a su integración de exploración colaborativa y decisiones basadas en recompensas. Mejor en problemas dinámicos de enrutamiento.
X. Zhou et al. (2024)	k-Center COA	Clustering con el algoritmo k-Center y optimización con cucarachas para mejorar la asignación de clústers.	Capaz de agrupar y optimizar la asignación de clústers, ideal para problemas de clustering espacial. Sensible a parámetros iniciales.
R. Liu & Wang (2022)	DD-BRO	Optimización en tiempo real de rutas de autobuses, a través de la integración de datos históricos sobre tráfico y condiciones de rutas.	Muy eficiente para ajustar rutas en tiempo real utilizando datos históricos para mejorar la eficiencia del transporte público.
Kawabe et al. (2023)	Q-Learning-GS	Optimización de navegación en entornos complejos combinando Q-Learning con búsqueda en grafos.	Muy eficiente para entornos complejos y dinámicos, ideal para optimizar navegación en grafos mediante aprendizaje por refuerzo continuo.
Sathyamurthy et al. (2024)	HMAA	Técnica híbrida que combina múltiples metaheurísticas para resolver problemas complejos de enrutamiento mediante un enfoque de fases.	Aprovecha múltiples metaheurísticas para mejorar la calidad de las soluciones, especialmente en problemas de enrutamiento complejos.
Y. Shi et al. (2023)	LBH	Heurística basada en aprendizaje que guía la búsqueda utilizando patrones de soluciones anteriores.	Utiliza aprendizaje basado en soluciones pasadas. Muy eficiente en problemas recurrentes, aunque limitado en escenarios nuevos.
Liang et al. (2021)	HOA	Técnica híbrida de optimización que integra métodos como algoritmos genéticos y recocido simulado para explorar el espacio de soluciones y mejorar los resultados.	Muy eficiente debido a la combinación de exploración y precisión en problemas complejos. Efectiva en optimización multiobjetivo.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
Wang et al. (2023)	RGA	Algoritmo genético con reprogramación dinámica para ajustar soluciones en tiempo real.	Muy eficiente por su capacidad de reprogramación, adaptándose a cambios en tiempo real. Ideal en entornos con restricciones variables.
Guan & Li (2023)	IACO	Optimización con actualización dinámica de reglas de feromonas, inspirada en las hormigas, para encontrar soluciones más efectivas.	Muy eficiente en problemas de optimización robustos, debido a su actualización continua de reglas de feromonas.
Arifuddin et al. (2024)	GA-GWO	Hibridación entre el algoritmo genético y el optimizador de lobo gris para optimización de rutas.	Muy eficiente por su combinación de capacidades globales y estrategias locales, ideal para problemas de enrutamiento.
Y. Zhou et al. (2022)	ISAC	Optimización con Soft Actor-Critic para resolver problemas estocásticos mediante políticas adaptativas.	Muy eficiente en entornos dinámicos y estocásticos para resolver problemas con políticas adaptativas.
Sang et al. (2024)	A*-DWA	Combinación de A* y el algoritmo de ventana dinámica para optimizar la navegación ajustando rutas en tiempo real según el entorno.	Muy eficiente en navegación dinámica al combinar planificación óptima con ajustes en tiempo real.
Sundarraj et al. (2023)	WCPSO-Dijkstra	Combinación de PSO con el algoritmo de Dijkstra para optimizar grafos en enrutamiento.	Muy eficiente en la optimización de grafos y mejora del enrutamiento en redes mediante exploración global y búsqueda precisa.
Hou et al. (2023)	DRL-VRP	Optimización de rutas de vehículos mediante aprendizaje por refuerzo profundo adaptándose a condiciones del entorno.	Muy eficiente para sistemas dinámicos y complejos, debido a la capacidad de aprender políticas de enrutamiento adaptativas.
M. Y. Zhang et al. (2022)	PSO-BAS	Integración de PSO con la búsqueda de área limitada para mejorar la optimización en problemas de enrutamiento.	Muy eficiente debido a su integración de exploración global y búsqueda local precisa. Eficaz en optimización de rutas.

P2: ¿qué modelos se utilizan para la generación automática de rutas en sistemas de entregas?

Un modelo es una representación abstracta de un sistema o proceso real que permite simular y predecir su comportamiento en diferentes situaciones. Son herramientas esenciales para estructurar problemas complejos, ya que permiten facilitar la toma de decisiones mediante la simplificación de variables y de las restricciones implicadas.

