



Propuesta para la implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.

William Rafael Navarro Zúñiga

Juan Enrique Hidalgo Urrea

Luz Mireya Candil Parra

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Bogotá, Colombia

2025

Propuesta para la implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.

William Rafael Navarro Zúñiga

Juan Enrique Hidalgo Urrea

Luz Mireya Candil Parra

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Directora:

Luz Maribel Guevara Ortega

Modalidad:

Monografía

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Magister en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Bogotá, Colombia

2025

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

De parte de William:

A mi esposa y mis hijas, por su comprensión, paciencia y tiempo. A mis padres que me siguen apoyando en mis estudios.

De Parte de Luz Mireya:

A Dios, por haberme permitido llegar a este punto, a mi esposo por su apoyo incondicional siempre.

De Parte de Juan:

Agradezco a Dios por darme la fuerza y claridad para culminar este proyecto. A mi familia, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de este camino. A mis docentes, compañeros y amigos, gracias por compartir este proceso y enriquecer mi formación. A todas las personas e instituciones que contribuyeron de alguna forma a este trabajo, mi más sincero agradecimiento

Proverbios 2:6-7 NTV

6 ¡Pues el Señor concede sabiduría!

De su boca provienen el saber y el entendimiento. 7 Al que es honrado, él le concede el tesoro del sentido común. Él es un escudo para los que caminan con integridad. Él da sabiduría a la gente que es justa con los demás, y protege a los que viven honestamente.

Dios

Agradecimientos

A Juan Manuel González Otero, director fundador de Black Square SAS, por brindarnos la información técnica necesaria como guía para realizar este trabajo.

Al Ingeniero Carlos Valencia, Piloto jefe en ORKID Tech., por guiarnos en cuanto a los desafíos y oportunidades para cumplir el marco regulatorio de Colombia y como pionero de implementación de esta tecnología en el país.

A Julie Pauline Mahecha Lancheros, Gerente de Cadena de Suministro de Tiendas de Ahorro 3A, en el apoyo y colaboración de la evaluación técnica del instrumento de recolección de información.

A los profesores que nos acompañaron durante el Seminario de Investigación Miguel Ángel González Curbelo, así como en el desarrollo de nuestro Trabajo de Grado Luz Maribel Guevara Ortega.

Resumen

La logística de última milla representa uno de los mayores desafíos para las cadenas de suministro en entornos urbanos, debido a factores como la congestión vial, los altos costos operativos y la necesidad de entregas rápidas y sostenibles. En este contexto, la presente investigación desarrolla una propuesta para la implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia, integrando aspectos técnicos, legales, ambientales y sociales. A través de una metodología mixta, que combina análisis bibliométrico, diagnóstico contextual y validación mediante encuestas a empresas logísticas, se identificaron oportunidades y barreras para la adopción de esta tecnología emergente. Los resultados indican una percepción favorable por parte del sector logístico frente al uso de drones, especialmente por su potencial para reducir tiempos de entrega, minimizar costos y contribuir a la sostenibilidad. No obstante, también se evidenciaron limitaciones regulatorias, técnicas y de aceptación social que requieren estrategias específicas de mitigación. La propuesta desarrollada contempla un marco de implementación adaptable al contexto colombiano, alineado con las regulaciones actuales y orientado hacia una logística más eficiente y resiliente. Esta investigación aporta a la modernización del sector logístico nacional, promoviendo soluciones innovadoras y sostenibles para el transporte urbano de última milla.

Palabras clave: drones, logística de última milla, entregas urbanas, sostenibilidad, cadena de suministro, Colombia.

Abstract

Last-mile logistics represents one of the most critical challenges for supply chains in urban environments, due to factors such as traffic congestion, high operational costs, and the growing demand for fast and sustainable deliveries. In this context, this research proposes a model for the implementation of drones in last-mile deliveries in urban areas of Colombia, incorporating technical, legal, environmental, and social dimensions. Through a mixed-method approach, including bibliometric analysis, contextual diagnosis, and validation via surveys applied to logistics companies, this study identified both opportunities and barriers to the adoption of this emerging technology. Results reveal a favorable perception from the logistics sector regarding drone use, especially for its potential to reduce delivery times, minimize costs, and enhance sustainability. However, regulatory, technical, and social acceptance constraints were also identified, requiring targeted mitigation strategies. The proposed model offers a practical and context-sensitive framework aligned with current Colombian regulations and aims to foster a more efficient and resilient logistics ecosystem. This research contributes to the modernization of the national logistics sector by promoting innovative and sustainable solutions for urban last-mile delivery.

Keywords: drones, last-mile logistics, urban deliveries, sustainability, supply chain, Colombia.

Contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
Lista de figuras.....	12
Lista de tablas	14
Capítulo I. Introducción.....	15
Objetivos.....	18
Objetivo general.....	18
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
Justificación	19
Capítulo II. Marco Teórico.....	23
Logística de última milla.....	23
<i>Logística de última milla en el mundo.....</i>	<i>24</i>
<i>Logística de última milla en Latinoamérica</i>	<i>25</i>
<i>Logística de última milla en Colombia</i>	<i>25</i>
Métodos tradicionales de distribución de última milla y sus limitaciones	26
Desafíos de la logística de última milla en áreas urbanas	27
Tendencias en logística de última milla.....	28
Oportunidades de la logística de última milla con drones.....	29
Logística de última milla con drones	29
<i>Tecnología de drones.....</i>	<i>29</i>
<i>Tipos de drones.....</i>	<i>30</i>
<i>Características técnicas de los drones</i>	<i>33</i>
<i>Tecnologías emergentes para drones de entrega</i>	<i>34</i>
Integración de Drones en la Logística de Última Milla.....	35

<i>Beneficios de los Drones en la Logística de Última Milla</i>	35
<i>Sostenibilidad en el Uso de Drones en la Logística de Última Milla</i>	36
<i>Aceptación Pública y Percepción de los Drones en la Logística de Última Milla</i>	37
<i>Aplicaciones Emergentes en Salud y Emergencias</i>	37
Desafíos de Implementación	37
<i>Limitaciones y Consideraciones</i>	38
<i>Capacidad de Carga Reducida</i>	38
<i>Restricciones Regulatorias y Técnicas</i>	38
<i>Marco Regulatorio en Colombia para el Uso de Drones en Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas</i>	39
Consideraciones Adicionales para Entregas de Última Milla:	41
Hipótesis	42
Variables	43
Capítulo III. Metodología	46
Análisis bibliométrico	47
Diagnóstico	47
Propuesta	48
Prueba de hipótesis	50
Capítulo IV. Exploración del Uso de Drones en la Distribución de Última Milla: Revisión Bibliométrica (2019–2024) y Diagnóstico del Entorno Colombiano	51
Análisis bibliométrico del uso de drones en transporte de última milla (2019-2024) ...	51
<i>Publicaciones</i>	51
<i>Análisis de Publicaciones</i>	53
<i>Análisis de Autores y Colaboraciones</i>	55
Diagnóstico de la situación actual del uso de drones en entregas de última milla	59
Uso de Drones en la Última Milla a Nivel Global	59
Uso de Drones en América Latina	61
Uso de Drones en Colombia	63

Casos Orkid y Black Square	63
Diagnóstico de la situación actual del uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.....	65
Barreras para la implementación de drones en logística de última milla	66
<i>Preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad</i>	67
<i>Principales riesgos para la implementación de drones en entregas de última milla en Colombia</i>	68
<i>Desafíos regulatorios</i>	70
<i>Percepción pública y barreras psicológicas</i>	73
<i>Problemas ambientales</i>	74
<i>Factores económicos</i>	77
<i>Limitaciones técnicas</i>	80
Consideraciones finales sobre drones en última milla en Colombia	85
Resultados prueba de hipótesis	87
Capítulo V. Propuesta para superar las barreras de la implementación de drones en entregas en la última milla en las áreas urbanas de Colombia: Oportunidades de solución.....	88
Aspectos del Marco Regulatorio Integrado	88
Aspectos de la Innovación Tecnológica	90
Aspectos de la Gestión de la Seguridad	91
Aspectos de la Gestión Ambiental Sostenible	92
Aspectos de la Aceptación Social y Participación Comunitaria	92
Aspectos del Impacto Económico y Laboral Positivo	93
Propuesta para implementación de Drones en Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas de Colombia.....	95
Proyecciones de Ingresos por escenarios.....	99
Discusión	102
Capítulo VI. Conclusiones y Trabajo Futuro.....	105

Conclusiones105

Trabajo Futuro107

Trabajo de investigación108

Referencias..... 109

Anexos 128

Lista de figuras

Figura 1	Publicaciones por año	52
Figura 2	Tipo de publicación	53
Figura 3	Publicaciones por año de las 10 fuentes más destacadas.....	54
Figura 4	Publicaciones por autor	55
Figura 5	Publicaciones por institución	57
Figura 6	Publicaciones por país o territorio	58
Figura 7	Preparación de las empresas colombianas para uso de drones en última milla	66
Figura 8	Principales riesgos para la implementación de drones en entregas de última milla en Colombia.....	67
Figura 9	Aspectos de seguridad que limitan el uso de drones en última milla en Colombia.....	69
Figura 10	Desafíos en la ejecución de la entrega	69
Figura 11	Visor Geográfico UAS	71
Figura 12	Barreras regulatorias o legales para las entregas de última milla en Colombia	72
Figura 13	Aspectos psicológicos más relevantes para la percepción del público y del usuario final sobre el uso de drones en la entrega de última milla en Colombia	74
Figura 14	Aspectos ambientales del uso de drones en última milla en Colombia	75
Figura 15	Sostenibilidad del uso de drones en última milla en Colombia.....	76
Figura 16	Percepción sobre mejoras en costos operacionales.....	77
Figura 17	Principales costos de implementación de drones en última milla en Colombia	78
Figura 18	Percepción de retorno a la inversión en drones en última milla en Colombia	79
Figura 19	Posibles modelos de ingresos por operación de drones en última milla	80
Figura 20	Desafíos técnicos de las entregas de última milla en Colombia.....	82
Figura 21	Nivel de infraestructura técnica mínima para implementar drones en última milla ...	83
Figura 22	Productos para transportar mediante drones.....	84

Figura 23 Algunas tecnologías para superar los desafíos técnicos de los drones en última milla85

Figura 24 Perspectivas sobre drones en última milla en los próximos cinco años86

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Índice de Rendimiento Logístico</i>	19
Tabla 2 <i>Tipos de drones</i>	32
Tabla 3 <i>VARIABLES de estudio</i>	45
Tabla 4 <i>Valores del análisis</i>	87
Tabla 5 <i>Características técnicas</i>	96
Tabla 6 <i>Alcance del Piloto</i>	97
Tabla 7 <i>Plan de Ejecución</i>	97
Tabla 8 <i>Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)</i>	98
Tabla 9 <i>Inversión requerida</i>	98
Tabla 10 <i>Costos Operativos Anuales (COP)</i>	99
Tabla 11 <i>Proyecciones Financieras</i>	100
Tabla 12 <i>Modelos de implementación de drones</i>	104

Capítulo I. Introducción

La logística de última milla se ha transformado en uno de los desafíos más significativos dentro de la gestión de la cadena de suministro, debido a su influencia directa en la satisfacción del cliente, los costos operativos y la sostenibilidad empresarial. Esta fase final implica llevar productos desde un centro de distribución hasta el punto de destino del consumidor y, en áreas urbanas, se enfrenta a obstáculos como el tráfico, el acceso limitado y elevados costos de operación (Boysen et al., 2020; Muñoz-Villamizar et al., 2021). El crecimiento del comercio electrónico en Colombia ha generado la necesidad de desarrollar nuevas soluciones logísticas que puedan satisfacer de manera eficiente las crecientes exigencias del mercado (The Logistics World, 2024). En este contexto, la adopción de drones como tecnología emergente en las entregas de última milla ha cobrado especial relevancia.

El principal problema de esta investigación es la ausencia de un modelo práctico que facilite la implementación eficaz de drones para entregas de última milla en zonas urbanas de Colombia, un país con condiciones geográficas y urbanísticas desafiantes. A nivel mundial, el uso de drones ha demostrado ser efectivo para optimizar los tiempos de entrega, reducir los costos y apoyar la sostenibilidad al disminuir las emisiones de CO₂ (Borghetti et al., 2022; Moshref-Javadi & Winkenbach, 2021). Sin embargo, en Colombia, la adopción de esta tecnología presenta barreras técnicas, legales y ambientales que deben ser abordadas para asegurar su viabilidad (Jazairy et al., 2024). Como respuesta a este problema, se propone la pregunta de investigación: ¿Qué condiciones permiten implementar drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia de manera eficiente y sostenible?

Con el fin de responder a esta cuestión, esta tesis se propone desarrollar una propuesta que facilite la adopción de drones en las entregas de última milla en zonas urbanas de Colombia, teniendo en cuenta los factores técnicos, ambientales y legales que afectan su implementación. La metodología empleada combina un enfoque mixto, cualitativo y cuantitativo,

que permite analizar de manera integral el contexto colombiano y las especificidades del uso de drones en el país (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2023; Bernal, 2016). Se parte de un estado del arte que revisa los principales estudios internacionales sobre la logística de última milla y el uso de drones, destacando las experiencias de países donde esta tecnología ha sido implementada con éxito (Halldórsson & Wehner, 2020; Boysen et al., 2020).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el uso de drones en las entregas de última milla puede aportar de manera considerable a la reducción de la huella de carbono en las operaciones logísticas, mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental del transporte urbano (Patella et al., 2020). Asimismo, investigaciones recientes han destacado que los drones pueden revolucionar los procesos logísticos al disminuir los costos operativos y mejorar los tiempos de entrega, lo cual resulta particularmente importante en ciudades con alta densidad poblacional como Bogotá, Medellín y Cali (Pina-Pardo et al., 2024; Muñoz-Villamizar et al., 2021). En este sentido, esta investigación no solo busca proponer una solución innovadora, sino también contribuir al desarrollo de prácticas logísticas más sostenibles en Colombia.

Este documento se estructura de la siguiente manera: el segundo capítulo desarrolla el marco teórico, en el cual se definen los conceptos de logística de última milla, se revisan experiencias internacionales y se analizan los factores técnicos, legales y ambientales que impactan la adopción de drones. Además, este capítulo examina la situación actual en Colombia, identificando las principales barreras y oportunidades para implementar esta tecnología (Jazairy et al., 2024; Purdon et al., 2023). El tercer capítulo se centra en la metodología de investigación, detallando el enfoque mixto utilizado y las herramientas empleadas para la recopilación y evaluación de datos. En el cuarto capítulo, se presenta el análisis bibliométrico de las investigaciones desarrolladas entre los años 2019 y 2024 en el uso de drones en última milla a nivel mundial, los resultados del diagnóstico sobre el uso de drones en áreas urbanas de Colombia, basados en encuestas a empresas del sector logístico y

entrevistas a especialistas en la materia, de manera comparada con investigaciones sobre barreras identificadas para su implementación.

En el quinto capítulo, se elabora una propuesta completa para implementar drones en las entregas de última milla en Colombia, tomando en cuenta las especificaciones técnicas, ambientales y legales identificadas. Esta propuesta se fundamenta en las mejores prácticas internacionales y se adapta al contexto colombiano, considerando las particularidades geográficas, regulatorias y sociales del país, analizando desde el contexto global hasta un contexto particular y específico (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2023; Bernal, 2016). El último capítulo expone las conclusiones y ofrece recomendaciones para investigaciones futuras, destacando la importancia de superar las barreras existentes y fomentar la adopción de tecnologías disruptivas en el sector logístico colombiano.

En síntesis, esta investigación tiene como objetivo proporcionar una propuesta práctica para la adopción de drones en las entregas de última milla en Colombia, fomentando tanto la sostenibilidad como la eficiencia logística. Mediante un análisis exhaustivo de los factores técnicos, legales y ambientales, esta tesis busca apoyar la modernización del sector logístico colombiano y proponer soluciones innovadoras para afrontar los retos de la logística urbana.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar una propuesta para la implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.

Objetivos específicos

- Elaborar el estado del arte del uso de drones de última milla en el plano internacional mediante la revisión de bibliografía relacionada con el tema.
- Elaborar un diagnóstico de la situación actual del uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.
- Desarrollar una propuesta para el uso de drones en empresas que realicen entregas de última milla teniendo en cuenta las especificaciones ambientales, legales y técnicas en Colombia.

Justificación

La investigación propone una solución para la distribución de última milla en zonas urbanas de Colombia, basada en la implementación de drones como herramienta clave para el desarrollo de cadenas de suministro sostenibles. Esta iniciativa busca analizar nuevos mecanismos y tecnologías que permitan generar estrategias de respuesta más eficaces, logrando tiempos de entrega más cortos sin incrementar los costos operativos, y promoviendo así empresas más productivas y competitivas. Como se muestra en la Tabla 1, Colombia alcanza una calificación de 3.13 en el indicador de calidad logística, ubicándose como el quinto país con mejor desempeño en Latinoamérica; no obstante, aún se encuentra por debajo de naciones como Estados Unidos (3.9) y del líder mundial en este indicador, Singapur (4.4). En este contexto, mejorar la puntualidad y el seguimiento de las entregas resulta fundamental para consolidar cadenas de suministro más sostenibles y fortalecer la competitividad empresarial en el país.

Tabla 1

Índice de Rendimiento Logístico

País	Competencia logística	Puntualidad	Seguimiento	Total indicadores	Promedio indicadores calidad de servicio
Singapur	4.4	4.3	4.4	13.1	4.37
Estados Unidos de América	3.9	3.8	4.2	11.9	3.97
Brasil	3.3	3.5	3.2	10	3.33
Uruguay	3.1	3.2	3.3	9.6	3.20
México	3	3.5	3.1	9.6	3.20
Perú	2.7	3.4	3.4	9.5	3.17
Colombia	3.1	3.2	3.1	9.4	3.13
Panamá	3	3.4	2.9	9.3	3.10
Chile	3.1	3.2	3	9.3	3.10
Costa Rica	2.9	3.2	2.9	9	3.00

Nota: Adaptado de World Population Review. Logistics Performance Index by Country 2025.

Según el Estudio sobre Logística Última Milla del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia TIC (MinTIC, 2021), en áreas urbanas principales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga, el tiempo promedio de entrega de productos adquiridos por comercio electrónico oscila entre 11 y 15 horas, superando ampliamente las expectativas de los consumidores que demandan entregas en menos de 6 horas. Además, el estudio señala que, en entornos urbanos, los principales problemas reportados incluyen demoras en la entrega (62%), errores en la dirección (13%) y daños en los productos (16%), afectando de manera directa los niveles de servicio comprometidos. Solo el 43% de los consumidores manifestaron estar "muy satisfechos" con la entrega de sus compras online. Estos datos reflejan disfunciones importantes en la última milla, especialmente en el cumplimiento de tiempos de entrega y calidad de servicio.

Los retos relacionados con la logística de última milla ofrecen oportunidades tanto para las empresas colombianas como para la fuerza laboral. El crecimiento del comercio electrónico en el país y la expansión de las áreas urbanas han generado una creciente demanda de soluciones logísticas efectivas para las entregas de última milla (The Logistics World, 2024), así mismo, aumentando los desafíos y la necesidad de garantizar las entregas para asegurar el correcto funcionamiento de las cadenas de suministro, donde además de tener en cuenta factores como costos y velocidad de transporte, cobran especial relevancia la sostenibilidad social y ambiental (Borghetti et al., 2022).