Los modelos de optimización, el VRP dinámico integrado y el modelo de generación de columnas híbrido se destacan como herramientas clave para optimizar rutas en escenarios con demandas fluctuantes y restricciones variables. Estos enfoques son particularmente útiles para enfrentar desafíos logísticos complejos, como la optimización de la última milla y la integración de vehículos eléctricos. Sin embargo, requieren configuraciones iniciales complejas y adaptaciones tecnológicas significativas, lo que puede dificultar su implementación en entornos logísticos menos maduros. La Tabla 5 describe los modelos utilizados en los estudios revisados y destacan sus características principales y su aplicabilidad en la resolución de problemas.

Tabla 4

Modelos utilizados para la generación automática de rutas

Referencia	Modelo	Descripción del modelo
Küp et al. (2024)	VRP dinámico integrado	Modelo de optimización diseñado para flotas compartidas en operaciones de recogida y entrega, que adapta las rutas dinámicamente según las ventanas temporales y la demanda en tiempo real.
J. Li et al. (2023)	Sistema de rutas autónomo	Modelo para vehículos autónomos que planifica rutas de manera eficiente, considerando restricciones como la autonomía de las baterías y las condiciones cambiantes del entorno en tiempo real.
S. Pan et al. (2024)	VRP cadena de frío multivehículo	Modelo que optimiza las rutas de transporte para productos perecederos al integrar requisitos de refrigeración, control de emisiones y eficiencia en el uso de múltiples vehículos.
Hu et al. (2024)	Generación de columnas híbrido	Modelo para optimización de rutas en última milla con vehículos autónomos, utilizando un enfoque de generación y evaluación iterativa de rutas eficientes para cumplir con las entregas.
Zhao et al. (2024)	Sistema de ahorro energético	Modelo que optimiza las rutas de transporte minimizando el consumo energético mediante el análisis de trayectorias eficientes y la selección de rutas menos exigentes para los vehículos.
Guan & Li (2023)	ACO mejorado	Modelo logístico aplicado a la cadena de frío que utiliza una versión mejorada de optimización de colonia de hormigas para simular comportamientos de búsqueda óptima en la planificación de rutas.
Arifuddin et al. (2024)	GA-GWO híbrido	Modelo híbrido que combina algoritmos genéticos y optimización de manada de lobos grises para planificar rutas de transporte y lograr un balance entre exploración y explotación.
Jiang et al. (2024)	AGV <i>path planning</i>	Modelo que planifica las trayectorias de vehículos guiados automáticamente (AGV), lo que optimiza las operaciones de recogida y entrega en entornos controlados, como almacenes.
Ramirez et al. (2022)	WSN <i>route planning</i>	Modelo de planificación de rutas que utiliza redes de sensores inalámbricos para recolectar datos en tiempo real sobre las condiciones del entorno y optimizar las trayectorias de recolección.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Modelo	Descripción del modelo
Idrissi et al. (2024)	Smart waste VRP	Modelo de optimización para la recolección de residuos basado en niveles de llenado de contenedores y condiciones de tráfico, lo que ajusta dinámicamente las rutas para mejorar la eficiencia.
Zheng et al. (2021)	Metro-integrated routing	Modelo que integra las redes de metro urbano en la planificación logística, lo que permite el uso combinado de transporte público y privado para mejorar la eficiencia en áreas urbanas.
Toathom & Champrasert (2024)	Flood-aware VRP	Modelo de optimización de rutas que incorpora riesgos de inundación en la planificación, ajustando las trayectorias para garantizar la seguridad y minimizar interrupciones durante las entregas.
Raeesi & Zografos (2022)	Recarga coordinada	Modelo que integra la planificación de rutas de vehículos eléctricos con la ubicación y disponibilidad de estaciones de recarga, lo que optimiza la eficiencia energética y los tiempos de operación.
Hulagu & Celikoglu (2022)	Flota heterogénea verde	Modelo de gestión de flotas heterogéneas que incorpora criterios ambientales, como la reducción de emisiones, junto con parámetros operativos para optimizar el transporte sostenible.
Nickkar & Lee (2023)	Framework multinivel	Modelo jerárquico que organiza redes de transporte, como autobuses escolares, en niveles estructurados, lo que facilita la gestión y la planificación eficiente en sistemas complejos.
J. Li et al. (2023)	EV + tráfico	Modelo de planificación de rutas para vehículos eléctricos que considera simultáneamente la autonomía de las baterías y las condiciones de tráfico, ajustando las rutas dinámicamente.
Y. Pan et al. (2024)	UAV-humano	Modelo que coordina la colaboración entre drones y operadores humanos, asignando tareas de forma eficiente y aprovechando las capacidades complementarias de ambos para optimizar las entregas.

P3: ¿qué tecnologías son utilizadas en sistemas de generación de rutas?

Las tecnologías se refieren a las herramientas, sistemas o plataformas que permiten implementar soluciones eficientes para abordar un conjunto específico de problemas. En este sentido, las tecnologías facilitan la recopilación, procesamiento y análisis de datos, pues proporcionan soporte a la toma de decisiones y mejoran la precisión de las soluciones propuestas.

Las tecnologías emergentes, como el IoT, la conectividad V2X y los sistemas de sensores inalámbricos (WSN), están revolucionando el sector logístico, ya que proporcionan capacidades de monitoreo y optimización en tiempo real, y mejoran considerablemente la eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, la efectividad de estas tecnologías depende en gran medida de la existencia de infraestructuras robustas y marcos regulatorios bien definidos. Esto evidencia la importancia de definir políticas públicas que faciliten su integración. La Tabla 5 detalla las principales tecnologías

utilizadas y se destaca su papel en la mejora de la eficiencia en la generación automática de rutas.

Tabla 5

Tecnologías utilizadas para la generación de rutas

Referencia	Tecnología	Descripción
Chen et al. (2022)	Sistema energético IoT	Tecnología que integra sensores IoT para monitorear el consumo energético de vehículos en tiempo real, lo que ajusta las operaciones para maximizar la eficiencia energética.
Dutta et al. (2023)	<i>Fast move</i>	Tecnología de reenrutamiento dinámica diseñada para ciudades inteligentes, que ajusta rutas de transporte prioritario en tiempo real ante cambios en el entorno.
Yan et al. (2023)	<i>AGV tracking</i>	Tecnología para seguimiento preciso de trayectorias de vehículos guiados automáticamente, utilizada en entornos controlados como almacenes.
Ramirez-Robles et al. (2024)	Tiempo real <i>off-road</i>	Tecnología autónoma para la planificación de rutas en terrenos irregulares, diseñada para optimizar el movimiento de vehículos fuera de carretera.
D'Emidio et al. (2024)	Vehículos conectados	Tecnología de comunicación V2V (vehículo a vehículo) que permite la sincronización y optimización de rutas mediante el intercambio constante de datos entre vehículos en tiempo real.
Hou et al. (2023)	SoC-VRP	Tecnología de transporte inteligente que utiliza aprendizaje por refuerzo profundo para coordinar rutas de múltiples vehículos en sistemas cooperativos.
X. Zhou et al. (2024)	<i>Clustering k-center</i>	Tecnología de agrupamiento espacial que organiza datos de distribución, lo que optimiza la asignación de recursos y la planificación de entregas.
S. Pan et al. (2024)	Sensores térmicos	Tecnología de monitoreo de temperatura que asegura el mantenimiento adecuado en cadenas de frío y evita la pérdida de calidad en productos perecederos.
Yan et al. (2023)	Sensores ambientales	Tecnología de monitoreo que analiza el impacto ecológico de las operaciones de transporte, lo que ayuda a reducir su huella ambiental.
X. Zhou et al. (2024)	Conectividad V2X	Tecnología que conecta vehículos con infraestructura vial mediante comunicación V2X, lo que mejora la sincronización y eficiencia en las rutas.
J. Li et al. (2023)	Medición de tráfico	Tecnología de sensores avanzados que analiza los niveles de tráfico para proporcionar datos en tiempo real para ajustes en la planificación de rutas.
X. Liu et al. (2021)	Control UAV	Tecnología de sistemas avanzados de control para la gestión de drones en operaciones de vigilancia aérea y transporte autónomo.
Hou et al. (2023)	ITS cooperativo	Tecnología de infraestructura inteligente que coordina el flujo de tráfico mediante sistemas de transporte cooperativos, lo que mejora la eficiencia general.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Tecnología	Descripción
Toathom & Champrasert (2024)	Sensores climáticos	Tecnología que monitorea condiciones climáticas adversas, como inundaciones, lo que ayuda en la planificación segura de rutas durante desastres naturales.

P4: ¿qué técnicas de integración se utilizan en sistemas de generación de rutas?

Las técnicas de integración implican la combinación de diferentes metodologías, algoritmos o sistemas para mejorar la eficacia y la coherencia de las soluciones. Puede involucrar la combinación de enfoques de optimización con sistemas de información o plataformas tecnológicas. La Tabla 6 describe las principales técnicas de integración empleadas.