De acuerdo con investigaciones recientes, la utilización de drones en la última milla posee el potencial de revolucionar los procesos logísticos, optimizando los tiempos de entrega y disminuyendo los costos operativos. La adopción de esta tecnología podría generar importantes ahorros, incrementar la satisfacción del cliente y mejorar la eficiencia en la cadena de suministro (Patella et al., 2020), asimismo, el uso de drones puede influir positivamente en la generación de empleo y en la integración tecnológica de las empresas, contribuyendo al desarrollo socioeconómico del país. En este contexto, la adopción de drones aborda esta

problemática al ofrecer una solución rápida y flexible con grandes beneficios para entregar productos en zonas urbanas densamente pobladas, incluso en horarios no convencionales (Halldórsson & Wehner, 2020); Estudios anteriores han demostrado que la implementación de drones puede desempeñar un papel fundamental en la disminución del impacto ambiental de las entregas en áreas urbanas, generando beneficios sociales al reducir la huella de carbono y promover la sostenibilidad (Moshref-Javadi & Winkenbach, 2021).

La introducción de drones en las operaciones logísticas para la entrega en la última milla precisa que las organizaciones revisen y adapten sus procesos internos, en términos de impacto organizacional e innovación tecnológica, logrando diferenciación en un mercado altamente competitivo (Pina-Pardo et al., 2024). Este enfoque contribuye a incrementar la productividad y agilizar las operaciones logísticas, esto incluye desde la capacitación del personal y la reestructuración de flujos de trabajo hasta la integración de tecnologías complementarias como la inteligencia artificial y la automatización. La implementación de drones requiere acceso a infraestructura tecnológica avanzada y la superación de barreras regulatorias en Colombia, lo que plantea un desafío logístico y legal importante (Jazairy et al., 2024); superar estos obstáculos proporcionará una ventaja competitiva duradera para las empresas. Las operaciones con drones en el país están reglamentadas por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil a través de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC 100) (Aerocivil, 2024).

A nivel general, resulta complejo encontrar estudios comparativos en Colombia sobre el rendimiento de una operación logística basada en drones que permitan comprender las circunstancias en las que estos modelos funcionan de forma eficiente y efectiva (Gutiérrez et al., 2024). Con el desarrollo de esta propuesta, se busca generar información práctica e integral, actualizada para los tomadores de decisiones logísticas sobre la adopción de drones en sus sistemas de entrega de última milla, sus perspectivas, requisitos y posibles

repercusiones, con el fin de analizar las características de una operación de entrega de última milla en Colombia alineada con las tendencias globales de sostenibilidad y eficiencia.

Capítulo II. Marco Teórico

La logística de última milla, como etapa final en la cadena de suministro, ha adquirido una relevancia crítica en el comercio moderno debido a su impacto directo en la satisfacción del cliente, costos de entrega y eficiencia operativa, especialmente en entornos urbanos congestionados. Este marco teórico explora el concepto de logística de última milla, sus desafíos y las oportunidades que presentan las nuevas tecnologías, particularmente el uso de drones, para optimizar este proceso. El creciente auge del comercio electrónico y las demandas de los consumidores por entregas rápidas y eficientes han intensificado la complejidad de la logística de última milla, especialmente en áreas urbanas, donde los métodos tradicionales de entrega enfrentan desafíos como la congestión vehicular, la contaminación ambiental y los altos costos operativos. La incorporación de drones a la logística de última milla surge como una solución innovadora con el potencial de transformar las entregas, mejorando la eficiencia, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental. Este trabajo analiza el estado actual de la logística de última milla, las características y tipos de drones, los beneficios, desafíos y regulaciones asociadas a su implementación, con el objetivo de brindar una visión completa sobre su potencial y las consideraciones necesarias para su adopción.

Enfoque objetivo: Brindar una visión completa sobre la logística de última milla, con énfasis en el uso de drones, para comprender su potencial y las consideraciones necesarias para su adopción.

Logística de última milla

Se refiere a la última etapa del proceso de entrega, donde los productos son transportados desde un centro de distribución hasta el destino final del consumidor. Esta etapa es crítica por su impacto directo en la satisfacción del cliente, costos de entrega y eficiencia operativa. Boysen et al., (2020), destacan que la optimización de esta fase es esencial,

especialmente en entornos urbanos donde la congestión y la distancia pueden aumentar significativamente los costos y tiempos de entrega. El estudio de Jaller et al., (2020), proporciona una visión integral sobre cómo las empresas están empleando tecnologías avanzadas y modelos de negocio innovadores para abordar estos retos. Además, Lyons y McDonald (2022), realizaron una revisión sistemática de estrategias de última milla para la entrega de mercancías urbanas, destacando la consolidación urbana y la coordinación logística como claves para mejorar la eficiencia. Por otro lado, Nataraj et al., (2019), analizan los centros de consolidación urbana y cómo la cooperación entre las partes interesadas puede mejorar la logística urbana al combinar decisiones de localización y planificación de rutas.

Logística de última milla en el mundo

A nivel global la logística de última milla enfrenta múltiples desafíos que están siendo transformados por tendencias como la sostenibilidad ambiental y las innovaciones tecnológicas, impulsadas por agendas verdes y presiones económicas. Demir et al., (2022), destacan que la logística de última milla no solo responde a la necesidad de conveniencia para el consumidor y la optimización del transporte, sino que también ofrece una oportunidad significativa para promover la sostenibilidad financiera y ambiental. Además, los autores subrayan avances tecnológicos como drones, robots de entrega y la *platooning* de camiones, vehículos autónomos eléctricos (BEV), vehículos impulsados por energías limpias como el Hidrogeno H2, así como la necesidad de abordar innovaciones sociales y empresariales relacionadas con la logística urbana y verde.

Por otro lado, Bosona (2020), identifica los principales desafíos de la logística de última milla en áreas urbanas, resaltando oportunidades de intervención mediante configuraciones potenciales como el uso de vehículos ligeros y bicicletas de carga. Estos modelos podrían resultar atractivos si se minimizan los fallos en las entregas. Los desafíos incluyen aspectos tecnológicos, infraestructurales, sistémicos y de costos logísticos, los cuales se abordan desde las perspectivas de sostenibilidad ambiental, económica y social.

Logística de última milla en Latinoamérica

Actualmente enfrenta desafíos únicos debido a las variadas condiciones geográficas, económicas y sociales de la región. Sin embargo, también ofrece oportunidades para implementar soluciones innovadoras que mejoren la eficiencia y satisfacción del cliente. En un estudio sobre la sostenibilidad de las entregas postales en Río de Janeiro, se evaluó el uso de vehículos eléctricos de menor tamaño, como triciclos eléctricos, frente a vehículos ligeros de entrega convencionales. Los resultados indicaron que los triciclos eléctricos son una alternativa más viable en términos económicos, ambientales y sociales, sin necesidad de incentivos públicos (Bandeira et al., 2019). Por otro lado, Puente-Mejía et al., (2018), analizan el impacto de las políticas de tráfico en Quito, Ecuador, destacando cómo la planificación urbana y la regulación del tráfico pueden influir significativamente en la eficiencia de la logística de última milla. Además, Castillo et al., (2019), identifican las principales dificultades en Lima, Perú, relacionadas con la falta de infraestructura adecuada para la entrega eficiente, proponiendo la necesidad de políticas públicas mejoradas para facilitar las operaciones logísticas. Finalmente, Zepeda Cancino y Vázquez García (2021), ofrecen una visión sobre el potencial de la energía eólica para apoyar la transición energética y su impacto en la logística de última milla en la región, destacando la importancia de considerar alternativas sostenibles.

Logística de última milla en Colombia

Una variedad de estudios ha proporcionado diferentes perspectivas sobre las metodologías y desafíos específicos en áreas urbanas congestionadas y situaciones extraordinarias. Gutiérrez-Franco et al., (2021), desarrollaron un estudio para optimizar la logística en Bogotá, enfocándose en cómo la tecnología y el análisis de datos pueden prever y mitigar problemas logísticos, proponiendo soluciones que mejoren la planificación y adaptabilidad de las operaciones urbanas. Muñoz-Villamizar et al., (2021), analizan el impacto de interrupciones en las operaciones de última milla, utilizando modelos cuantitativos para evaluar y mejorar la resiliencia de las operaciones de entrega en Bogotá, ofreciendo un

entendimiento detallado de cómo minimizar los efectos negativos de estas interrupciones. Por su parte, Orjuela-Castro et al., (2019), discuten los retos logísticos para distribuir frutas perecederas en Bogotá, resaltando la necesidad de sistemas de distribución rápidos y eficientes que mantengan la calidad del producto en una megaciudad. En un enfoque hacia la sostenibilidad, Garces et al., (2021), investigan la electrificación de la última milla, examinando cómo las políticas pueden influir en la adopción de tecnologías sostenibles y mejorar la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono.

Por otra parte, José et al., (2020), exploran la viabilidad de implementar tecnologías de la industria 4.0 en los operadores logísticos del departamento del Atlántico, resaltando la mejora en la toma de decisiones y la efectividad empresarial.

Un modelo específico de optimización de la distribución logística de última milla fue diseñado para enfrentar los bajos indicadores de satisfacción del cliente en la empresa "Tu Envío Fácil SAS" de Bogotá, demostrando la importancia de abordar las complejidades del tráfico y la infraestructura en las soluciones de última milla (Bermúdez Hernández & Sarmiento Saavedra, 2020).

Métodos tradicionales de distribución de última milla y sus limitaciones

Los métodos tradicionales de distribución de última milla se refieren a la entrega de productos desde un centro de distribución hasta el destino final del consumidor, generalmente realizada a través de vehículos motorizados como camiones y furgonetas. Este enfoque enfrenta numerosas limitaciones, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Breuer et al., (2021), examinaron el uso de vehículos eléctricos y camiones híbridos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire, proponiendo que los vehículos eléctricos de celdas de combustible pueden ser una solución más efectiva para las áreas urbanas con alta congestión. Adicionalmente, Sun et al., (2020), estudiaron la coordinación y optimización de la asignación de pedidos y planificación de rutas de entrega, mostrando que una optimización adecuada reduce costos y mejora el tiempo de entrega, lo que

impacta positivamente en la satisfacción del cliente. Qin et al., (2019), desarrollaron un modelo para optimizar el problema de rutas de vehículos en logística de cadena de frío, considerando tanto la satisfacción del cliente como las emisiones de carbono, destacando que una asignación eficiente mejora la satisfacción del cliente. Por último, Yang et al., (2021), propusieron un diseño robusto de redes para mejorar la última milla en la logística de cadena de frío, optimizando las rutas y mejorando la satisfacción del cliente mediante una distribución más eficiente y flexible.

Desafíos de la logística de última milla en áreas urbanas

Los actuales desafíos son multifacéticos y críticos para las operaciones de entrega eficientes. Estos incluyen congestión vehicular, dificultades de acceso a ciertas zonas, costos elevados e insatisfacción del cliente. Bosona (2020), aborda estos problemas destacando cómo la congestión vehicular y el acceso restringido aumentan significativamente el tiempo de entrega y los costos operativos, afectando negativamente la satisfacción del cliente. Ballare (2020), investiga cómo la creciente expectativa de entregas rápidas en el comercio electrónico exacerba estos desafíos, sugiriendo que soluciones como la *crowdshipping* podrían mitigar algunos de estos problemas al ofrecer mayor flexibilidad en las ventanas de entrega y reducir los costos de transporte. Comi y Savchenko (2021), analizan modos de transporte amigables con el ambiente para la entrega de última milla, destacando cómo opciones más sostenibles podrían aliviar parte de la congestión y mejorar la satisfacción del cliente mediante reducciones en el impacto ambiental. Finalmente, Paddeu y Parkhurst (2020), exploraron cómo la automatización en las entregas urbanas puede transformar el sector de la logística, reduciendo las externalidades negativas y mejorando la competitividad, aunque aún existen barreras prácticas y políticas para su adopción generalizada.

Tendencias en logística de última milla

La logística de última milla está experimentando transformaciones significativas gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas. Estas innovaciones están redefiniendo la eficiencia, reduciendo costos, y mejorando la experiencia del cliente en la entrega de productos. Behnke (2019), analiza cómo vehículos autónomos y eléctricos, junto con casilleros inteligentes, están impactando positivamente las entregas urbanas, ofreciendo soluciones a desafíos como la congestión y los altos costos ambientales. Sorooshian et al., (2022), discuten el papel crucial de la inteligencia artificial para optimizar los componentes de la logística de última milla, haciendo que los servicios no solo sean más productivos sino también más sostenibles. Además, Engesser et al., (2023), se enfocan en cómo las soluciones autónomas de entrega pueden superar desafíos de movilidad y demanda en entornos urbanos, proponiendo modelos de operación que integran vehículos autónomos en las entregas de última milla.

La adopción de tecnologías avanzadas en la logística de última milla ofrece múltiples oportunidades para mejorar la eficiencia, reducir costos, acelerar las entregas, acceder a zonas de difícil acceso y mejorar la experiencia del cliente. Petrovic et al., (2013), discuten cómo los sistemas de comunicación móvil integrados pueden facilitar un flujo de información más eficiente entre proveedores y clientes, aumentando la eficiencia y satisfacción del cliente. Escudero et al., (2022), exploran cómo las múltiples posibilidades de entrega basadas en el tiempo y la ubicación pueden reducir los incidentes de entrega fallida, disminuyendo los costos y mejorando la experiencia del cliente. Siegfried y Zhang (2021), desarrollaron un concepto sostenible para la entrega de última milla en áreas urbanas, destacando la importancia de la cooperación entre gobiernos y empresas logísticas para reducir costos externos y mejorar la sostenibilidad mediante el equilibrio entre las necesidades del cliente, las capacidades competitivas y el interés público. Finalmente, Oršić et al., (2022), describen cómo el uso de

procesos basados en *machine learning* para la entrega asistida en el hogar puede optimizar las ventanas de entrega y mejorar la sostenibilidad de las operaciones.

Oportunidades de la logística de última milla con drones

La incorporación de drones en la logística de última milla presenta oportunidades significativas para transformar las operaciones de entrega en entornos urbanos. En el ámbito hospitalario en el Reino Unido, se han realizado pruebas exitosas de entrega de sangre por dron entre hospitales del Sistema Nacional de Salud (NHS) británico, demostrando mejoras en la eficiencia y rapidez del transporte de suministros médicos, reduciendo siete minutos respecto al desplazamiento usual terrestre (EuroNews, agosto 23 de 2024). Min (2023), destaca cómo los drones pueden manejar eficientemente los servicios de entrega puerta a puerta, reduciendo los costos operativos y mejorando la sostenibilidad al minimizar el uso de combustibles fósiles. Eskandaripour y Boldsaikhan (2023), revisan los avances en la entrega por drones, subrayando su capacidad para optimizar la distribución de carga, la gestión de baterías y la comunicación de datos, lo que contribuye a una logística más ecológica y eficiente. Lemardelé et al., (2021), proporcionan análisis estratégicos sobre cómo los drones y dispositivos autónomos de entrega pueden adaptarse a características específicas de las ciudades, mejorando la rentabilidad y reduciendo las externalidades negativas como la congestión y la contaminación. Aurambout et al., (2019), exploran la viabilidad de los drones en la entrega de última milla en ciudades europeas, estimando que una significativa proporción de ciudadanos podría beneficiarse de estos servicios, dependiendo de los avances tecnológicos y las regulaciones.

Logística de última milla con drones

Tecnología de drones

Un dron también conocido como vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés), es una aeronave que puede operar sin la necesidad de un piloto humano a bordo. Los drones son controlados remotamente o pueden volar de manera autónoma mediante sistemas

programados que utilizan tecnologías como el GPS, sensores avanzados y sistemas de inteligencia artificial. Gracias a su versatilidad, los drones se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, como la vigilancia, la cartografía 3D, la inspección de infraestructuras, la entrega de mercancías, la agricultura de precisión y la respuesta a emergencias. Además, su capacidad para operar en áreas de difícil acceso y reducir costos operativos los convierte en una herramienta clave en múltiples sectores industriales (Purdon et al., 2023; Kosovac et al., 2022).

Tipos de drones

Drones de multirrotor. El concepto de dron de multirrotor hace referencia a un tipo de vehículo aéreo no tripulado (UAV) que emplea múltiples hélices dispuestas en diferentes configuraciones para generar la sustentación y maniobrar en el aire. Este tipo de dron ha ganado popularidad por su capacidad de despegue y aterrizaje vertical, lo que lo hace especialmente adecuado para operaciones en áreas confinadas o de difícil acceso. Los drones multirrotor son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como la vigilancia, el mapeo 3D, la entrega de paquetes, la inspección de infraestructuras y la agricultura de precisión. Gracias a su maniobrabilidad y control preciso, pueden mantenerse estacionarios en el aire y realizar tareas de vuelo en espacios limitados, lo que los convierte en una herramienta versátil en muchas industrias (Budinger et al., 2020; Coïc et al., 2023).

Drones de ala fija. Utiliza alas rígidas similares a las de un avión para generar sustentación durante el vuelo. A diferencia de los drones multirrotor, los drones de ala fija son más eficientes en términos de energía y son capaces de volar distancias más largas a velocidades más altas, lo que los hace ideales para misiones de vigilancia, monitoreo de grandes áreas, y transporte de larga distancia. Sin embargo, generalmente requieren una pista para despegar y aterrizar, lo que limita su operatividad en áreas confinadas. Los avances recientes han permitido el desarrollo de drones de ala fija con capacidades de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), combinando la eficiencia de vuelo de las alas fijas con la versatilidad




de los rotores para despegue y aterrizaje en espacios reducidos (Wüest et al., 2022; Nasution et al., 2020).

Drones híbridos. Combinan las capacidades de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) de los multirrotores con la eficiencia y el rango de vuelo de los drones de ala fija. Esta fusión permite que los drones híbridos aprovechen la maniobrabilidad de los multirrotores para despegar y aterrizar en espacios reducidos y, al mismo tiempo, aprovechar la eficiencia aerodinámica de los drones de ala fija para vuelos de larga distancia y alta velocidad. Estos drones se utilizan en aplicaciones como la entrega de paquetes, la vigilancia de infraestructuras y las misiones de búsqueda y rescate, ofreciendo una solución versátil que mejora tanto la duración del vuelo como la capacidad de carga útil (Sonkar et al., 2023; Yue et al., 2021).

La Tabla 2 presenta una comparación de los principales tipos de drones utilizados en el transporte de mercancías

Tabla 2

Tipos de drones

Tipo de Dron	Descripción	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones en Carga de Mercancías	Capacidad Máxima de Carga (kg)	Autor
 <p>Multirrotor</p>	<p>Utiliza múltiples hélices para maniobrar y puede mantenerse estacionario en el aire. Es más adecuado para operaciones en áreas confinadas o con poco espacio.</p>	<p>Excelente maniobrabilidad, ideal para despegue y aterrizaje en espacios reducidos. Puede realizar entregas en ubicaciones precisas.</p>	<p>Capacidad de carga limitada y menor eficiencia energética, lo que restringe su rango y cantidad de carga.</p>	<p>Entrega de paquetes pequeños en áreas urbanas y zonas de difícil acceso. Operaciones en almacenes para mover objetos pequeños.</p>	<p>Hasta 5-10 kg</p>	<p>(Budinger et al., 2020), (Coïc et al., 2023)</p>
 <p>Ala fija</p>	<p>Emplea alas rígidas, lo que permite un vuelo más eficiente en términos de energía y distancias largas, pero requiere una pista para el despegue.</p>	<p>Mayor eficiencia energética, lo que permite transportar cargas más grandes en distancias largas a alta velocidad.</p>	<p>Requiere espacio para despegar y aterrizar, y no puede mantenerse estacionario, limitando su uso en zonas urbanas o confinadas.</p>	<p>Transporte de mercancías a larga distancia, especialmente en áreas rurales o entre ciudades. Adecuado para grandes cantidades de carga o entregas rápidas.</p>	<p>Hasta 50-500 kg</p>	<p>(Wüest et al., 2022), (Nasution et al., 2020)</p>
 <p>Híbrido</p>	<p>Combina despegue vertical de multirrotor con eficiencia de vuelo de ala fija, ofreciendo lo mejor de ambos mundos.</p>	<p>Capaz de transportar mayores cantidades de mercancías, combinando despegue en espacios reducidos con vuelos largos y rápidos.</p>	<p>Diseño más complejo y costoso. Capacidad de carga intermedia en comparación con otros tipos.</p>	<p>Entrega de paquetes de tamaño mediano a grandes distancias. Uso en áreas semiurbanas y rurales, donde se requieren vuelos largos y precisión en la entrega.</p>	<p>Hasta 20-100 kg</p>	<p>(Sonkar et al., 2023), (Yue et al., 2021)</p>

Nota: Elaboración propia

Características técnicas de los drones

Los drones utilizados para entregas de última milla presentan una serie de características técnicas clave que les permiten realizar sus tareas de manera eficiente y segura:

Capacidad de carga. Los drones de entrega están diseñados para transportar paquetes de diferentes tamaños y pesos. Según Jenitta et al., (2022), los drones típicamente pueden llevar cargas que van desde unos pocos cientos de gramos hasta varios kilogramos, dependiendo de su diseño y propósito.

Alcance y autonomía de vuelo. La distancia que un dron puede cubrir y su tiempo de vuelo sin necesidad de recargar o reabastecerse también varía. Los drones más avanzados pueden volar hasta varios kilómetros y permanecer en el aire durante horas. Vera-Amaro et al (2022) demuestran que los drones con sistemas de comunicación mejorados pueden operar de manera eficiente en misiones coordinadas sobre largas distancias.

Seguridad. La seguridad es crucial, especialmente en entornos urbanos donde el riesgo de colisión o accidentes es mayor. Los drones están equipados con tecnologías avanzadas de evitación de obstáculos y sistemas redundantes para asegurar operaciones seguras. Un estudio realizado por Vadduri et al., (2023), aborda cómo los algoritmos de detección de objetos pueden mejorar la precisión y seguridad en la entrega de cargas, minimizando los riesgos de colisiones.

Precisión en la entrega. Los avances en la tecnología de navegación y control permiten a los drones entregar paquetes con alta precisión. Esto es esencial para asegurar que los paquetes lleguen no solo al lugar correcto sino también de manera segura. La investigación de Qian et al., (2020), ilustra cómo un diseño innovador en la ley de control puede permitir aterrizajes precisos y manejo cuidadoso de la carga durante las fases críticas de la entrega.

Tecnologías emergentes para drones de entrega

Los drones de entrega están integrando avanzadas tecnologías para mejorar su eficacia y seguridad, estas tecnologías no solo aumentan la viabilidad de los drones para las entregas comerciales, sino que también potencian su eficiencia y seguridad operativa, abriendo nuevas posibilidades para su uso en una variedad de aplicaciones. A continuación, se presentan algunas de las más destacadas:

Sensores avanzados. Equipados con sensores como LIDAR, cámaras infrarrojas y ultrasonidos, estos drones pueden navegar de manera segura y eficiente, evitando obstáculos en tiempo real. Estos sensores son esenciales para vuelos autónomos en áreas urbanas complejas (Dhelia et al., 2022).

Inteligencia artificial. La inteligencia artificial permite a los drones tomar decisiones autónomas, como ajustar rutas en respuesta a cambios en el entorno o problemas durante la entrega. Esta tecnología mejora la capacidad de los drones para realizar entregas precisas y eficientes (Muñoz et al., 2019).

Comunicación 5G. La implementación de 5G permite una comunicación más rápida y confiable, esencial para el control remoto de los drones y para garantizar que las entregas se realicen sin demoras ni interrupciones. Esta tecnología es crucial para operaciones en áreas densamente pobladas (Han et al., 2021).

Sistemas de evitación de obstáculos. Los sistemas de evitación de obstáculos permiten a los drones detectar y maniobrar alrededor de objetos físicos en su entorno, lo que es vital para la seguridad y la eficacia del vuelo. Estos sistemas utilizan una combinación de sensores y software avanzado para garantizar operaciones sin incidentes (Bansode et al., 2023).

Existe una evolución significativa en la tecnología de drones ha logrado impactar diversas industrias desde la agricultura hasta la seguridad. Aquí se destacan algunos de los estudios recientes que abordan las capacidades y aplicaciones de esta tecnología:

Integración de Drones en la Logística de Última Milla

La integración de drones en la logística de última milla está transformando el panorama de las cadenas de suministro al ofrecer soluciones más rápidas, sostenibles y rentables. Sin embargo, también plantea desafíos significativos en términos regulatorios, tecnológicos y operativos.

Beneficios de los Drones en la Logística de Última Milla

Los drones son una herramienta poderosa para optimizar las entregas en la última milla, especialmente en áreas urbanas y rurales donde la congestión y las limitaciones de infraestructura pueden ser barreras importantes. Estudios recientes destacan que los drones pueden reducir costos operativos y emisiones de carbono, ofreciendo un método más sostenible para entregar pequeños paquetes, como suministros médicos o productos ligeros como comercio electrónico (Borghetti et al., 2022). Además, los drones pueden operar independientemente de las carreteras o vías, lo que los hace ideales para áreas remotas o afectadas por desastres (Andersson, 2021). A diferencia de los vehículos terrestres, los drones no dependen de las infraestructuras viales, lo que permite evitar el tráfico urbano y realizar entregas directas a los consumidores. Esto es particularmente útil en ciudades con alta congestión, donde los drones pueden ofrecer un acceso más rápido y directo (Shyamsunder et al., 2024). Además, los drones permiten reducir significativamente los tiempos de entrega en áreas urbanas y rurales. Un estudio sobre sistemas híbridos de camión-dron mostró que los drones pueden acortar las rutas terrestres y disminuir el tiempo total de entrega (Behroozi & Ma, 2023).

Un estudio reciente de Bansode et al., (2023), revela que los sistemas automatizados de entrega con drones están emergiendo como una solución transformadora para las entregas urgentes en entornos urbanos. Los drones autónomos, diseñados específicamente para este fin, demuestran un gran potencial para mejorar la eficiencia y rapidez en la logística urbana, empleando tecnologías avanzadas como el Arduino Uno y diversos sensores que permiten la

navegación sin intervención humana. Este avance no solo optimiza los tiempos de entrega, sino que también reduce el consumo de energía y la congestión del tráfico, factores críticos en áreas urbanas densamente pobladas

El papel de los drones en la logística ha sido igualmente transformador, con potencial para mejorar significativamente la entrega de última milla. El enfoque en la reducción de la congestión y las emisiones ha motivado la investigación en sistemas híbridos de suministro de energía para drones, optimizando el rendimiento y la durabilidad de estos vehículos (Sadra Rajabi et al., 2022).

Además, los avances recientes en tecnologías de reconocimiento facial y sensores avanzados están expandiendo las aplicaciones de los drones en campos como la seguridad, la vigilancia y la gestión de emergencias. Estas mejoras permiten a los drones realizar tareas más complejas, como identificar personas en áreas concurridas mediante algoritmos de reconocimiento facial, monitorear situaciones de desastre en tiempo real y responder rápidamente a emergencias. Por ejemplo, drones equipados con sistemas de reconocimiento facial y sensores avanzados son capaces de detectar intrusos, objetos peligrosos, e incluso señales de incendios o fugas de gas, mejorando la eficiencia y reduciendo costos en seguridad y gestión de desastres (Wang & Siddique, 2020; Alrayes et al., 2022).

Sostenibilidad en el Uso de Drones en la Logística de Última Milla

Los drones son una alternativa prometedora para reducir las emisiones de carbono en la logística de última milla. Al estar alimentados por baterías eléctricas, tienen un impacto ambiental considerablemente menor en comparación con vehículos terrestres tradicionales, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas. En estudios de caso, se ha demostrado que el uso de drones en escenarios urbanos puede disminuir tanto las emisiones de CO₂ como los costos operativos. Por ejemplo, un análisis realizado en Milán muestra reducciones de hasta un 9% en emisiones y un 12% en tiempos de entrega al implementar drones (Borghetti et al., 2022). Además, los drones pueden operar sin interferir con las

infraestructuras viales, lo que reduce la congestión y los problemas asociados con el transporte terrestre, por otro lado, los drones pueden disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los vehículos tradicionales de entrega (Tadić et al., 2024).

Los drones son energéticamente eficientes, especialmente cuando se implementan en áreas con baja densidad de pedidos. Un análisis reveló que la incorporación de drones puede reducir el consumo energético total del sistema de entregas, dependiendo del peso promedio de los paquetes y la distribución de la demanda (Orozco, 2019).

Aceptación Pública y Percepción de los Drones en la Logística de Última Milla

Investigaciones recientes resaltan que el diseño de estrategias regulatorias y la transparencia en la implementación de drones son esenciales para superar estas barreras. Esto incluye garantizar que las operaciones con drones respeten los estándares de seguridad y privacidad, así como educar al público sobre los beneficios de esta tecnología (Madani & Ndiaye, 2023).

Aplicaciones Emergentes en Salud y Emergencias

Los drones están desempeñando un papel crucial en la entrega de suministros médicos en situaciones críticas. Esta capacidad es especialmente útil en áreas urbanas donde la infraestructura puede estar congestionada o limitada, lo que permite realizar entregas rápidas y precisas de medicamentos y equipos médicos esenciales (Andersson, 2021). En zonas afectadas por desastres, los drones son fundamentales para mapear el terreno y entregar suministros urgentes, como vacunas o agua potable. Esto permite planificar y ejecutar operaciones de rescate de manera más eficiente (Patro et al., 2024).

Desafíos de Implementación

A pesar de sus beneficios, la integración de drones enfrenta numerosos desafíos. Uno de los principales obstáculos es la falta de marcos regulatorios claros y adaptados a la

operación de drones en la logística de última milla. Esto incluye regulaciones sobre el uso del espacio aéreo, licencias y seguridad de los datos (Madani & Ndiaye, 2023).

Además, los drones tienen limitaciones tecnológicas significativas, como la baja capacidad de carga y el limitado alcance de vuelo debido a restricciones de batería. Sin embargo, investigaciones sugieren que el desarrollo de tecnologías avanzadas, como baterías más eficientes y redes de recarga, puede mitigar estos problemas (Patro et al., 2024).

Otro aspecto importante es la percepción pública. Aunque los drones tienen un potencial significativo, los consumidores y comunidades a menudo expresan preocupaciones sobre la privacidad, seguridad y ruido asociado con su uso (Shyamsunder et al., 2024).

Limitaciones y Consideraciones

A pesar de sus beneficios, los drones presentan limitaciones significativas para la entrega de paquetes pequeños y ligeros. Estas incluyen:

Capacidad de Carga Reducida

Aunque efectivos para cargas ligeras, los drones enfrentan limitaciones significativas en términos de peso y volumen transportable, lo que restringe su uso a bienes de alta prioridad y bajo peso (Tadić et al., 2024). La limitada capacidad de carga de los drones restringe su uso a paquetes pequeños y ligeros, lo que requiere sistemas logísticos híbridos para gestionar pedidos más grandes (Orozco, 2019).

Restricciones Regulatorias y Técnicas

Las regulaciones sobre el uso del espacio aéreo y las preocupaciones de privacidad aún representan barreras significativas para la adopción masiva de drones (Benarbia & Kyamakya, 2021). Además, factores como la duración limitada de las baterías y los desafíos técnicos para evitar colisiones son barreras importantes (Madani & Ndiaye, 2023).

Marco Regulatorio en Colombia para el Uso de Drones en Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas

El uso de drones para entregas de última milla en áreas urbanas es un tema novedoso con gran potencial, pero que requiere un marco regulatorio claro para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones. En Colombia, la entidad encargada de regular el espacio aéreo es la Aeronáutica Civil (Aerocivil), y ha establecido normas específicas para la operación de drones, incluyendo aquellos destinados a entregas.

La Resolución 01983 del 27 de septiembre de 2023 es un hito importante en la regulación de drones en Colombia. Esta resolución, emitida por la Aeronáutica Civil (Aerocivil), oficialmente incorpora la norma RAC 100 a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia.

El principal instrumento regulatorio es la RAC 100, que reemplazó al RAC 91, y que establece las condiciones para la operación de Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (UAS). Este reglamento define diferentes categorías de operación y requisitos según el riesgo y la complejidad de estas. Para entregas de última milla en áreas urbanas, se requiere operar en la categoría específica, que exige un estudio de seguridad operacional y la autorización expresa de la Aerocivil.

La RAC 100 establece tres categorías de operación, cada una con requisitos específicos:

Categoría Abierta: Para operaciones de bajo riesgo, con drones de hasta 25 kg, que vuelan en línea de vista, a baja altura (máximo 120 metros) y lejos de aglomeraciones de personas. Las entregas en áreas urbanas densamente pobladas no se encuadrarían en esta categoría.

Categoría Específica: Abarca operaciones de mayor riesgo o complejidad que la categoría abierta. Requiere un estudio de seguridad operacional que demuestre que la operación se puede realizar de forma segura y la autorización expresa de la Aerocivil. Las

entregas de última milla en áreas urbanas, donde hay un mayor riesgo de afectar a personas o propiedades, requerirían operar bajo esta categoría.

Categoría Certificada: Aplica a las operaciones de mayor riesgo, como el transporte de pasajeros o mercancías peligrosas, y exige la certificación de la aeronave y del operador por parte de la Aerocivil.

Requisitos para Operaciones en Categoría Específica

Dado que las entregas en áreas urbanas se clasificarían en la categoría específica, es crucial comprender los requisitos:

- Debe identificar los peligros asociados a la operación, evaluar los riesgos y establecer medidas de mitigación. En el contexto de las entregas de última milla, el SSO debe considerar factores como la densidad poblacional, la presencia de infraestructura crítica, el tráfico aéreo, las condiciones meteorológicas y los procedimientos de emergencia.
- Debe documentar los procedimientos para la operación segura del dron, incluyendo el plan de vuelo, las medidas de seguridad, el mantenimiento de la aeronave y la gestión de riesgos. un enfoque sistemático para la gestión de la seguridad, con el objetivo de identificar y mitigar los riesgos de manera proactiva.
- La Aerocivil evalúa el SSO y el manual de operaciones antes de otorgar la autorización para la operación.

Condiciones especiales para la operación aérea de transporte de carga (“Drone Delivery”)

- No puede ser una persona natural, debe ser una empresa registrada.
- Necesita un certificado especial de la UAEAC que le permita hacer entregas con drones.
- El dron, con todo y carga, no puede pesar más de 250 kg. La carga máxima que puede llevar es de 50 kg.

- Si la carga pesa entre 50 kg y 250 kg, la empresa debe pedir un permiso especial a la UAEAC y darles detalles de la carga y la ruta. No se permiten mercancías peligrosas en estos casos.
- Si la empresa cobra por las entregas, necesita un permiso adicional para transporte de carga. Si la carga va por fuera del dron, necesita un permiso para "trabajos aéreos especiales". Estos permisos se rigen por la norma RAC 5.

Consideraciones Adicionales para Entregas de Última Milla:

- El dron debe ser adecuado para transportar la carga de forma segura y eficiente, contar con sistemas de navegación precisos y disponer de mecanismos de seguridad como paracaídas o sistemas de aterrizaje de emergencia.
- Se requiere una infraestructura para la gestión de las operaciones, incluyendo estaciones de despegue y aterrizaje, sistemas de control de tráfico de drones y mecanismos de comunicación.
- Es importante que los drones puedan integrarse con el sistema de espacio aéreo y coexistir con otras aeronaves.
- Se deben abordar las preocupaciones sobre la privacidad, el ruido y el impacto visual de los drones en las comunidades.

Hipótesis

H_0 : La implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia no mejora significativamente la eficiencia logística ni la percepción de los clientes en comparación con los métodos tradicionales de entrega.

H_1 : La implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia mejora significativamente la eficiencia logística y la percepción de los clientes en comparación con los métodos tradicionales de entrega.

Variables

En la

Tabla 3 se presenta la clasificación de las variables de estudio referente a la Propuesta para la Implementación de Drones en las Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas de Colombia, las cuales abarcan los aspectos legales, ambientales y técnicos que impactan directamente la eficacia y sostenibilidad de las operaciones logísticas, que se consideran fundamentales para evaluar la viabilidad de la propuesta en sistemas logísticos de entregas de última milla.

Tabla 3*Variables de estudio*

Concepto	Dimensión	Variables	Tipo de Variable
Revisión de bibliografía relacionada con el tema	Características de la información relacionada con el tema de investigación	Publicaciones	Independiente
		Tema o área de estudio	Independiente
		Año de publicación	Independiente
		Autores y colaboraciones	Independiente
		Tipo de estudio	Independiente
		Resultados principales	Independiente
Características técnicas, ambientales y legales para implementar el uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia	Aspectos técnicos	Tipo de Dron	Independiente
		Capacidad de Carga	Independiente
		Autonomía de vuelo	Independiente
		Resistencia a las inclemencias del tiempo	Independiente
		Tipo de producto a transportar	Independiente
		Distancia de entrega	Independiente
		Infraestructura de despegue y aterrizaje	Independiente
		Gestión del tráfico aéreo no tripulado	Independiente
		Costo de adquisición de los drones	Independiente
		Costos de operación y mantenimiento de los drones	Independiente
		Disponibilidad en el mercado	Independiente
		Personal capacitado para la operación	Independiente
		Medios de transporte empleados	Independiente
		Características técnicas, ambientales y legales para implementar el uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia	Aspectos legales
Permisos y licencias requeridos para operar drones de carga	Independiente		
Aspectos ambientales y sociales	Zonas restringidas para el vuelo de drones		Independiente
	Protocolos de seguridad para la operación de drones		Independiente
	Impacto ambiental de la operación de drones		Dependiente
	Percepción social de la utilización de drones para entregas		Dependiente
	Potencial para generar nuevos empleos en el sector logístico		Dependiente
	Eficiencia logística y el nivel de servicio		Dependiente

Nota. Adaptado de “Análisis bibliométrico en adopción de logística de entrega de mercancías mediante el uso de drones” por Garcés et al., 2022; “Technical and legal critical success factors: Feasibility of drones & AGV in the last-mile-delivery” por Fehling, C., & Saraceni, A., 2023; “Clarity from above PwC global report on the comercial applications of drone technology” por PricewaterhouseCoopers. 2016; “Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective, The International Journal of Logistics Management” por Jazairy et al. 2024; “Metodología de la Investigación” por Hernández- Sampieri, R., Mendoza Torres, C. P. 2023.