Tabla 6

Técnicas de integración utilizadas para la generación de rutas

Referencia	Técnica de integración	Descripción
Küp et al. (2024)	<i>Framework</i> VRP dinámico	Técnica que integra la planificación de flota compartida con ventanas temporales dinámicas, lo que permite una asignación flexible y eficiente de vehículos en operaciones logísticas.
T. Li et al. (2022)	Sistema autónomo integrado	Combina tecnologías de conducción autónoma con algoritmos de optimización de rutas, lo que crea un sistema completo para la gestión y operación de vehículos autónomos en entornos complejos.
Raeesi & Zografos (2022)	Recarga coordinada	Técnica que coordina rutas de vehículos eléctricos con estaciones de recarga y cambio de baterías, lo que optimiza tiempos y recursos durante los desplazamientos.
Hulagu & Celikoglu (2022)	Flota heterogénea verde	Integra vehículos con diferentes tecnologías en un mismo sistema logístico aplicando criterios ambientales y de eficiencia operativa para optimizar la gestión de flotas mixtas.
Kawabe et al. (2023)	Q-Learning + grafos	Combina el aprendizaje por refuerzo con algoritmos de búsqueda en grafos, lo que permite tomar decisiones óptimas en rutas mediante la exploración eficiente de posibles trayectorias.
Y. Shi et al. (2023)	Misión-ruta UAV	Integra la planificación de misiones con la generación de rutas específicas para drones, lo que asegura la ejecución coordinada y eficiente de tareas autónomas.
Ho et al. (2022)	MAPF + UTM	Fusiona la planificación de movimiento multiagente con la gestión de tráfico aéreo coordinando el movimiento simultáneo de múltiples agentes en espacios compartidos.
Nickkar & Lee (2023)	<i>Framework</i> multinivel	Organiza redes de transporte escolar en niveles jerárquicos, lo que optimiza la planificación de rutas mediante una estructura escalonada y eficiente.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Técnica de integración	Descripción
J. Li et al. (2023)	EV + tráfico	Integra datos de impedancia de tráfico con planificación de rutas para vehículos eléctricos, lo que mejora la eficiencia operativa en entornos urbanos.
H. Zhang et al. (2022)	Info-tráfico multiobjetivo	Combina datos de tráfico en tiempo real con técnicas de optimización multiobjetivo para ajustar rutas y equilibrar tiempo, costos y eficiencia.
Y. Pan et al. (2024)	UAV-humano	Facilita la colaboración entre drones y operadores humanos integrando tareas autónomas con control remoto para operaciones complejas.
Sang et al. (2024)	A* + DWA	Combina el algoritmo A* mejorado con el algoritmo de ventana dinámica integrando exploración global con ajustes locales para optimizar rutas.
X. Zhou et al. (2024)	Conectividad V2X	Integra comunicación entre vehículos y la infraestructura (<i>vehicle-to-everything</i>), lo que mejora la sincronización y coordinación en sistemas de transporte.
Hou et al. (2023)	ITS cooperativo	Facilita la colaboración entre distintas entidades de un sistema de transporte inteligente, lo que promueve decisiones conjuntas y sincronizadas.

P5: ¿qué factores tecnológicos son considerados en la construcción de sistemas de generación de rutas?

Los factores tecnológicos son los elementos que determinan la capacidad de un sistema para funcionar de manera eficaz, escalable y adaptable. Estos incluyen la infraestructura tecnológica disponible, la capacidad de procesamiento de datos, la integración de nuevas tecnologías y la capacidad de adaptarse a condiciones cambiantes. La Tabla 7 describe los factores tecnológicos identificados en los estudios revisados.

Tabla 7

Factores tecnológicos utilizadas para la generación de rutas

Referencia	Factor tecnológico	Descripción
Nouicer et al. (2023)	<i>Big data</i>	Tecnología que permite procesar y analizar grandes volúmenes de datos para obtener <i>insights</i> valiosos mediante el análisis predictivo.
İslim & Çatay (2024)	Baterías inteligentes	Baterías con sistemas de gestión de energía avanzados, lo que mejora la eficiencia y duración, utilizadas en vehículos eléctricos y dispositivos IoT.
Y. Zhou et al. (2022)	Algoritmos de <i>clustering</i>	Técnicas de agrupamiento de datos que organizan grandes cantidades de información, usadas en minería de datos y aprendizaje automático.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Factor tecnológico	Descripción
S. Pan et al. (2024)	Sensores inalámbricos	Sensores que captan datos ambientales o de vehículos sin cables, lo que facilita el monitoreo remoto y la conectividad en entornos IoT.
Zhao et al. (2024)	Monitoreo reenergético	Sistema de tecnologías para controlar y optimizar el consumo de energía en tiempo real, utilizado en edificios inteligentes y vehículos eléctricos.
Yan et al. (2023)	Sensores ambientales	Sensores que miden variables ambientales como temperatura y humedad, implementados en monitoreo en tiempo real en ciudades y agricultura.
Pustokhina et al. (2021)	UAV (drones)	Vehículos aéreos no tripulados que recogen datos o realizan tareas específicas, utilizados en logística, seguridad y monitoreo ambiental.
Y. Zhou et al. (2022)	Comunicación V2X	Tecnología de comunicación entre vehículos e infraestructura, lo que mejora la seguridad y eficiencia en el transporte autónomo y el tráfico.
J. Li et al. (2023)	Sensores de tráfico	Dispositivos que captan el flujo vehicular y las condiciones de tráfico, aplicados en la gestión del tráfico en tiempo real y en vehículos autónomos.
R. Liu & Wang (2022)	Navegación autónoma	Tecnología que permite la navegación sin intervención humana usando GPS y sensores avanzados en vehículos autónomos y drones.
Ramirez et al. (2022)	Redes de sensores (WSN)	Red de sensores distribuidos que recopilan y transmiten datos de forma inalámbrica, utilizados en monitoreo ambiental, de salud y de infraestructura.
Hou et al. (2023)	Transporte inteligente (ITS)	Sistema que optimiza el flujo de tráfico y la seguridad mediante el uso de sensores, cámaras y tecnologías de comunicación en tiempo real.
Toathom & Champrasert (2024)	Sensores climáticos	Sensores diseñados para captar datos meteorológicos en tiempo real, utilizados en la agricultura y en la gestión de desastres naturales.
D'Emidio et al. (2024)	Vehículos autónomos	Vehículos que operan sin intervención humana utilizando tecnologías como sensores, inteligencia artificial y navegación autónoma.
Raeesi & Zografos (2022)	Infraestructura de recarga	Infraestructura avanzada para la carga de vehículos eléctricos, lo que optimiza la distribución y gestión de energía en estaciones de recarga.
Dutta et al. (2023)	Logística rápida	Tecnología que mejora la eficiencia en la entrega de productos mediante el uso de vehículos autónomos y soluciones basadas en inteligencia artificial.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos subrayan avances importantes en la generación automática de rutas, especialmente en cuanto a técnicas, modelos y tecnologías; sin embargo, también resaltan los desafíos persistentes que aún dificultan su implementación

efectiva en distintos contextos. La complejidad de optimizar rutas en entornos dinámicos, con restricciones que varían constantemente, sigue siendo un obstáculo clave.

Un análisis detallado de los enfoques algorítmicos demuestra la efectividad de métodos híbridos como el ACO-ABC y el *double* DQN para optimizar rutas en tiempo real. Estos enfoques combinan, de forma armoniosa, la exploración colaborativa y el aprendizaje reforzado al mostrar una gran capacidad para adaptarse a condiciones cambiantes. A pesar de ello, su dependencia de infraestructuras digitales avanzadas limita su uso en entornos con recursos tecnológicos más reducidos, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar algoritmos más flexibles y accesibles que faciliten su adopción en una mayor variedad de contextos.

La revisión de modelos de optimización, como el VRP dinámico integrado o el enfoque de generación de columnas híbrido, también muestra su eficacia a la hora de planificar rutas bajo condiciones complejas, como ventanas de tiempo variables o demanda fluctuante. Sin embargo, la configuración inicial tan compleja que requieren estos modelos supone una barrera significativa para su aplicación en entornos logísticos emergentes o con infraestructuras menos maduras. Además, la integración de vehículos eléctricos y autónomos añade una capa adicional de complejidad tanto tecnológica como operativa, por lo que será necesario continuar investigando cómo abordar estos aspectos de forma eficiente.

Tecnologías como el IoT, la conectividad V2X y los WSN tienen un potencial transformador en el ámbito logístico, lo que permite la recolección y análisis de datos en tiempo real. Esto mejora el uso de los recursos y la sostenibilidad logística. Sin embargo, su efectividad depende en gran medida de contar con una infraestructura tecnológica avanzada y marcos regulatorios claros, lo que limita su adopción en regiones con infraestructura más débil.

Uno de los puntos clave de este análisis es la intersección entre las tecnologías avanzadas y la sostenibilidad. La implementación de soluciones como baterías inteligentes y sensores avanzados contribuye a hacer la logística más ecológica, pero su adopción se ve frenada por obstáculos económicos y tecnológicos. La degradación de las baterías y los costos de integración de vehículos eléctricos siguen siendo desafíos importantes, lo que requiere soluciones más profundas para garantizar una transición verdaderamente sostenible.

A pesar de los logros alcanzados, el estudio pone en evidencia que las soluciones actuales aún enfrentan dificultades para adaptarse a entornos urbanos densos o regiones con recursos limitados. La escalabilidad de los modelos y su capacidad para operar eficientemente en escenarios de alta congestión o con restricciones severas sigue siendo un reto pendiente.