Capítulo III. Metodología

Esta investigación tiene como propósito diseñar una propuesta de implementación de drones para el transporte de última milla en Colombia. Para lograrlo, se realiza una revisión rigurosa de la bibliografía existente con el fin de construir un estado del arte exhaustivo sobre la temática. Adicionalmente, se analizan las características técnicas, legales y ambientales del uso de esta tecnología y se valida la propuesta con expertos, personas y organizaciones vinculadas a la logística de última milla, la gestión de la cadena de abastecimiento, la comercialización y la operación de drones en el contexto colombiano. Por lo anterior, de acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2023), se considera una investigación de tipo descriptiva, teniendo en cuenta que los resultados del proyecto buscan generar una propuesta que describa las características y requerimientos del uso de drones en el transporte de última milla en Colombia, considerando además que la temática central ha sido poco estudiada en el país, buscando indagar sobre una nueva perspectiva los factores para implementar la tecnología en el transporte de manera sostenible y apropiada a las necesidades del espacio geográfico colombiano.

Con respecto al enfoque, siguiendo a Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2023), esta investigación sigue el enfoque mixto, dado que el planteamiento del problema requiere una integración de los enfoques cualitativos y cuantitativos, partiendo del propósito de estructurar desde la revisión bibliográfica los factores técnicos, legales y ambientales para el uso de drones en las entregas de última milla en Colombia, para una posterior validación con expertos y profesionales y empresas del sector logístico mediante métodos cuantitativos para la toma de decisiones.

La metodología que el presente estudio llevará a cabo para el desarrollo de una Propuesta para la Implementación de Drones en Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas de

Colombia está basada en la investigación desarrollada por Fehling y Saraceni (2023), sobre viabilidad de drones en entregas de última milla, complementándose con el análisis de barreras para la implementación de la logística de drones propuesto por Sah et al., (2021), y la formulación de oportunidades y desafíos de los drones en la cadena de suministro según Pacheco et al., (2024).

A continuación, se detalla la metodología propuesta para el alcance de cada objetivo específico y la prueba de hipótesis:

Análisis bibliométrico

Siguiendo a Fehling y Saraceni (2023), se inicia con una recopilación y revisión de la literatura de consulta en bases de datos especializadas, en este caso *Scopus*, bajo ecuaciones de búsqueda que contengan las siguientes palabras clave (*keywords* en inglés): *last-mile delivery* y *drones*, para identificar los factores críticos en los aspectos ambiental, legal y técnico que se debe tener en cuenta para formular la propuesta. A lo largo de este análisis, se examinarán las tendencias temporales en la producción académica, las revistas más relevantes, los autores más influyentes y las principales palabras clave utilizadas en la literatura. Este enfoque permitirá proporcionar una visión clara de cómo ha evolucionado la investigación sobre drones en la logística y su impacto en la entrega de última milla.

Diagnóstico

Con base en la metodología aplicada por Fehling y Saraceni (2023), el instrumento para recolectar información a empresas o individuos que operan en actividades relacionadas con el transporte en la cadena de suministro y con la tecnología de drones en Colombia es una encuesta (Ver Anexo 1), con el fin de elaborar un diagnóstico sobre la situación actual del uso de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas. Para la recolección de datos, se aplicará un muestreo probabilístico por conveniencia Hernández-Sampieri y Mendoza Torres (2023), seleccionando aquellas empresas e individuos que estén fácilmente disponibles y

dispuestos a participar en la investigación; los encuestados son líderes de procesos de logística, siendo el 85% con una experiencia mayor a cinco (05) años en el sector logístico (Sah et al., 2021), en empresas que tengan alcance o participen en la distribución de última milla. Inicialmente, se realizará una validación del instrumento y la relevancia de las preguntas con respecto a los objetivos de la investigación, consultando a personas del ámbito académico y profesional con formación de alto nivel (al menos Maestría), y conocimientos sobre logística de distribución (Fehling & Saraceni, 2023). Una vez superada la etapa de validación, la encuesta será formulada a través de Google Forms, con el objetivo de recolectar de manera oportuna y rápida la información. Teniendo en cuenta a Pacheco et al., (2024), para darle mayor alcance a la encuesta, se adopta el proceso de bola de nieve (Jalali & Wohlin, 2012), de forma que los encuestados puedan expandir la consulta con sus contactos del sector logístico e incluso, contactando de forma directa con algunos expertos a través de redes sociales como LinkedIn, de forma similar a Fehling y Saraceni (2023).

Se realiza la encuesta en algunas de las principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Santa Marta, Bucaramanga, Villavicencio, Cúcuta, otras) buscando obtener respuesta de al menos setenta (70) líderes de procesos de logística de distribución en empresas de sectores como logística y transporte, comercializadoras, minoristas, paquetería y mensajería, comercio electrónico, tecnología, farmacéutica, otra, a la cantidad de veintiún preguntas, relacionadas con las seis categorías de barreras propuestas por Sah et al. (2021), para la implementación de drones en logística de última milla.

Propuesta

Desarrollar una propuesta para la operación de drones en el transporte de última milla en Colombia, a partir de la comparación entre los hallazgos obtenidos en el objetivo 2 y los modelos planteados en investigaciones previas, con énfasis en las barreras para su implementación, así como en el análisis de oportunidades y desafíos asociados. Este análisis considera dimensiones técnicas, organizacionales, de seguridad y regulatorias. En cuanto a las

barreras, se contrastan con las seis categorías identificadas por Sah et al. (2021): privacidad y seguridad, regulaciones, comportamiento del público, aspectos técnicos, económicos y ambientales. Finalmente, se proponen alternativas para superar dichas barreras, con base en las estrategias planteadas por Pacheco et al. (2024).

Prueba de hipótesis

Para la validación de la hipótesis, se aplicó un enfoque cuantitativo utilizando la prueba de chi-cuadrado (χ^2), que permite evaluar la relación entre variables categóricas (Corder & Foreman, 2014).

- Se realizará la prueba con base en las 70 encuestas aplicadas a empresas del sector logístico en Colombia.
- Luego se construye una tabla de contingencia con las respuestas sobre el uso de drones y la percepción de mejora en la satisfacción del cliente.
- Posteriormente se procede a calcular las **frecuencias esperadas y observadas**, y posteriormente se aplicó la fórmula de chi-cuadrado:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}},$$

donde O_{ij} son las frecuencias observadas y E_{ij} las esperadas (Agresti, 2018).

- Para este caso se va a aplicar un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ para determinar si se rechaza la hipótesis nula (Agresti, 2018).

Si el valor de chi cuadrado es grande, indica que hay una discrepancia significativa entre las frecuencias observadas y las esperadas, lo que sugiere que las variables están relacionadas (Moore et al., 2017).

Si el valor es pequeño, sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, es decir, que las variables son independientes (Moore et al., 2017).

Es importante comparar el valor de chi cuadrado calculado con el valor crítico de una tabla de distribución chi cuadrado para el nivel de significancia y los grados de libertad adecuados (Levine et al., 2016).

Capítulo IV. Exploración del Uso de Drones en la Distribución de Última Milla: Revisión Bibliométrica (2019–2024) y Diagnóstico del Entorno Colombiano

En este capítulo se desarrolla una revisión bibliométrica del panorama global (2019–2024) con un diagnóstico del entorno colombiano, ofreciendo una visión integral sobre el desarrollo y las posibilidades de implementación de esta tecnología.

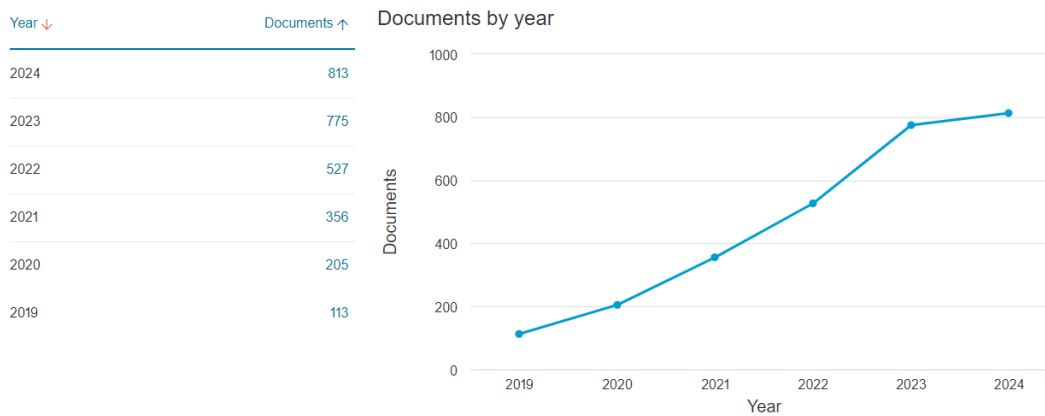
Análisis bibliométrico del uso de drones en transporte de última milla (2019-2024)

Se realiza el análisis mediante una base de datos compuesta por 2,789 documentos recuperados de Scopus a corte del 6 de octubre de 2024, centrados en el uso de drones en la entrega de última milla. El objetivo principal es analizar las tendencias de investigación, identificar las principales contribuciones y mapear las colaboraciones en este campo emergente.

Publicaciones

Se identificaron 2,789 documentos sobre el uso de drones en la entrega de última milla, lo que refleja un creciente interés en este tema dentro de la comunidad académica en los últimos cinco años. A lo largo de los años, se observa un aumento significativo en la producción científica, con un crecimiento constante desde 2019 hasta 2024. En 2019, se registraron 113 publicaciones, cifra que aumentó a 205 en 2020. Este crecimiento se aceleró aún más en 2021, alcanzando 356 publicaciones, y continuó con 527 en 2022. En 2023, el número de publicaciones aumentó a 775, y hasta la fecha de este análisis en 2024, se han contabilizado 813 publicaciones, como muestra la Figura 1.

Figura 1
Publicaciones por año

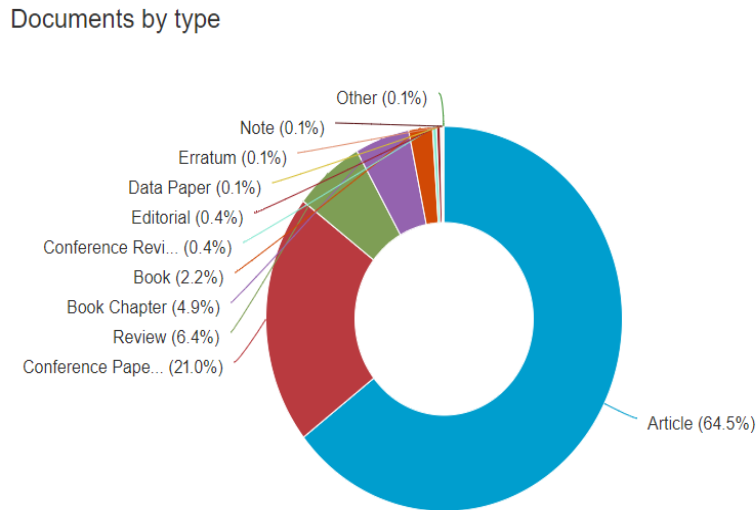


Nota: Tomado de “Publicaciones por años” por Scopus, 2024.

Este aumento significativo en la producción científica indica un creciente interés y reconocimiento por parte de la comunidad académica hacia el uso de drones en la entrega de última milla, probablemente impulsada por los avances tecnológicos y la demanda de soluciones logísticas más eficientes.

En términos de tipos de publicaciones la mayoría de los documentos son artículos de investigación, que constituyen aproximadamente 64.5% del total. Les siguen los trabajos presentados en conferencias, con un 21% de contribuciones. Además, se han publicado revisiones y capítulos de libros, aunque en menor cantidad, representando un 6.4% y 4.9 %, respectivamente. Este patrón de publicación refleja un enfoque predominante en la investigación empírica y el intercambio de conocimientos en foros académicos, como se observa en la Figura 2.

Figura 2
Tipo de publicación



Nota. Tomado de “Tipo de publicación” por Scopus, 2024.

Análisis de Publicaciones

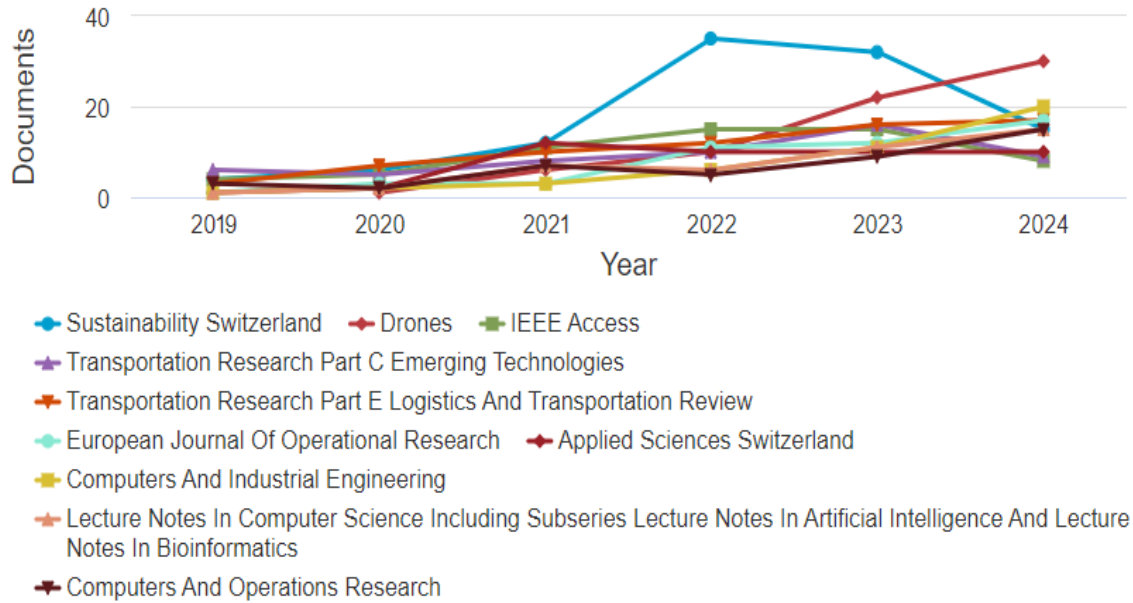
Las revistas más destacadas en términos de número de publicaciones incluyen *Sustainability Switzerland*, *Drones*, *IEEE Access*, *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, abarcan áreas como la logística, la ingeniería y la tecnología. Estas revistas han servido como plataformas clave para la difusión de investigaciones relacionadas con el uso de drones en la logística, como muestra la Figura 3.

Figura 3
Publicaciones por año de las 10 fuentes más destacadas

Documents per year by source

Compare the document counts for up to 10 sources.

[Compare sources and view CiteScore, SJR, and SNIP data](#)

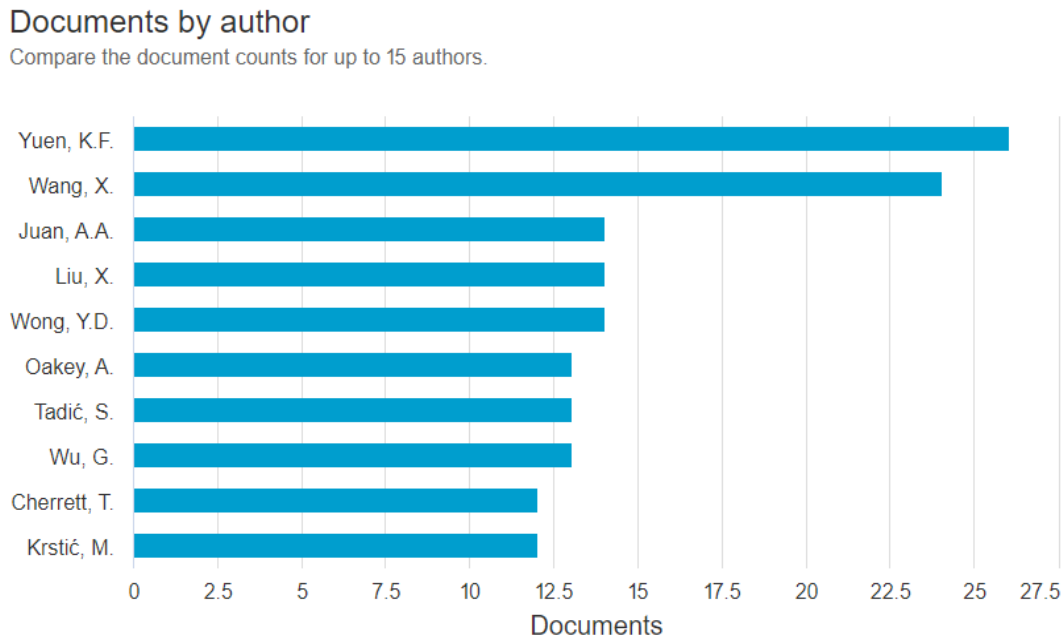


Nota. Tomado de "Publicaciones por año de las 10 fuentes más destacadas" por Scopus, 2024.

Análisis de Autores y Colaboraciones

Figura 4

Publicaciones por autor



Nota. Tomado de "Publicaciones por autor" por Scopus, 2024.

El análisis de la producción de autores en el campo de los drones en la entrega de última milla revela una diversidad notable de contribuciones. Se identificaron más de 100 autores únicos que han publicado en este ámbito, con Yuen, K.F. destacándose como el autor más prolífico, con un total de 26 documentos, como se observa en la Figura 4. Sus trabajos y colaboraciones se centran en la aceptación de tecnologías innovadoras en la entrega de última milla, como los robots de entrega autónomos (ADR) y la logística colaborativa.

En una de las investigaciones, se examinan los factores que influyen en la aceptación de ADR por parte de los consumidores, utilizando un modelo teórico que combina la teoría de la asignación de recursos, la teoría del valor percibido y la teoría del riesgo percibido. Los hallazgos sugieren que características como la compatibilidad, la conveniencia, la seguridad de la privacidad y la fiabilidad de los ADRs afectan las intenciones de los consumidores a través de la percepción de valor y riesgo (Koh, et al., 2024). Además, en otro estudio, se investiga la

logística colaborativa, un fenómeno en auge en la entrega de última milla que integra aplicaciones tecnológicas y moviliza a un gran número de participantes para realizar actividades logísticas (Nguyen, et al., 2023). Este trabajo desarrolla un modelo que aborda tanto motivaciones extrínsecas como intrínsecas de los conductores-participantes en la logística colaborativa, destacando la influencia de las recompensas monetarias y la autoeficacia en sus intenciones de participación (Nguyen, et al., 2023).