En resumen, los resultados del estudio destacan la necesidad de abordar las limitaciones críticas que aún persisten, las cuales deben ser resueltas si queremos asegurar el futuro de la logística. La integración efectiva de tecnologías avanzadas, junto con el desarrollo de modelos más adaptativos, será clave para garantizar sistemas logísticos eficientes, sostenibles y resilientes en un entorno cada vez más dinámico y complejo.

CONCLUSIONES

Se observa un avance significativo en la generación automática de rutas, especialmente en lo que respecta a técnicas algorítmicas, modelos de optimización, tecnologías emergentes y enfoques sostenibles; no obstante, este progreso también pone en evidencia varios desafíos que aún deben superarse para asegurar una implementación efectiva de estos sistemas en diversos contextos. En el ámbito de la sostenibilidad, la logística ha dado pasos importantes gracias a innovaciones, tales como los vehículos eléctricos y los sensores avanzados, que contribuyen a reducir la huella de carbono.

A pesar de que estos avances son un paso en la dirección correcta hacia una logística más ecológica, problemas como la degradación de las baterías y los altos costos asociados con estas tecnologías siguen siendo barreras que necesitan ser abordadas mediante investigaciones que las hagan más accesibles, estandarizadas y sostenibles a largo plazo. En general, se puede concluir que persisten limitaciones significativas, tales como la falta de adaptabilidad de las soluciones a entornos urbanos densamente poblados o a regiones con infraestructuras tecnológicas limitadas, lo que permitiría el desarrollo de algoritmos más robustos y menos dependientes de la infraestructura tecnológica existente.

Finalmente, se resalta la necesidad de superar limitaciones tecnológicas, económicas y operativas para garantizar implementaciones exitosas en contextos diversos. En ese contexto, los trabajos futuros se centran en la generación de nuevos algoritmos y propuestas de soluciones que incluyan nuevas tecnologías como drones y sensores autónomos, entre otros.

REFERENCIAS

- Abdullahi, H., Reyes-Rubiano, L., Ouelhadj, D., Faulin, J., & Juan, A. A. (2021). Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.10.028>
- Arifuddin, A., Utamima, A., Mahananto, F., Vinarti, R. A., & Fernanda, N. (2024). Optimizing the capacitated vehicle routing problem at PQR company: A genetic algorithm and Grey Wolf Optimizer approach. *Procedia Computer Science*, 234, 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.023>

- Chen, Z., Hajidavalloo, M. R., Li, Z., & Zheng, M. (2022). A cascaded learning framework for road profile estimation using multiple heterogeneous vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 144(10), 104501. <https://doi.org/10.1115/1.4055041>
- Comert, S. E., & Yazgan, H. R. (2023). A new approach based on hybrid ant colony optimization-artificial bee colony algorithm for multi-objective electric vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106375. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106375>
- Cui, S., Sun, Q., & Zhang, Q. (2022). A time-dependent vehicle routing problem for instant delivery based on memetic algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Artículo 5099008. <https://doi.org/10.1155/2022/5099008>
- D'Emidio, M., Delfaraz, E., Di Stefano, G., Frittella, G., & Vittoria, E. (2024). Route planning algorithms for fleets of connected vehicles: State of the art, implementation, and deployment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(7), 2884. <https://doi.org/10.3390/app14072884>
- Dutta, P., Khatua, S., & Choudhury, S. (2023). Fast move: A prioritized vehicle rerouting strategy in smart city. *Vehicular Communications*, 44, 100666. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100666>
- Guan, X., & Li, G. (2023). Optimization of cold chain logistics vehicle transportation and distribution model based on improved ant colony algorithm. *Procedia Computer Science*, 228, 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.128>
- Hmamed, H., Benghabrit, A., Cherrafi, A., & Hamani, N. (2023). Achieving a sustainable transportation system via economic, environmental, and social optimization: A comprehensive AHP-DEA approach from the waste transportation sector. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21), 15372. <https://doi.org/10.3390/su152115372>
- Ho, F., Goncalves, A., Rigault, B., Geraldés, R., Chicharo, A., Cavazza, M., & Prendinger, H. (2022). Multi-agent path finding in unmanned aircraft system traffic management with scheduling and speed variation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 14(5), 8-21. <https://doi.org/10.1109/MITS.2021.3100062>
- Hou, B., Zhang, K., Gong, Z., Li, Q., Zhou, J., Zhang, J., & De la Fortelle, A. (2023). SoC-VRP: A deep-reinforcement-learning-based vehicle route planning mechanism for service-oriented cooperative ITS. *Electronics (Switzerland)*, 12(20), 4191. <https://doi.org/10.3390/electronics12204191>