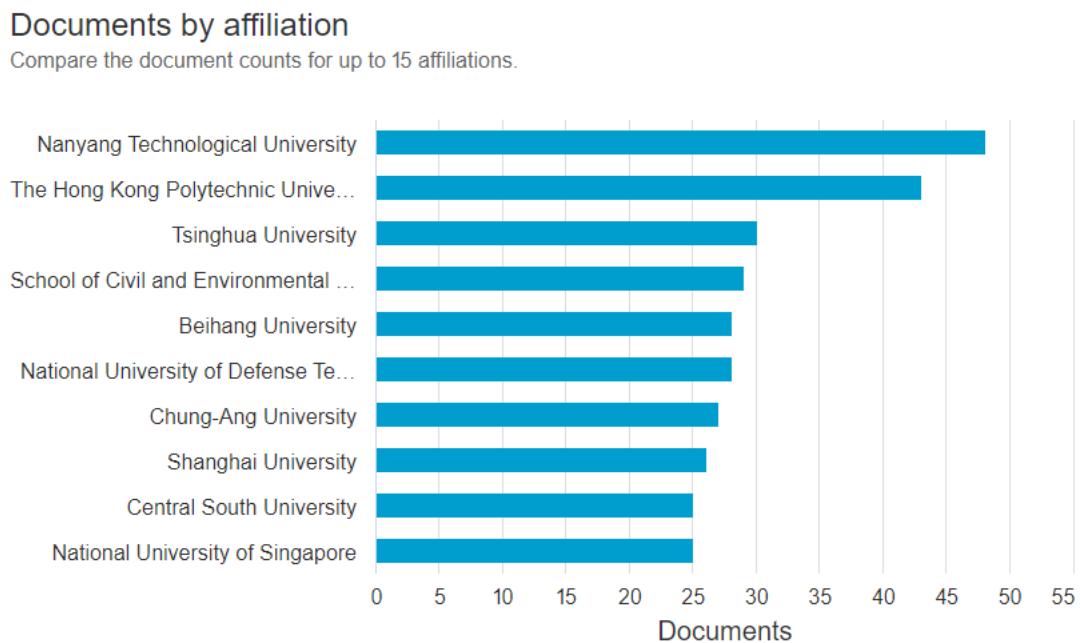
Otros autores notables también han contribuido con investigaciones relevantes en el campo de la logística y el transporte. Por ejemplo, Ángel Juan ha abordado el creciente uso de vehículos eléctricos en la entrega de última milla, revisando los desafíos operativos derivados de las limitaciones de las baterías eléctricas y explorando enfoques de optimización, simulación y aprendizaje automático para generar planes de enrutamiento sostenibles para flotas híbridas (Martins, et al., 2021). En otro trabajo, discute la extensión de las simheurísticas mediante la incorporación de una capa difusa, lo que permite abordar problemas complejos de optimización con incertidumbres estocásticas y difusas, aplicándose a problemas de enrutamiento de vehículos y otros contextos logísticos (Tordecilla, et al., 2021).

Por su parte, Liu, X. ha investigado el desafío de la última milla en la logística, proponiendo un sistema de entrega basado en vehículos aéreos no tripulados (UAV) y computación en la nube (Li, et al., 2020). Sin embargo, también aborda las limitaciones de estos sistemas y sugiere una solución basada en computación de borde móvil (MEC) y blockchain para mejorar la seguridad y eficiencia de los procesos de entrega (Xu, et al., 2021). También ha colaborado en la investigación de la gestión de tareas computacionales en sistemas de entrega de última milla utilizando tecnología MEC, proponiendo una estrategia de gestión de tareas que optimiza el uso de energía y la capacidad de carga de los UAV, mostrando resultados experimentales que superan métodos existentes en eficiencia y consumo energético (Xu, et al., 2021).

Wang también ha realizado contribuciones significativas, especialmente en el contexto de la pandemia de COVID-19. En un estudio, revisa cómo la pandemia ha cambiado el comportamiento del consumidor y sus implicaciones para la logística centrada en el consumidor, categorizando las alteraciones en el comportamiento de compra, preferencias, digitalización y comportamiento tecnológico (Cai, et al., 2023). En otro trabajo, investiga los factores que afectan la adopción de entregas urbanas por drones como medida de prevención de infecciones, desarrollando un modelo teórico que destaca la influencia del miedo a COVID-19 en la intención de adopción. Los hallazgos sugieren que tanto el miedo como la percepción de utilidad juegan un papel crucial en la aceptación de las entregas por drones durante crisis sanitarias (Yuen, et al., 2024).

Estas contribuciones que subrayan la diversidad de enfoques dentro de la investigación sobre drones en la entrega de última milla relacionadas en abarcando tanto estudios teóricos como aplicaciones prácticas.

Figura 5
Publicaciones por institución



Nota. Tomado de "Publicaciones por institución" por Scopus, 2024.

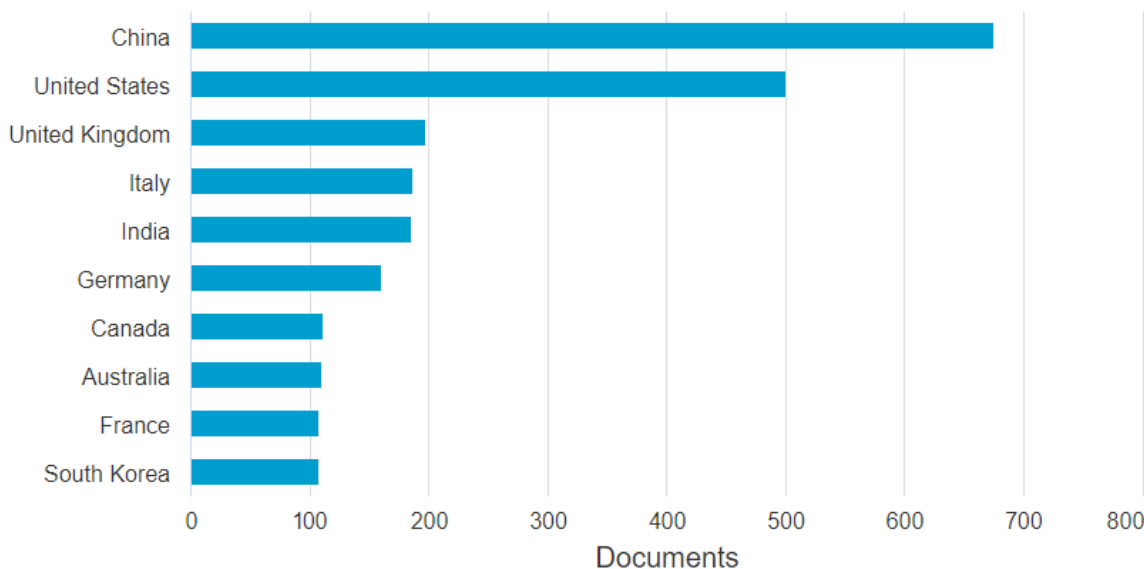
La Figura 5 muestra la colaboración institucional, varias universidades han emergido como líderes en este campo. Nanyang Technological University es la institución más destacada, con 48 documentos publicados, seguida de The Hong Kong Polytechnic University con 43, y Tsinghua University con 30. Otras instituciones notables incluyen la School of Civil and Environmental Engineering (29 documentos), Beihang University (28 documentos), National University of Defense Technology China (28 documentos), Chung-Ang University (27 documentos) y Shanghai University (26 documentos).

Figura 6

Publicaciones por país o territorio

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.



Nota. Tomado de "Publicaciones por país o territorio" por Scopus, 2024.

El análisis por país o territorio revela que China lidera la producción científica en este campo, con una amplia mayoría de publicaciones originadas en sus instituciones. Otros países relevantes en la investigación sobre drones en la entrega de última milla incluyen Estados Unidos, Reino Unido, Italia e India, que también han contribuido con un número significativo de documentos, como lo muestra en la Figura 6. Esta predominancia de China sugiere no solo un

fuerte enfoque en la investigación tecnológica en la región, sino también un potencial significativo para la innovación en logística y entrega.

Diagnóstico de la situación actual del uso de drones en entregas de última milla

Este capítulo examina la situación actual del uso de drones en las entregas de última milla, enfocándose en su implementación a nivel global, en América Latina y, de manera específica, en Colombia. Primero, se revisa el estado del transporte con drones en el ámbito internacional, destacando las tendencias, los avances tecnológicos y los desafíos regulatorios y operativos que enfrenta esta modalidad de entrega en diferentes regiones. Luego, se explora la realidad en América Latina, donde, aunque la adopción de drones es aún limitada, se identifican importantes oportunidades de crecimiento. Finalmente, el análisis se centra en Colombia, basado en investigaciones académicas previas y en los resultados de una encuesta aplicada a líderes de procesos logísticos en empresas del país. Este diagnóstico permite identificar las barreras y oportunidades para la integración de drones en la logística de última milla en Colombia, brindando una base para futuras propuestas en el sector.

Uso de Drones en la Última Milla a Nivel Global

El uso de drones en la logística de última milla ha crecido de manera exponencial en los últimos años, impulsado por diversos factores clave. En primer lugar, el mercado global de drones comerciales ha experimentado una expansión significativa. Se espera que alcance un valor de USD 213 mil millones para 2032, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 31.1% entre 2025 y 2032, lo que refleja su creciente adopción en aplicaciones logísticas, particularmente en la última milla (Fortune Business Insights, 2025). Amazon, una de las empresas pioneras en esta tecnología, ha desarrollado el programa Prime Air, cuyo objetivo es entregar productos en menos de sesenta (60) minutos mediante drones, gracias a las aprobaciones regulatorias de la FAA que obtuvo en 2020 para realizar pruebas de entregas con drones en EE. UU. (Amazon Staff, 2022).

Empresas como Zipline, que previamente operaban en África entregando suministros médicos, expandieron sus operaciones a otros mercados para ofrecer productos esenciales durante la pandemia (Zipline International, 2021). No obstante, en países de oriente medio, por ejemplo, algunos estudios en Irán muestran que la población aún tiene reservas sobre la seguridad y privacidad de los drones (Ganjipour & Edrisi, 2023).

Empresas logísticas como DHL prevén que en la próxima década el uso de drones para las entregas de última milla se masifique (DHL Freight, 2024). En colaboración con el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania realizaron un proyecto piloto de envío de medicamentos a Tanzania con sus drones llamados Parcelcopter, sin embargo, en el año 2021 detuvieron este proyecto (Fuest, 2021). Otras empresas como la alemana Wingcopter venden sus servicios de logística con drones para zonas urbanas y rurales de países europeos y asiáticos como Japón para garantizar el acceso de suministros médicos a las islas remotas teniendo una carga útil de 2.9 kilogramos con viajes de 12 minutos y distancias recorridas de 32 kilómetros ida y vuelta, han desarrollado cajas de cadena de frío multiusos que manejan temperaturas de 2 a 8°C durante 3 a 18 horas (Wingcopter, s.f.).

Existen importantes desafíos que limitan su implementación masiva, en la mayoría de los países, las restricciones sobre el espacio aéreo, la seguridad y la privacidad limitan el uso de drones en zonas urbanas (Sah et al., 2021). Un análisis de costos realizado por McKinsey reveló que el costo por entrega de un dron es de aproximadamente \$13.5 USD, en comparación con los \$9.4 USD de un vehículo eléctrico (Niu et al., 2024).

Finalmente, se registran algunos modelos de entrega con drones empleados a nivel mundial:

- *Modelo de hub-and-spoke*: Drones trabajan en conjunto con camiones de carga, recogiendo paquetes de estaciones logísticas cercanas para entregarlos en su destino final (Hu et al., 2024).

- *Modelo híbrido camión-dron:* Drones parten desde camiones en movimiento, optimizando rutas y reduciendo costos operativos (Choi & Schonfeld, 2021).
- *Entregas médicas y humanitarias:* Implementadas en África y países en desarrollo para transportar medicamentos y suministros médicos a zonas de difícil acceso (Ameso, 2024).

Uso de Drones en América Latina

El uso de drones en América Latina para entregas de última milla se encuentra en una fase experimental, con casos de éxito en sectores específicos y el desarrollo del marco legal en algunos países.

Por ejemplo, en México, Rappi ha mostrado interés en integrar tecnologías como la inteligencia artificial y vehículos autónomos en sus operaciones; los drones podrían ser útiles para realizar entregas en zonas de difícil acceso para vehículos convencionales, mientras que los vehículos autónomos podrían mejorar la eficiencia y reducir costos operativos a largo plazo (Rappi Merchants, 2023).

En octubre de 2020, Rappi inició un plan piloto de entregas con drones en Quito, Ecuador, en colaboración con la empresa Aerialoop, buscando reducir los tiempos de entrega en áreas alejadas del centro urbano, donde lograron que los pedidos llegaran en aproximadamente 40 minutos, en lugar de la hora y media habitual. Durante la fase piloto, se planificó realizar hasta 200 entregas en un período de 3 a 6 meses, obteniendo como resultado principal la reducción en tiempos de entrega de 90 minutos a máximo 40 minutos (Primicias, 2020).

Así mismo, Mercado Libre, el gigante del comercio electrónico en América Latina, ha estado explorando el uso de drones como parte de su estrategia para mejorar las entregas de última milla, teniendo en cuenta que su CEO mencionó en una entrevista que están evaluando

la integración de drones en sus operaciones logísticas para aumentar la eficiencia y reducir los tiempos de entrega (La República, 2024).

Sandvik y Martins (2018), concluyen que el espacio aéreo en América Latina aún no está listo para incorporar drones y los servicios que ofrecen, garantizando al mismo tiempo la compatibilidad con las normativas que rigen aviones, helicópteros y otros tipos de vehículos aéreos. En ese orden, se analiza brevemente la regulación sobre uso de drones en un país como Brasil.

Brasil es uno de los países de Latinoamérica que más está avanzado en términos de legislación, la operación de drones está regulada por la Agencia Nacional de Aviación Civil (ANAC) a través del Reglamento Brasileño de Aviación Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017). Este reglamento establece las directrices para el uso seguro y legal de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) (Agência Nacional de Aviação Civil [ANAC], s.f.). Además de las regulaciones de la ANAC, los operadores de drones deben cumplir con las normativas del Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA) y de la Agencia Nacional de Telecomunicaciones (ANATEL). El DECEA es responsable de la gestión del espacio aéreo, mientras que la ANATEL regula la homologación de equipos que utilizan transmisores de radiofrecuencia. Empresas como Moya Aero ofrecen drones VTOL con una carga útil de 200 Kilogramos, un rango de 160 kilómetros en su modelo 100% eléctrico y 300 kilómetros en su modelo híbrido para el transporte de mercancías voluminosas y pesadas estos son usados como mejor opción en lugares de difícil acceso (Moya Aero, s.f.), su expectativa estima una facturación de 2 mil millones de dólares en ventas. para los próximos 10 años (Mundo Logística, 2024).

La mayoría de los países latinoamericanos no tienen un marco legal claro para la operación de drones en entornos urbanos y falta de estaciones de carga y sistemas de control aéreo limita su expansión.

Uso de Drones en Colombia

En Colombia, se han desarrollado pilotos para entregas de última milla empleando tecnologías de equipos no tripulados. Por ejemplo, en abril de 2020, Rappi comenzó a utilizar robots para la entrega de pedidos en Medellín, Colombia, en colaboración con KiwiBot. Este piloto se llevó a cabo en la zona de El Poblado, donde se realizaron cerca de 120 pedidos diarios utilizando 15 robots. El objetivo era ofrecer una opción de entrega sin contacto físico, especialmente relevante durante la pandemia de COVID-19 (Forbes, 2020). Los drones han sido usados para transportar medicamentos a comunidades rurales aisladas (Ameso, 2024), por lo que existen amplias posibilidades de implementarse en áreas urbanas en Colombia. Ahora bien, en 2021, Orkid, en colaboración con empresas como *Boston Scientific*, Coordinadora, Solistica, la Patrulla Aérea Civil Colombiana y Seguros Sura, lanzó una plataforma de drones autónomos con capacidad de carga, buscando transformar la logística en Colombia, permitiendo entregas más rápidas y eficientes, especialmente en zonas rurales de difícil acceso (La República, 2021). En el siguiente inciso se describe en más detalle las operaciones de Orkid.

Casos Orkid y Black Square

Empresas como Orkid, la cual está trabajando de cerca con entidades gubernamentales como la Aerocivil de Colombia con el propósito de obtener las licencias necesarias para operar dentro del país. Orkid es una empresa colombiana que desarrolla tecnología de drones de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) certificable y rentable, permitiendo a los operadores ofrecer servicios avanzados en entrega de paquetes, inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) y mapeo (Orkid, s.f.). Recientemente, Orkid completó exitosamente vuelos de verificación de la Fase 3 como parte de su proceso de certificación para la entrega de paquetes con drones en Colombia (Unmanned Airspace, 2023). La empresa estableció alianzas estratégicas con diversas compañías tecnológicas y operadoras de drones. En particular, firmó una carta de intención para proporcionar drones eVTOL integrados con la plataforma de conectividad multi-

enlace BVLOS de ElSight, lo que permitirá la expansión de las entregas con drones de Flyzz en México (ElSight, 2023). Asimismo, ha trabajado en conjunto con Unifly para probar operaciones de drones en Colombia, asegurando la integración segura de estos dispositivos en el espacio aéreo del país (McNabb, 2022).

Existe una empresa colombiana llamada Black Square que está especializada en el desarrollo de drones industriales y soluciones tecnológicas avanzadas para diversas aplicaciones, incluyendo la entrega de mercancías. Su línea de drones HERCULES X4 y HERCULES X8, diseñados y fabricados en Colombia, ofrece una alternativa innovadora y confiable para la optimización de entregas en sectores como el comercio, la salud y la industria. Estos drones cuentan con tecnología de navegación avanzada, autonomía optimizada y capacidad para transportar cargas de manera eficiente en entornos urbanos y rurales. Uno de los principales diferenciales de Black Square en el sector de entregas es su capacidad para integrar sensores hiperespectrales en sus drones, permitiendo una mayor precisión en la planificación y monitoreo de rutas, así como en la seguridad de los envíos. La empresa es distribuidora oficial de HySpex, una marca líder en el desarrollo de sensores hiperespectrales, lo que fortalece su posición en la industria al ofrecer soluciones de entrega con un alto nivel de trazabilidad y control de calidad (HySpex, s.f.)

En términos de seguridad, Black Square firmó un acuerdo con ParaZero, una empresa especializada en sistemas de protección para drones, con el objetivo de garantizar operaciones seguras en el transporte de mercancías. Esta colaboración permite la implementación de paracaídas autónomos y otros mecanismos de seguridad que reducen el riesgo de fallos durante el proceso de entrega, consolidando a Black Square como un referente en la integración de tecnología avanzada en la logística aérea de última milla (ParaZero Technologies Ltd., 2023).

Diagnóstico de la situación actual del uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.

Con el propósito de conocer la situación actual del uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia. Se realizó una encuesta a 70 líderes de empresas entre las cuales están Bavaria, Cementos Argos, Axionlog, Corporación Colombiana de Logística S.A., Ransa Transporte, JLT Transporte y SUMMA Logística. La mayor parte de las empresas encuestadas se encuentran en Bogotá, con un 44.3% del total de respuestas, seguida por otras ciudades como Barranquilla, Medellín y Cali, las cuales juntas representan aproximadamente un 44.2% del total. El grupo más representativo corresponde a aquellos con más de 10 años de experiencia, alcanzando un 61.43% del total. Las empresas del sector Logística y Transporte lideran la participación en la encuesta, representando un 42.86% del total. Otros sectores relevantes incluyen Manufactura y Automotriz, que en conjunto agrupan un 31.43% de las respuestas.

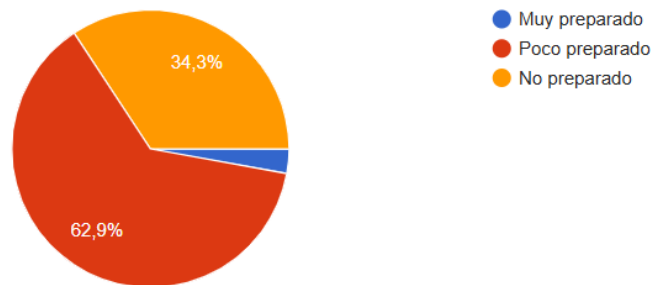
Es importante resaltar que el uso de vehículos con motores de combustible fósil (camiones, motos) es el medio más utilizado por las empresas encuestadas, representando un 78.57% del total. Esto refleja una dependencia significativa de los combustibles fósiles en la logística de última milla. Alternativamente, otros medios como el transporte eléctrico y las bicicletas tienen una adopción limitada, lo que sugiere que la transición hacia modelos de transporte más sostenibles aún está en una etapa incipiente.