- Hu, H., Qin, H., Xu, G., Huang, N., & He, P. (2024). Column generation based hybrid optimization method for last-mile delivery service with autonomous vehicles. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102549. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102549>
- Hulagu, S., & Celikoglu, H. B. (2022). Environment-friendly school bus routing problem with heterogeneous fleet: A large-scale real case. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 3461-3471. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3036696>
- Idrissi, A., Benabbou, R., Benhra, J., & Haji, M. El. (2024). Smart waste collection based on vehicle routing optimization: Case of Casablanca city. *Procedia Computer Science*, 236, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.021>
- İslim, R. B., & Çatay, B. (2024). An effective matheuristic approach for solving the electric traveling salesperson problem with time windows and battery degradation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 132, 107943. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107943>
- Jiang, Z., Chen, W., Zheng, X., & Gao, F. (2024). Research on vehicle path planning of automated guided vehicle with simultaneous pickup and delivery with mixed time windows. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 6(2), e12105. <https://doi.org/10.1049/cim2.12105>
- Kawabe, T., Nishi, T., & Liu, Z. (2023). Flexible route planning for multiple mobile robots by combining Q-Learning and graph search algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3), 1879. <https://doi.org/10.3390/app13031879>
- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 51(1), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Küp, E. T., Cebeci, S., Bayram, B., Aydın, G., Bozkaya, B., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2024). An integrated framework for dynamic vehicle routing problems with pick-up and delivery time windows and shared fleet capacity planning. *Symmetry*, 16(4), 505. <https://doi.org/10.3390/sym16040505>
- Li, J., Tian, S., Zhang, N., Liu, G., Wu, Z., & Li, W. (2023). Optimization strategy for electric vehicle routing under traffic impedance guidance. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(20), 11474. <https://doi.org/10.3390/app132011474>
- Li, T., He, Z., & Wu, Y. (2022). An integrated route planning approach for driverless vehicle delivery system. *PeerJ Computer Science*, 8, e1170. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.1170>

- Liang, S., Song, B., & Xue, D. (2021). Landing route planning method for micro drones based on hybrid optimization algorithm. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2021.100003>
- Liu, R., & Wang, N. (2022). Data-driven bus route optimization algorithm under sudden interruption of public transport. *IEEE Access*, 10, 5250-5263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140947>
- Liu, X., Ma, J., Chen, D., & Zhang, L. Y. (2021). Real-time unmanned aerial vehicle cruise route optimization for road segment surveillance using decomposition algorithm. *Robotica*, 39(6), 1007-1022. <https://doi.org/10.1017/S0263574720000867>
- Liu, Y., Zhang, H., Xu, T., & Chen, Y. (2022). A heuristic algorithm based on travel demand for transit network design. *Sustainability (Switzerland)*, 14(17), 11097. <https://doi.org/10.3390/su141711097>
- Mahdavi, L., Mansour, S., & Sajadieh, M. S. (2022). Sustainable multi-trip periodic redesign-routing model for municipal solid waste collection network: The case study of Tehran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35944-35963. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-256948/v1>
- Martins, L. D. C., Tordecilla, R. D., Castaneda, J., Juan, A. A., & Faulin, J. (2021). Electric vehicle routing, arc routing, and team orienteering problems in sustainable transportation. *Energies*, 14(16), 5131. <https://doi.org/10.3390/en14165131>
- Mojtahedi, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Newton, S. (2021). Sustainable vehicle routing problem for coordinated solid waste management. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100220>
- Nickkar, A., & Lee, Y. J. (2023). Optimal integrated single-framework algorithm for the multi-level school bus network problem. *Algorithms*, 16(11), 528. <https://doi.org/10.3390/a16110528>
- Nouicer, D., Msadaa, I. C., & Grayaa, K. (2023). A novel routing solution for EV fleets: A real-world case study leveraging double DQNs and graph-structured data to solve the EVRPTW problem. *IEEE Access*, 11, 122116-122127. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3327324>
- Pal, S. (2023). Steer towards sustainability: The roadmap to cost and eco-efficient transportation via AI-enhanced routing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(12), 874-878. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.57467>
- Pan, S., Liao, H., Zheng, G., Huang, Q., & Shan, M. (2024). Cold chain distribution route optimization for mixed vehicle types of fresh agricultural products considering