En cuanto a la adopción de drones en transporte de última milla, el 85.71% de las empresas encuestadas indicó que no tiene planes de usar drones, lo que sugiere que aún no existe una implementación masiva de esta tecnología. Sin embargo, un 51.43% de los encuestados considera que los drones pueden mejorar la satisfacción del cliente en términos de los Acuerdos del Nivel de Servicio (ANS), lo que indica que, aunque los drones no sean una opción predominante hoy, hay una expectativa positiva sobre su impacto en el servicio.

En cuanto al nivel de preparación del mercado colombiano para la adopción de drones, la Figura 7 indica que el 62.86% de los encuestados considera que el sector está poco preparado, lo que muestra que aún existen retos importantes por superar antes de una adopción masiva de los drones en la última milla.

Figura 7

Preparación de las empresas colombianas para uso de drones en última milla



Nota. Elaboración propia

Ahora bien, este diagnóstico se amplía en el siguiente inciso, mediante un análisis comparativo sobre las barreras para implementar drones en logística, propuesto por Sah et al., (2021).

Barreras para la implementación de drones en logística de última milla

En el artículo "*Analysis of barriers to implement drone logistics*" de Bhawesh Sah, Rohit Gupta & Dana Bani-Hani (2021), los autores identificaron seis barreras críticas para la implementación de la logística con drones, las cuales fueron clasificadas utilizando el Método Delphi Difuso (FDM) y el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) (Sah et al., 2021):

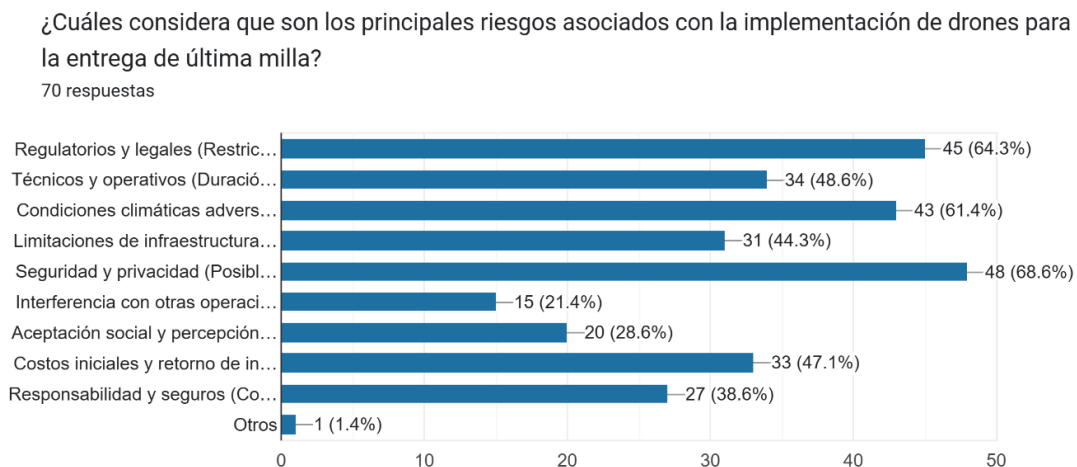
- Preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad
- Desafíos regulatorios
- Percepción pública y barreras psicológicas
- Problemas ambientales
- Factores económicos

- Limitaciones técnicas

Los hallazgos de Sah et al, (2021) se ven reflejados en los resultados de la encuesta aplicada a líderes logísticos en Colombia, donde se consultó por los principales riesgos percibidos en la implementación de drones para entregas de última milla. Tal como muestra la Figura 8, estos resultados coinciden con las barreras críticas identificadas en la literatura, reafirmando su relevancia en el contexto colombiano.

Figura 8

Principales riesgos para la implementación de drones en entregas de última milla en Colombia



Nota. Elaboración propia

Preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad

Los drones plantean preocupaciones importantes relacionadas con la privacidad y la seguridad, ya que son capaces de recopilar grandes cantidades de datos durante sus operaciones (Sah et al., 2021). La aprensión pública sobre la recopilación no autorizada de datos, el potencial de hackeo y el mal uso de los drones agravan aún más estas preocupaciones (Leon et al., 2021).

La seguridad y los riesgos operacionales también son preocupaciones relevantes. Existen riesgos de colisiones, caídas de mercancías y posibles interferencias en las señales de

control, lo que plantea desafíos adicionales para su adopción segura (The Logistics World, 2023).

Para los líderes de procesos logísticos de distribución en Colombia, con el 68,6%, el principal riesgo para una operación de entrega de última milla está asociado con la seguridad y privacidad, como se observa en la Figura 8 .

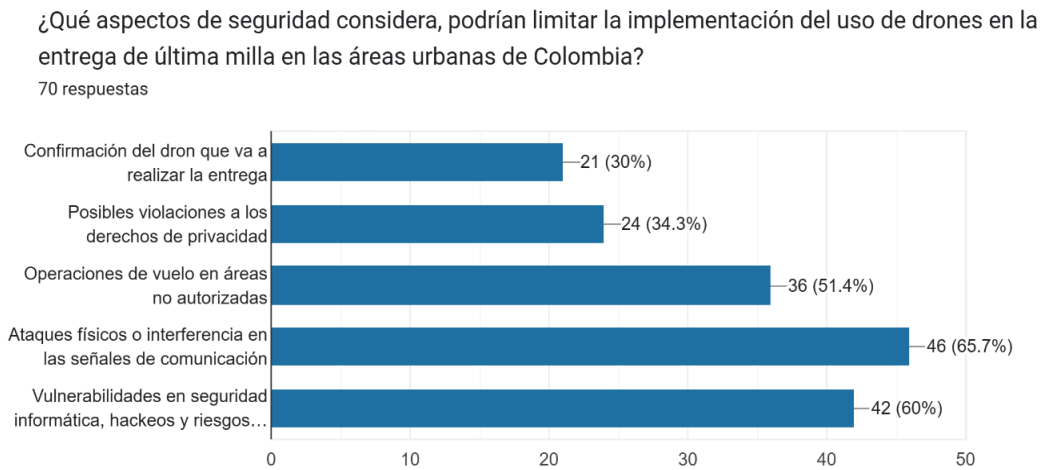
Principales riesgos para la implementación de drones en entregas de última milla en Colombia.

Teniendo en cuenta la Figura 9, los líderes de logística de última milla están mayoritariamente preocupados por los ataques físicos o interferencias en las señales de comunicación (65.7%) y por las vulnerabilidades en la seguridad informática, como hackeos y otros riesgos cibernéticos (60%). Estos dos factores representan más del 60% de las respuestas, lo que sugiere que las barreras más importantes para la implementación de drones en las entregas de última milla están relacionadas con la seguridad de las comunicaciones y la protección de los sistemas informáticos.

Esto indica que, para garantizar una implementación exitosa del uso de drones en áreas urbanas, se debe poner especial énfasis en mejorar la seguridad en las comunicaciones y en la protección de los sistemas informáticos que controlan las operaciones de los drones, así como en asegurar que los drones operen en zonas reguladas.

Figura 9

Aspectos de seguridad que limitan el uso de drones en última milla en Colombia

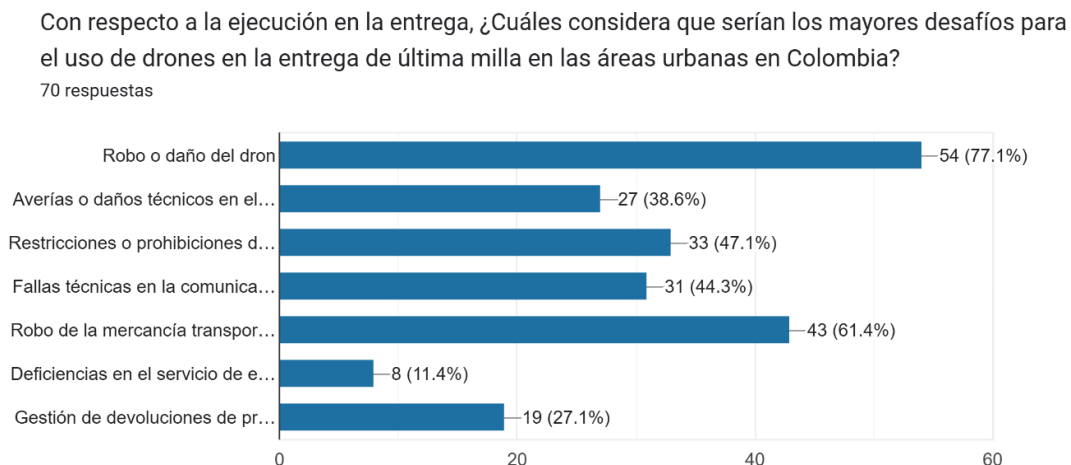


Nota. Elaboración propia

Por otra parte, con respecto a la ejecución en la entrega, entre los desafíos más críticos relacionados con la seguridad física del dron y la mercancía, se destacan el robo o daño del dron (77.1%) y el robo de la mercancía (61.4%), como se observa en la Figura 10.

Figura 10

Desafíos en la ejecución de la entrega



Nota. Elaboración propia

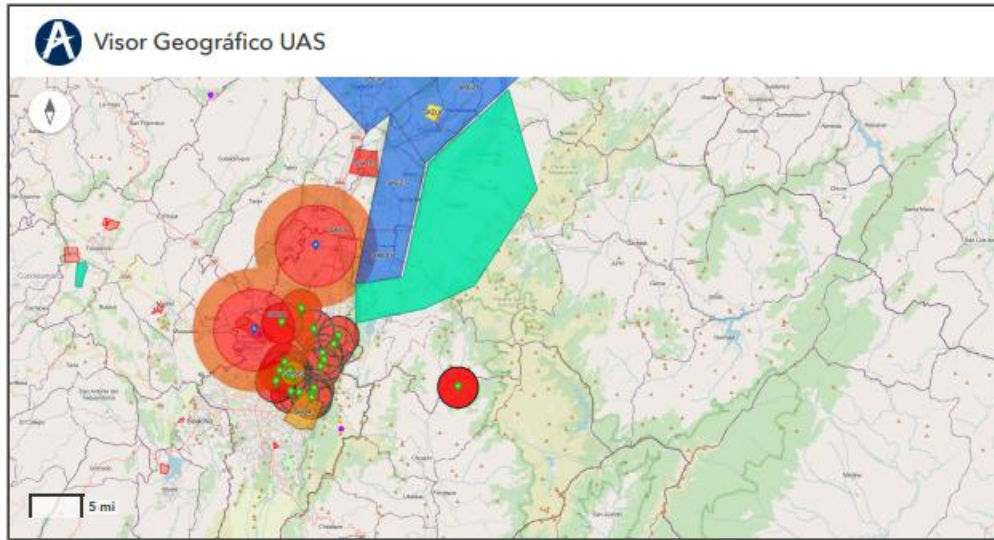
Estos resultados sugieren que, para asegurar una adopción exitosa de drones en la entrega de última milla, será crucial establecer fuertes medidas de seguridad, mejorar la infraestructura técnica y considerar cuidadosamente las regulaciones sobre el espacio aéreo en áreas urbanas.

Desafíos regulatorios

Una de las barreras más significativas para la logística con drones es el estricto marco regulatorio que rige el uso del espacio aéreo, los requisitos de certificación y las restricciones operativas (Sah et al., 2021). Estas regulaciones son fundamentales para garantizar la seguridad, pero también ralentizan la adopción de drones en la logística. Los operadores de drones enfrentan obstáculos legales, como la gestión del tráfico aéreo y la adhesión a estrictos protocolos gubernamentales, que varían según las regiones y son difíciles de armonizar a nivel global (Na & Chang, 2024).

Actualmente, las regulaciones limitan el uso de drones en entornos urbanos densos y la adopción de drones sigue siendo costosa para muchas empresas debido al alto precio de adquisición y mantenimiento, normas como la RAC 100 limitan el uso de los drones y exige a las empresas que los usan una inversión en infraestructura. Por otro lado, el uso del espacio aéreo es restringido en varias zonas urbanas del país tal como lo demuestra la Figura 11 del Visor Geográfico UAS, la cual es una herramienta que permite visualizar las zonas de No Vuelo de Drones (ZNVD) y las áreas de restricción que se establecen en las publicaciones de Información Aeronáutica (AIP) al igual que en la RAC 100.

Figura 11
Visor Geográfico UAS



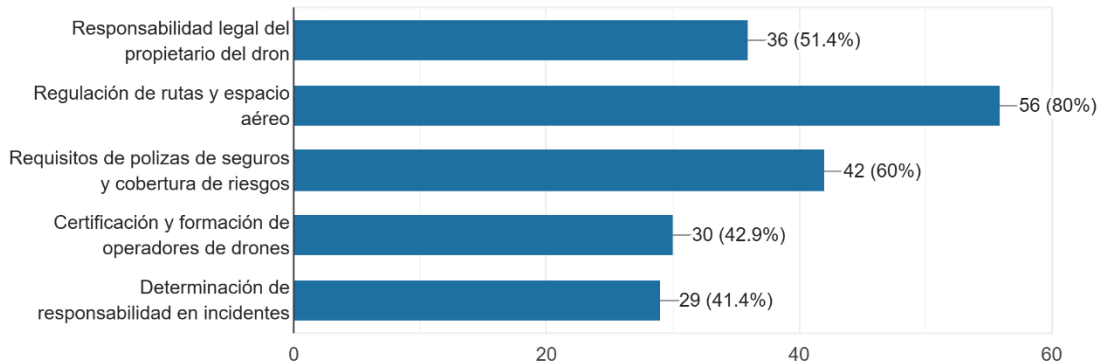
Nota. Tomado de Aeronáutica Civil. (2023). Visor Geográfico UAS [Mapa].
(<https://www.arcgis.com/apps/instance/media/index.html>)

Teniendo en cuenta la Figura 12, quienes lideran procesos de transporte y distribución, ven las barreras regulatorias y legales como factores clave que pueden frenar la adopción de drones para la entrega de última milla en áreas urbanas. Los aspectos más críticos son la regulación de rutas y del espacio aéreo (80%) y los requisitos de seguros (60%), que indican la necesidad de un marco normativo claro y mecanismos de cobertura de riesgos. La responsabilidad legal del propietario (51.4%) y la formación y certificación de los operadores (42.9%) también se consideran desafíos importantes, lo que sugiere que la implementación de drones requerirá tanto medidas de seguridad adecuadas como la capacitación de los operadores. Finalmente, la determinación de responsabilidad en incidentes (41.4%) resalta la importancia de definir claramente cómo se asignarán las responsabilidades en caso de accidentes, lo cual es fundamental para la adopción segura y responsable de esta tecnología.

Figura 12*Barreras regulatorias o legales para las entregas de última milla en Colombia*

¿Qué barreras regulatorias o legales considera que podrían frenar la implementación de drones en las entregas de última milla en las áreas urbanas en Colombia?

70 respuestas



Nota. Elaboración propia

Tanto en el aspecto de operaciones de vuelo en áreas no autorizadas como en el de restricciones o prohibiciones, los resultados de la Figura 12.

Barreras regulatorias o legales para las entregas de última milla en Colombia indican que hay una preocupación compartida, entre los responsables de logística de distribución en las empresas en Colombia, sobre la regulación y el control del espacio aéreo en áreas urbanas. Las operaciones en áreas no autorizadas (51.4%) destaca el riesgo de incumplimiento de las normativas, lo que puede suponer no solo una barrera legal, sino también un riesgo de seguridad para los ciudadanos, la infraestructura y otras aeronaves. Del mismo modo, las Restricciones o prohibiciones de vuelo (47.1%) refleja la dificultad que enfrentan las empresas para planificar operaciones de drones debido a las zonas restringidas o reguladas, que pueden limitar la flexibilidad y eficiencia de las rutas de entrega. Ambos aspectos reflejan preocupaciones sobre el control del espacio aéreo y las regulaciones en áreas urbanas. Se necesita un marco regulatorio claro y adaptable que permita operar drones en estas áreas con

la menor cantidad de restricciones, garantizando a la vez la seguridad y el cumplimiento de las normativas.

Este análisis refleja que, para superar las barreras regulatorias y legales, será crucial establecer un marco normativo que garantice seguridad, formación y claridad en las responsabilidades para todas las partes involucradas.

Percepción pública y barreras psicológicas

La percepción pública juega un papel fundamental en la adopción de tecnologías de drones, especialmente en áreas densamente pobladas. Las barreras psicológicas como las preocupaciones sobre el ruido, la seguridad y los fallos de los drones, crean resistencia a su uso (Sah et al., 2021). Las representaciones negativas en los medios y los accidentes aislados han contribuido a esta percepción (Rejeb et al., 2021).

La preocupación por la privacidad y la posibilidad del uso indebido de drones generan resistencia en ciertos sectores de la población (Ventas de Seguridad, 2023). Además, la falta de conocimiento sobre los beneficios potenciales de esta tecnología puede limitar su aceptación y uso generalizado.

Con respecto al entorno colombiano, la Figura 13 muestra que el principal factor psicológico que afecta la percepción del uso de drones es el temor ante accidentes o peligros (47.1%), lo que sugiere que la seguridad debe ser una prioridad en la implementación de esta tecnología. Así mismo, la confianza en los drones para cumplir con su propósito (34.3%) es otro factor clave que influye en la aceptación pública, y se debe trabajar para mejorar la percepción de fiabilidad. La reticencia hacia los avances tecnológicos (12.9%) también es un aspecto para considerar, aunque en menor medida.

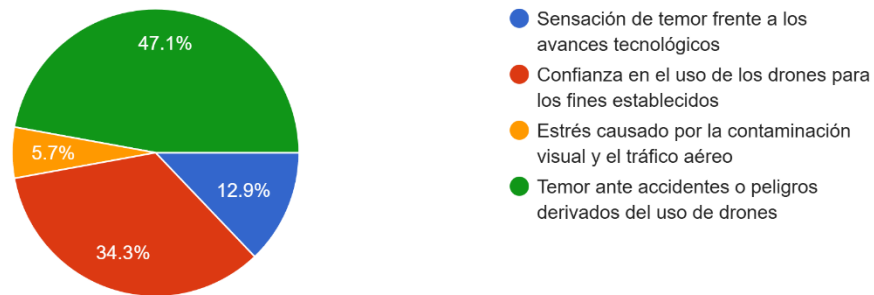
Finalmente, el estrés por la contaminación visual o el tráfico (5.7%) parece ser una preocupación de menor impacto.

Figura 13

Aspectos psicológicos más relevantes para la percepción del público y del usuario final sobre el uso de drones en la entrega de última milla en Colombia

De los siguientes aspectos psicológicos, ¿cuál considera más relevante para la percepción del público y del usuario final sobre el uso de drones en la entrega de última milla?

70 respuestas



Nota. Elaboración propia

Para fomentar la adopción de drones en la entrega de última milla en Colombia, es fundamental abordar las preocupaciones de seguridad del público, mejorar la confianza en la tecnología y asegurar que los usuarios finales perciban los drones como herramientas seguras y confiables, minimizando al mismo tiempo el posible impacto visual y ambiental.

Problemas ambientales

El uso de drones en la logística puede verse gravemente afectado por las condiciones ambientales, como el clima, la contaminación acústica y el daño potencial a la vida silvestre (Borghetti et al., 2022). Los drones deben estar diseñados para resistir diversas condiciones climáticas, incluidas la lluvia, el viento y las temperaturas extremas. Además, el ruido generado por las operaciones de los drones puede causar molestias en áreas residenciales (Verri et al., 2020).

Para el sector logístico colombiano, este tipo de problemas ambientales también genera varias preocupaciones. Los drones son percibidos como una solución que podría mitigar las emisiones de CO₂ en las entregas de última milla, pero también generan preocupaciones

relacionadas con el ruido y la gestión de residuos tecnológicos. En la Figura 14, se enumeran los siguientes aspectos:

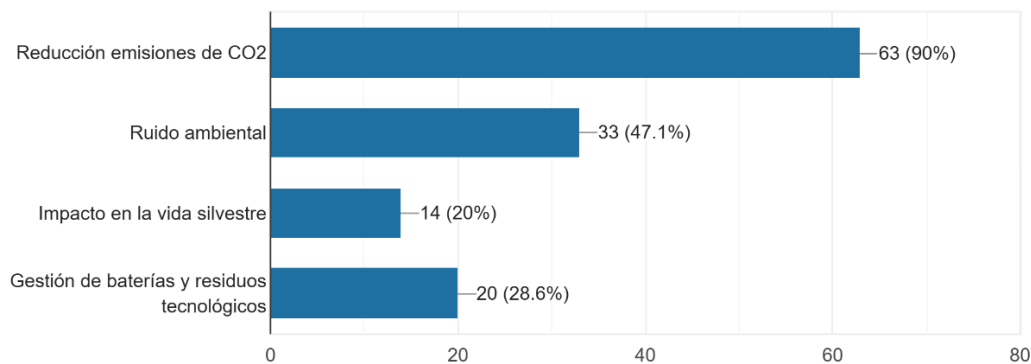
- La reducción de emisiones de CO₂ (90%) es vista como el principal beneficio ambiental, lo que refuerza la idea de que los drones pueden ofrecer una solución más sostenible en comparación con otros medios de transporte.
- Sin embargo, el ruido ambiental (47.1%) y la gestión de residuos tecnológicos (28.6%) son desafíos que deben abordarse para que los drones sean percibidos como completamente sostenibles.
- El impacto en la vida silvestre (20%) también es una preocupación menor pero importante en ciertas áreas.

Figura 14

Aspectos ambientales del uso de drones en última milla en Colombia

¿Qué aspecto ambiental considera que generaría al implementar el uso de drones para la entrega de última milla?

70 respuestas



Nota. Elaboración propia

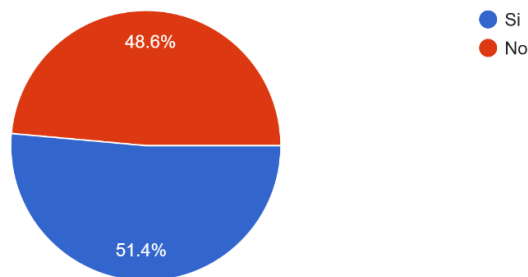
Para maximizar su impacto positivo, será necesario trabajar en soluciones que minimicen el ruido y se manejen adecuadamente los residuos generados por la tecnología de los drones.

Por otra parte, según la Figura 15, con respecto a la sostenibilidad del uso de drones para las entregas de última milla en áreas urbanas en Colombia según el tipo de productos, los resultados están bastante divididos:

- 51.4% de los encuestados considera que sí es sostenible el uso de drones para la entrega de última milla, lo que indica una perspectiva positiva hacia la viabilidad y sostenibilidad de esta tecnología en el contexto urbano.
- Por otro lado, un 48.6% cree que no es sostenible, lo que revela que casi la mitad de los encuestados tiene dudas sobre si los drones pueden ser una solución sostenible para las entregas de última milla, posiblemente debido a preocupaciones sobre el tipo de productos, el costo o la eficiencia.

Figura 15
Sostenibilidad del uso de drones en última milla en Colombia

De acuerdo al tipo de productos que la empresa maneja ¿Considera sostenible el uso de los drones para las entregas de última milla en áreas urbanas en Colombia?
70 respuestas



Nota. Elaboración propia

La opinión dividida muestra que, aunque hay optimismo en torno a la sostenibilidad del uso de drones, también existe escepticismo. Esto podría deberse a la variedad de productos manejados por las empresas, donde algunos podrían no ser adecuados para ser transportados por drones (por ejemplo, productos grandes, pesados o frágiles).

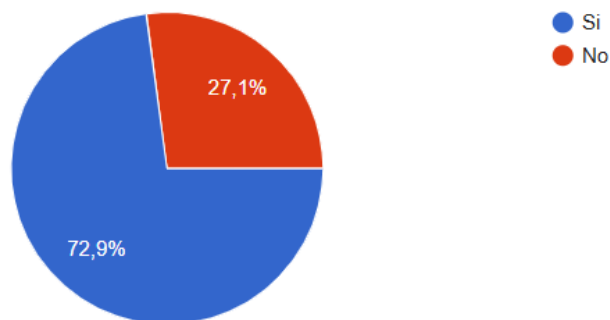
Factores económicos

Los altos costos iniciales de inversión, así como los gastos de mantenimiento y operativos continuos, crean barreras económicas para la adopción de drones (Kumar et al., 2024). Las empresas son cautelosas a invertir en tecnologías de drones debido a la incertidumbre sobre la rentabilidad y el retorno de la inversión a largo plazo (Koshta et al., 2024).

En términos de costos y viabilidad económica, la inversión inicial en tecnología de drones es elevada, y la rentabilidad a gran escala aún es incierta. Aunque empresas como Orkid han comenzado a implementar servicios de entrega de paquetes mediante drones en Colombia, la adopción generalizada requiere una evaluación económica detallada (Forbes, 2021).

El análisis de la percepción sobre la implementación de drones en la última milla con respecto a la efectividad en costos de operación revela que una mayoría significativa de los encuestados, **72.86%**, considera que los drones podrían generar una mayor efectividad en la reducción de costos operativos en el transporte de entregas, como se observa en la Figura 16.

Figura 16
Percepción sobre mejoras en costos operacionales



Nota. Elaboración propia

Por lo que puede observarse en la **Figura 17**, la inversión inicial en drones (41.4%) es el costo más significativo, lo que subraya el gran desafío económico de adquirir el equipo

necesario. Otros costos importantes incluyen mantenimiento y reparación (18.6%), personal especializado (15.7%) y costos de software y monitoreo (10%), lo que sugiere que la operación y el soporte técnico también conllevan una carga económica considerable.

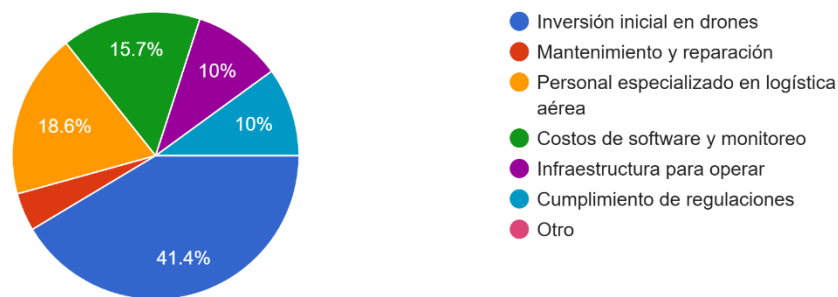
La inversión inicial es el mayor impacto económico en la implementación de drones, pero los costos operativos, mano de obra y mantenimiento, también son aspectos que deben ser tenidos en cuenta para asegurar la viabilidad financiera de las entregas con drones.

Figura 17

Principales costos de implementación de drones en última milla en Colombia

En su opinión, ¿Cuál sería el principal impacto de costos en la implementación de drones para entregas?

70 respuestas



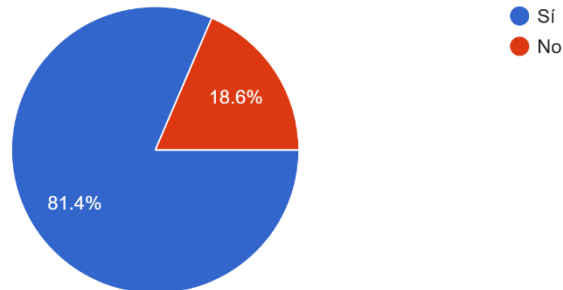
Nota. Elaboración propia

Ahora bien, en la Figura 18 se puede observar que una amplia mayoría del 81.4% considera que esta inversión es beneficiosa en relación con los costos, lo que sugiere una visión optimista a largo plazo, donde el ahorro y la eficiencia derivados del uso de drones compensarían estos costos iniciales. Por lo tanto, los desafíos económicos son percibidos como superables, con un potencial retorno de inversión significativo para quienes adopten esta tecnología.

Figura 18*Percepción de retorno a la inversión en drones en última milla en Colombia*

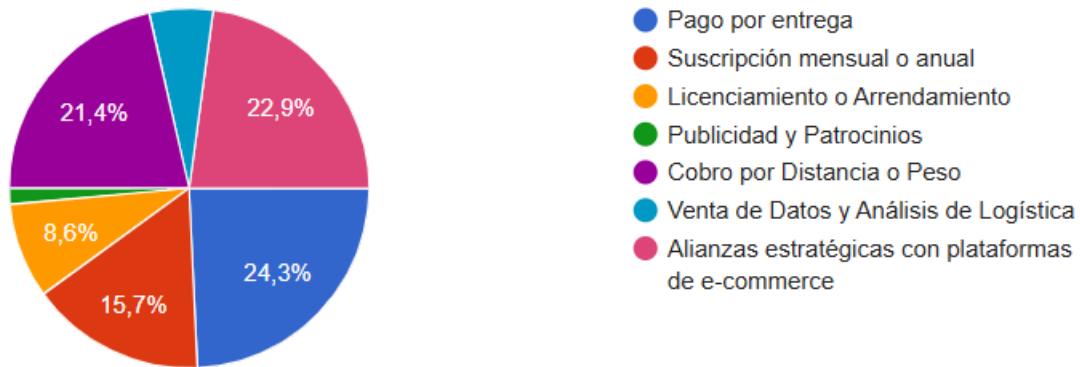
Considera que invertir en drones para entrega de última milla puede ser beneficioso en relación al costos de inversión?

70 respuestas



Nota. Elaboración propia

Con respecto a la posibilidad de gestionar la rentabilidad de la operación, la Figura 19 muestra que los encuestados consideran que los principales modelos de negocio en el uso de drones para entregas de última milla son el pago por entrega (24,3%) y las alianzas estratégicas con plataformas de e-commerce (22,9%), lo que indica que las empresas priorizan el cobro por servicio y la colaboración con grandes plataformas de comercio electrónico. Otros enfoques importantes incluyen el cobro por distancia o peso (21,4%) y los modelos de suscripción (15,7%), que permiten generar ingresos de forma más flexible o recurrente. Menos comunes son el licenciamiento o arrendamiento (8,6%), la venta de datos y análisis logístico (5,7%) y la publicidad (1%), lo que sugiere que estas últimas opciones tienen un menor impacto en el mercado actual.

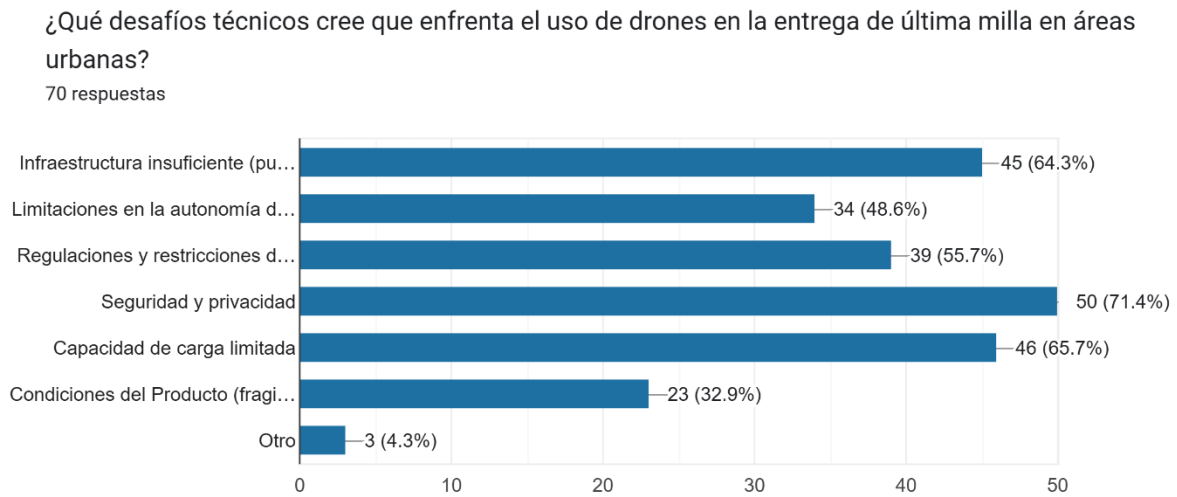
Figura 19*Posibles modelos de ingresos por operación de drones en última milla**Nota.* Elaboración propia**Limitaciones técnicas**

Los drones enfrentan limitaciones técnicas que afectan su viabilidad para operaciones logísticas a gran escala (Sah et al., 2021). Estas incluyen la limitada capacidad de carga, la corta duración de la batería y el alcance de vuelo, lo que restringe su capacidad para manejar grandes volúmenes de mercancías o viajar largas distancias (Eskandaripour & Boldsai Khan, 2023).

La infraestructura y tecnología necesaria para el funcionamiento eficiente de estos drones presenta limitaciones. La autonomía de vuelo y la capacidad de carga de los drones actuales aún no son suficientes para competir con métodos tradicionales de entrega en términos de costo y velocidad (The Logistics World, 2023). Asimismo, la falta de una red robusta de estaciones de recarga y la necesidad de sistemas de comunicación confiables en áreas remotas dificultan su operación efectiva.

Para implementar drones en última milla en Colombia, la Figura 20 muestra que los principales desafíos técnicos incluyen preocupaciones sobre la infraestructura y la capacidad de carga, mientras que aspectos como la autonomía del dron y las características de los productos a transportar también juegan un papel significativo:

- La capacidad de carga limitada es mencionada por 65.7% de los líderes de logística de distribución y transporte, lo que refleja la percepción de que los drones actuales tienen restricciones en cuanto al peso o volumen de los productos que pueden transportar. Este es un reto técnico importante, especialmente para el transporte de bienes voluminosos o pesados.
- La infraestructura insuficiente fue señalada por 45 encuestados (64.3%). Esto incluye la falta de instalaciones adecuadas para despegue, aterrizaje, y mantenimiento de los drones, así como la necesidad de una infraestructura de comunicaciones sólida para gestionar las operaciones de los drones de manera segura y eficiente.
- Limitaciones en la autonomía del dron, mencionadas por 34 encuestados (48.6%), subrayan la necesidad de mejorar la capacidad de las baterías de los drones para que puedan cubrir mayores distancias sin necesidad de recarga frecuente, especialmente en áreas urbanas extensas.
- Condiciones del producto (fragilidad o sensibilidad de los artículos) representan un desafío menor, pero aún importante, para 23 encuestados (32.9%). Esto sugiere que algunos productos requieren mayores cuidados durante el transporte por drones, lo que podría limitar su viabilidad para ciertos tipos de mercancías.

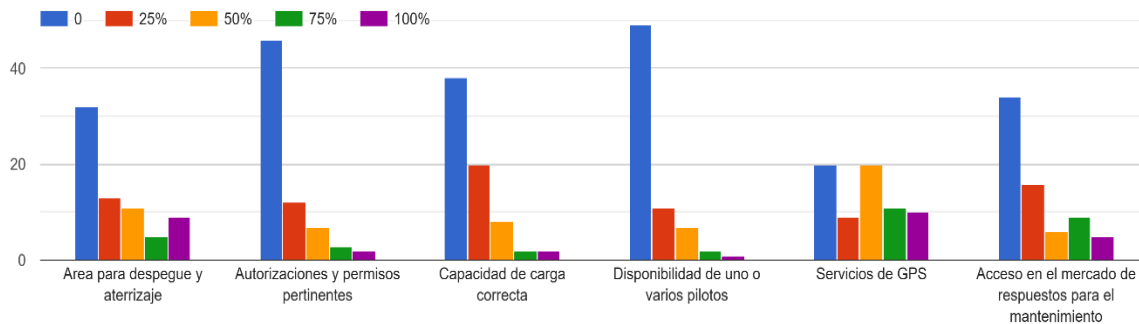
Figura 20*Desafíos técnicos de las entregas de última milla en Colombia*

Nota. Elaboración propia

Teniendo en cuenta la Figura 21, la mayoría de las empresas en Colombia no cuentan con la infraestructura necesaria (muchas están en el nivel "0%") para la implementación de drones en la entrega de última milla, especialmente en cuanto a áreas de despegue/aterrizaje, autorizaciones y disponibilidad de pilotos. Sin embargo, algunos aspectos como la capacidad de carga y los servicios de GPS parecen tener un desarrollo ligeramente mayor en algunas organizaciones. Existe una clara falta de preparación en permisos y autorizaciones, que podría ser un obstáculo significativo para la implementación de drones en estas operaciones, por tanto, para muchas empresas, la adopción de drones en entregas de última milla aún requiere una inversión importante en infraestructura técnica y regulatoria.

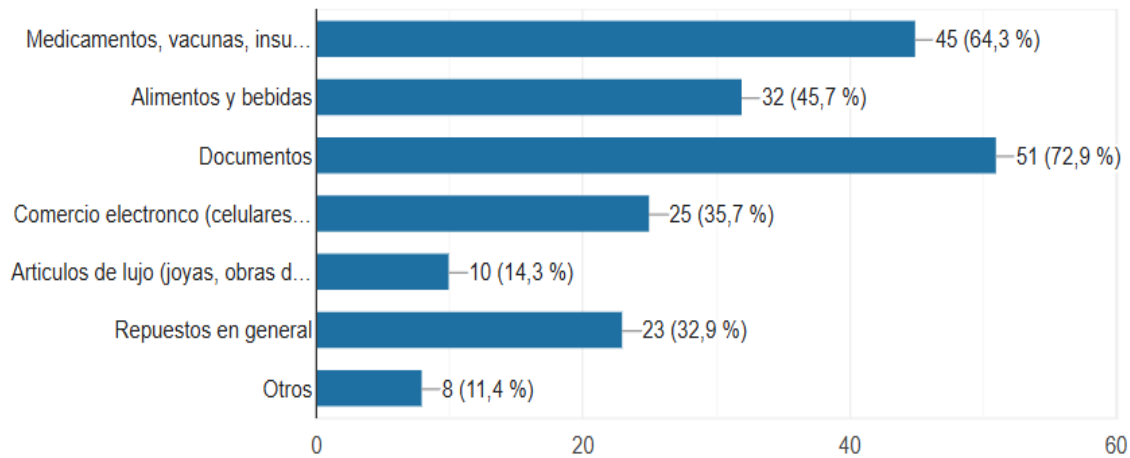
Figura 21*Nivel de infraestructura técnica mínima para implementar drones en última milla*

¿En que nivel considera que su empresa se encuentra en relación con la infraestructura técnica mínima para la implementación del uso de drones en entrega de última milla?



Nota. Elaboración propia

Con base en la Figura 22, los productos con mayor viabilidad para transportar con drones en la entrega de última milla en áreas urbanas de Colombia incluyen principalmente documentos (51 menciones), seguidos por medicamentos, vacunas e insumos y equipos médicos, cada uno con 45 menciones. Los alimentos y bebidas también fueron destacados con 32 menciones, mientras que el comercio electrónico (incluyendo celulares, computadores, relojes y tablets) obtuvo 25 menciones. Otros productos mencionados incluyen repuestos en general (23 menciones) y artículos de lujo como joyas y obras de arte (10 menciones).