- carbon emissions: A study based on a survey in China. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18), 8207. <https://doi.org/10.3390/su16188207>
- Pan, Y., Li, L., Qin, J., Chen, J. J., & Gardoni, P. (2024). Unmanned aerial vehicle-human collaboration route planning for intelligent infrastructure inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(14), 2074-2104. <https://doi.org/10.1111/mice.13176>
- Pustokhina, I. V., Pustokhin, D. A., Lydia, E. L., Elhoseny, M., & Shankar, K. (2021). Energy efficient neuro-fuzzy cluster based topology construction with metaheuristic route planning algorithm for unmanned aerial vehicles. *Computer Networks*, 196, 108214. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108214>
- Raeesi, R., & Zografos, K. G. (2022). Coordinated routing of electric commercial vehicles with intra-route recharging and en-route battery swapping. *European Journal of Operational Research*, 301(1), 82-109. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.09.037>
- Ramirez, J. E., Santiago, C. M., & Kamiyama, A. (2022). Route planning using wireless sensor network for garbage collection in COVID-19 pandemic. *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(4). <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.01304105>
- Ramirez-Robles, E., Starostenko, O., & Alarcon-Aquino, V. (2024). Real-time path planning for autonomous vehicle off-road driving. *PeerJ Computer Science*, 10. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.2209>
- Sang, W., Yue, Y., Zhai, K., & Lin, M. (2024). Research on AGV path planning integrating an improved A* algorithm and DWA algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17), 7551. <https://doi.org/10.3390/app14177551>
- Sathyamurthy, E., Herrmann, J. W., & Azarm, S. (2024). Hybrid metaheuristic approaches for the multi-depot rural postman problem with rechargeable and reusable vehicles. *IEEE Access*, 12, 86523-86540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3414331>
- Shi, J., Zhang, J., Lei, H., Liu, Z., & Wang, R. (2023). Joint mission and route planning of unmanned air vehicles via a learning-based heuristic. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 34(1), 81-98. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2023.000005>
- Shi, Y., Liu, W., & Zhou, Y. (2023). An adaptive large neighborhood search based approach for the vehicle routing problem with zone-based pricing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 124, 106506. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106506>

- Sundarraaj, S., Reddy, R. V. K., Basam, M. B., Lokesh, G. H., Flammini, F., & Natarajan, R. (2023, 7 de agosto). Route planning for an autonomous robotic vehicle employing a weight-controlled particle swarm-optimized Dijkstra algorithm. *IEEE Access*, *11*, 92433-92442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3302698>
- Szwarc, K., Nowakowski, P., & Boryczka, U. (2021). An evolutionary approach to the vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand. *Soft Computing*, *25*(8), 6665-6680. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05665-w>
- Toathom, T., & Champrasert, P. (2024). Vehicle route planning for relief item distribution under flood uncertainty. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(11). <https://doi.org/10.3390/app14114482>
- Tsolakis, N., Zissis, D., Papaefthimiou, S., & Korfiatis, N. (2022). Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*, *60*(14), 4508-4528. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1914355>
- Wang, X., Liu, Z., & Li, X. (2023). Optimal delivery route planning for a fleet of heterogeneous drones: A rescheduling-based genetic algorithm approach. *Computers and Industrial Engineering*, *179*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109179>
- Yan, L., Tang, Y., Peng, C., Cai, Y., Zhang, W., & Wang, J. (2023, 22 de diciembre). Ecological and real-time route selection method for multiple vehicles in urban road network. *Journal of Advanced Transportation*, *2023*, Artículo 3770800. <https://doi.org/10.1155/2023/3770800>
- Zhang, H., Gan, X., Li, S., & Chen, Z. (2022). UAV safe route planning based on PSO-BAS algorithm. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, *33*(5), 1151-1160. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2022.000111>
- Zhang, M. Y., Yang, S. C., Feng, X. J., Chen, Y. Y., Lu, J. Y., & Cao, Y. G. (2022). Route planning for autonomous driving based on traffic information via multi-objective optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(22), 11817. <https://doi.org/10.3390/app122211817>
- Zhao, L., Li, F., Sun, D., & Zhao, Z. (2024). An improved ant colony algorithm based on Q-learning for route planning of autonomous vehicle. *International Journal of Computers, Communications and Control*, *19*(3), 1-15. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2024.3.5382>
- Zheng, C., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2021). Urban logistics delivery route planning based on a single metro line. *IEEE Access*, *9*, 50819-50830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069415>

- Zhou, X., Wang, J., Liu, W., Pan, J., Zhao, T., Jiang, F., & Li, R. (2024). An intelligent connected vehicle material distribution route model based on k-center spatial cellular clustering and an improved cockroach optimization algorithm. *Symmetry*, *16*(6), 749. <https://doi.org/10.3390/sym16060749>
- Zhou, Y., Shu, J., Zheng, X., Hao, H., & Song, H. (2022). Real-time route planning of unmanned aerial vehicles based on improved soft actor-critic algorithm. *Frontiers in Neurorobotics*, *16*. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1025817>