Figura 22*Productos para transportar mediante drones*

Nota. Elaboración propia

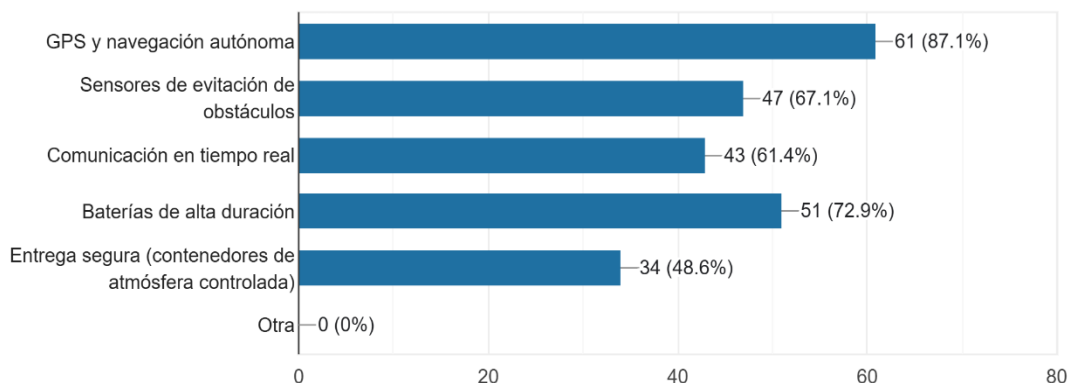
Para superar los desafíos técnicos identificados previamente en la implementación de drones para entregas de última milla en Colombia, es esencial adoptar tecnologías clave que faciliten su operación eficiente y segura. La Figura 23 destaca las tecnologías consideradas más relevantes para el éxito de estas operaciones.

- GPS y navegación autónoma es vista como la tecnología más crucial, mencionada por 61 encuestados (87.1%).
- Los sensores de evitación de obstáculos fueron identificados por el 67.1% de los encuestados como una tecnología clave.
- La comunicación en tiempo real, considerada esencial por el 61.4%, es vital para monitorear y controlar las operaciones de los drones en tiempo real, permitiendo responder rápidamente ante problemas técnicos o de seguridad que puedan surgir durante el vuelo.
- Baterías de alta duración, mencionadas por el 72.9%, ayudarán a superar las limitaciones en la autonomía de los drones.

Figura 23*Algunas tecnologías para superar los desafíos técnicos de los drones en última milla*

De las siguientes tecnologías, ¿Cuáles considera clave para que el uso de drones sea exitoso en la entrega de última milla?

70 respuestas



Nota. Elaboración propia

Las tecnologías mencionadas no sólo abordan los desafíos técnicos previamente discutidos, sino que también representan algunas herramientas clave para hacer viable la operación masiva de drones en las entregas de última milla, asegurando seguridad, eficiencia, y confiabilidad en estas operaciones.

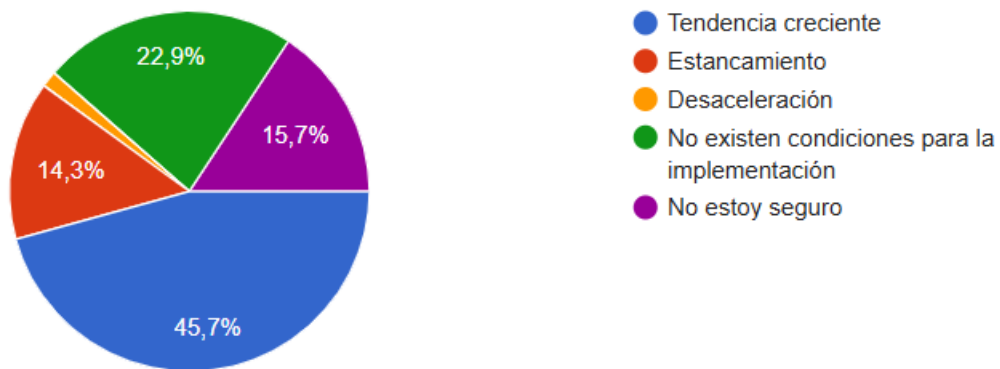
Consideraciones finales sobre drones en última milla en Colombia

El uso de drones en la logística de última milla ha mostrado un crecimiento significativo a nivel global, sin embargo, su implementación en América Latina, y particularmente en Colombia, aún enfrenta desafíos regulatorios, técnicos y de aceptación social. En el país, aunque existen proyectos piloto en ciudades como Bogotá y Medellín, el 85.71% de los líderes de logística y transporte consultados, no tiene planes de adoptar esta tecnología a corto plazo, reflejando una baja madurez del mercado y una falta de infraestructura adecuada. Las principales barreras incluyen la capacidad de carga limitada, restricciones regulatorias como la RAC 100 y el costo elevado de implementación, el 68.6% de los líderes del sector identifican la seguridad y privacidad como los principales riesgos, mientras que la percepción pública sigue

siendo ambivalente, con un 51.4% que considera sostenible su uso y un 48.6% que aún duda de su viabilidad. A pesar de estos desafíos, el 45.71% de los encuestados prevé un crecimiento en la adopción de drones en los próximos cinco años, impulsado por mejoras en la autonomía de batería, integración con sistemas de navegación avanzados y un marco normativo más claro. La reducción de emisiones de CO₂ es vista como el principal beneficio ambiental, además el 81.4% de los encuestados considera que invertir en drones para entrega de última milla puede ser beneficioso en relación con el costo de inversión, lo que refuerza la necesidad de impulsar esta tecnología como una solución sostenible.

En la Figura 24 se puede observar la perspectiva de los líderes de logística de distribución en Colombia con respecto a las oportunidades del uso de drones en los próximos cinco años, donde el 45.71% de los encuestados considera que la tendencia será creciente, lo que indica que, aunque la implementación actual es baja, existe una expectativa positiva hacia la adopción progresiva de esta tecnología en la logística de última milla.

Figura 24
Perspectivas sobre drones en última milla en los próximos cinco años



Nota. Elaboración propia

Resultados prueba de hipótesis

En Tabla 4 se presentan los valores observados y esperados utilizados en el análisis:

Tabla 4

Valores del análisis

Uso de Drones	Percepción de Mejora: No (Observado)	Percepción de Mejora: Sí (Observado)	Percepción de Mejora: No (Esperado)	Percepción de Mejora: Sí (Esperado)
No tiene planes de usar drones	34	26	29.14	30.86
No, pero está considerando su uso	0	9	4.37	4.63
Sí	0	1	0.49	0.51

Nota. Elaboración propia

Tras aplicar la prueba de chi-cuadrado a los datos obtenidos en la encuesta, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Valor de χ^2 calculado: 11.02
- Valor p: 0.004
- Grados de libertad (df): 2

Como el valor p es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y por consiguiente se acepta la hipótesis alterna (H_1) que indica la existencia de una relación significativa entre el uso de drones y la percepción de mejora en la eficiencia logística y la satisfacción del cliente.

Estos resultados reafirman que la inversión en tecnologías de drones puede conducir a mejoras sustanciales en la eficiencia logística y satisfacción del cliente. Las empresas que están considerando adoptar esta tecnología pueden esperar beneficios tangibles, como la reducción de los tiempos de entrega y un aumento en la lealtad de los clientes.

Capítulo V. Propuesta para superar las barreras de la implementación de drones en entregas en la última milla en las áreas urbanas de Colombia: Oportunidades de solución.

En este capítulo se presenta una propuesta estructurada para superar las principales barreras en la implementación de drones en entregas de última milla en las áreas urbanas de Colombia, abordando aspectos regulatorios, tecnológicos, ambientales, sociales y económicos; a través de un enfoque basado en evidencia, experiencias internacionales y recomendaciones técnicas, se busca fomentar una adopción segura, eficiente y sostenible de esta tecnología, alineando a las empresas que cuentan con procesos de distribución y logística de última milla con las mejores prácticas globales en logística aérea no tripulada.

Aspectos del Marco Regulatorio Integrado

Un entorno normativo moderno permitirá fortalecer la confianza pública, proteger el espacio aéreo y facilitar la interoperabilidad con otros actores del ecosistema logístico.

Teniendo en cuenta la RAC 100, para implementar drones en logística se requiere cumplir con los siguientes requisitos:

- **Registro de Drones:** Es un proceso administrativo y técnico mediante el cual se identifican formalmente los vehículos aéreos no tripulados (UAV) que operan en un país. Este proceso permite vincular cada equipo con su operador, conocer su origen y uso, y establecer mecanismos de control para garantizar la seguridad del espacio aéreo y prevenir actividades ilícitas. En Colombia, se ha evidenciado la necesidad de fortalecer dicho registro, debido a inconsistencias entre el número de drones vendidos y los efectivamente registrados, lo cual plantea riesgos en términos de seguridad y legalidad (Serna Zapata, 2020).

- **Certificación de Idoneidad para Pilotos de UAS:** Es el proceso mediante el cual se validan las competencias técnicas, legales y operativas de los pilotos de drones (UAS), con el objetivo de garantizar una operación segura y controlada dentro del espacio aéreo nacional. Este tipo de certificación es clave para evitar riesgos en operaciones civiles y comerciales, y debe alinearse con estándares internacionales. En el caso colombiano, se ha identificado la necesidad de revisar y mejorar estos procedimientos, ya que aún existen vacíos regulatorios que dificultan su implementación eficaz (Avila-Herrera, 2017).
- **Seguro de Responsabilidad Civil Obligatorio:** es una medida legal destinada a garantizar la cobertura de los daños que un dron pueda ocasionar a terceros durante su operación. Este seguro protege tanto a los operadores como a las víctimas ante posibles incidentes, y es fundamental para el desarrollo responsable de actividades comerciales con UAS en zonas urbanas. En Colombia, se ha identificado que la regulación en torno a este tipo de seguro aún es limitada y requiere fortalecimiento para adaptarse al creciente uso civil de drones y minimizar riesgos asociados a su operación (Mesa, 2020).

Se proponen los siguientes elementos que añaden valor a la normativa existente:

Sistema Progresivo de Licencias Integrando Simuladores Virtuales y Formación

Continua Online, que permita reducir los errores humanos y mejorar la seguridad operativa en entornos urbanos.

Sistema Digital de Monitoreo de Pólizas Paramétricas y Específicas, que ajuste las pólizas de responsabilidad civil de los drones según el peso, tipo de carga y naturaleza de la operación.

Aspectos de la Innovación Tecnológica

El avance de la logística aérea no tripulada depende de la incorporación de tecnologías disruptivas que mejoren la eficiencia, seguridad y transparencia de las operaciones. En este caso se proponen las siguientes tecnologías, que contribuyen en el desarrollo de una red aérea inteligente y confiable, capaz de operar con precisión en entornos urbanos complejos:

- **Blockchain:** Es una tecnología de registro distribuido que permite almacenar datos de forma segura, inmutable y transparente a través de una red descentralizada. Esta tecnología puede utilizarse para registrar y autenticar la identidad de los dispositivos, gestionar datos de vuelo, coordinar entregas en red y mejorar la trazabilidad logística. Su integración en sistemas de drones ayuda a fortalecer la seguridad de las operaciones y la confianza en entornos colaborativos y automatizados (Babazade & Gurtov, 2022).
- **Algoritmos Avanzados:** son métodos computacionales sofisticados diseñados para resolver problemas complejos de manera eficiente, como la optimización de rutas, toma de decisiones autónomas y planificación dinámica de entregas. Estos algoritmos permiten planificar trayectorias óptimas, minimizar tiempos de entrega y maximizar la eficiencia del sistema. Por ejemplo, se han desarrollado algoritmos de búsqueda por vecindad variable (VNS) para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con drones, mejorando significativamente el rendimiento en operaciones de gran escala (Schermer et al., 2018).
- **Inteligencia Artificial y Sensores:** Representan una combinación tecnológica clave para la automatización y eficiencia de las entregas de última milla. Los sensores permiten recopilar información en tiempo real (posición, obstáculos, clima, etc.), mientras que la inteligencia artificial procesa estos datos para tomar decisiones autónomas, optimizar rutas y mejorar la seguridad operativa. Esta integración posibilita que los drones

realicen misiones complejas sin supervisión directa, adaptándose a entornos urbanos dinámicos (Caballero-Martin et al., 2024).

Aspectos de la Gestión de la Seguridad

A medida que los drones se integran al tejido logístico de las ciudades, es indispensable establecer mecanismos robustos de gestión de la seguridad operativa. La implementación de protocolos tecnológicos y humanos permitirá anticipar, mitigar y responder de forma efectiva ante fallos técnicos, ciberataques o condiciones adversas, garantizando operaciones confiables para todos los actores involucrados. Se propone implementar un sistema integral de gestión de seguridad para manejo de drones, que contemple:

- Contratación de personal especializado en seguridad aérea, profesionales certificados y con experiencia en gestión operativa y seguridad aérea, especialmente en drones. Que garanticen el cumplimiento de estándares técnicos, normativos y operativos para prevenir incidentes y garantizar la seguridad de las operaciones aéreas no tripuladas (Federal Aviation Administration, s.f.).
- Mantenimiento preventivo de drones, a través de actividades periódicas y planificadas destinadas a inspeccionar, probar y reparar anticipadamente los componentes críticos del dron (baterías, hélices, motores, software) para evitar fallos técnicos que puedan poner en riesgo la seguridad de las operaciones o de terceros (Parameswarath & Sikdar, 2023).
- Desarrollo de protocolos de ciberseguridad, con diseño e implementación de procedimientos que protejan la infraestructura tecnológica y las comunicaciones involucradas en la operación de drones contra amenazas cibernéticas.
- Capacitación en ciberseguridad y formación del personal involucrado en la operación de drones sobre las mejores prácticas para proteger sistemas informáticos, datos sensibles y comunicaciones frente a posibles ataques cibernéticos, con entrenamiento

en identificación de amenazas, respuestas ante incidentes y uso seguro de plataformas tecnológicas (European Union Aviation Safety Agency, s.f.).

Aspectos de la Gestión Ambiental Sostenible

El desarrollo de la logística aérea debe ir de la mano con los principios de sostenibilidad ambiental. Incorporar fuentes de energía limpias, optimizar rutas y establecer sistemas de reciclaje permitirá reducir la huella de carbono de las operaciones con drones, fomentando un modelo de distribución respetuoso con el medio ambiente y alineado con las metas de descarbonización del país, a través de:

- Baterías de energía renovable que almacenan energía generada por fuentes limpias, como solar o eólica, para el uso en drones, que permita reducir el impacto ambiental, aumentar la autonomía y mejorar la sostenibilidad de las operaciones logísticas, especialmente en áreas urbanas donde la reducción de emisiones es crucial (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022).
- Combinación de drones con vehículos eléctricos terrestres, como solución logística innovadora, donde los drones se despliegan desde vehículos eléctricos terrestres que actúan como estaciones móviles de carga y operación.
- Gestión de residuos tecnológicos bajo la implementación de políticas y procedimientos para el manejo adecuado de componentes electrónicos y tecnológicos obsoletos o dañados derivados de drones y equipos asociados, para promover la economía circular, reducir la contaminación ambiental y garantizar el cumplimiento de normativas ambientales vigentes relacionadas con el manejo de residuos electrónicos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2023).

Aspectos de la Aceptación Social y Participación Comunitaria

La aceptación social es un factor determinante para la viabilidad de los drones en la logística urbana. Involucrar a la ciudadanía desde las etapas iniciales, educar sobre los

beneficios de la tecnología y establecer mecanismos de participación permitirá fortalecer la confianza pública y garantizar una convivencia armónica con esta nueva forma de transporte.

Se propone implementar una estrategia de aceptación social con:

- Contratación de agencias de publicidad para diseñar y ejecutar campañas de concienciación sobre el uso de drones en la última milla.
- Organización de talleres comunitarios para educar a la población sobre el uso seguro de drones y cómo estos beneficiarán la logística y las entregas.
- Contratación de facilitadores y expertos en gestión comunitaria y tecnología de drones para dirigir talleres y consultas.
- Encuestas de percepción para evaluar la opinión de los ciudadanos sobre el uso de drones en su comunidad, para poder medir el nivel de aceptación social y recopilar sugerencias para mejorar la integración de la tecnología.
- Publicación de informes periódicos para compartir con la comunidad los avances del proyecto, resultados de encuestas y estudios, así como los impactos observados, mejorando la transparencia y la confianza de la población.
- Estudio de impacto social y ambiental para evaluar las posibles afectaciones del uso de drones en las comunidades y el entorno natural.
- Implementación de medidas para reducción de ruido como el uso de tecnologías más silenciosas o el establecimiento de rutas de vuelo lejos de zonas residenciales, buscando minimizar molestias a la población.

Aspectos del Impacto Económico y Laboral Positivo

La implementación de drones representa una oportunidad para dinamizar la economía, reducir costos logísticos, generar empleo con la formación de nuevos perfiles laborales especializados en operación, mantenimiento y desarrollo de software para drones, para lo cual se requiere:

- Contratación de personal local en áreas como la operación, mantenimiento y logística.
- Programas de capacitación en operación y mantenimiento.
- Fomento de startups locales relacionadas con la tecnología de drones, como servicios de entrega, software de gestión logística y mantenimiento especializado.
- Subsidios y ayudas gubernamentales o privadas para negocios locales: Incentivos y subsidios a pequeñas y medianas empresas que utilicen drones para la entrega de productos.

Los aspectos previamente analizados constituyen una base integral para la adopción de drones en la logística urbana. A partir de este marco, es posible avanzar hacia una propuesta que aborda los aspectos económicos —detallados en el Anexo 2— los cuales permiten evaluar la viabilidad, sostenibilidad y escalabilidad de la implementación de drones para entregas de última milla en el contexto colombiano.

Propuesta para implementación de Drones en Entregas de Última Milla en Áreas Urbanas de Colombia.

La implementación de sistemas de entrega con drones requiere un enfoque progresivo basado en pruebas piloto que permitan evaluar su viabilidad en condiciones controladas antes de su adopción a gran escala. Este proceso es fundamental para identificar áreas de mejora, optimizar la seguridad y eficiencia operativa, y generar confianza en la comunidad.

A través de un estudio de caso numérico, Borghetti et al., (2022), evaluaron tanto la aceptación del usuario como la rentabilidad del modelo, demostrando que, con una tarifa adecuada, el sistema puede alcanzar el punto de equilibrio en su tercer año de operación. La experiencia documentada en la ciudad de Milán demuestra que los drones son viables técnica y financieramente para entregas de paquetes pequeños y livianos en zonas urbanas, proporcionando una base sólida para explorar la aplicabilidad del modelo en ciudades de América Latina, particularmente en Colombia, donde las dinámicas de movilidad, expansión del e-commerce y retos ambientales urbanos hacen de esta tecnología una opción atractiva.

A continuación, presentamos una propuesta de piloto de innovación logística similar al formulado por Borghetti et al., (2022), en Milán, que busca transformar la entrega de última milla en zonas urbanas de Colombia mediante el uso de drones. Se propone iniciar con una prueba piloto de 6 meses en una ciudad colombiana clave, con perspectivas claras de escalamiento nacional y rentabilidad desde el primer año.

Objetivos específicos:

- Realizar al menos 32.000 entregas durante el piloto.
- Operar una flota de 10 drones en condiciones reales.
- Medir impacto económico, ambiental y social.
- Identificar oportunidades de escalamiento.

Características técnicas de la implementación

Con base en el estudio de Milán, los drones propuestos deben cumplir con las siguientes características técnicas ideales para operaciones urbanas:

La Tabla 5 resume las principales características técnicas que definen la selección del tipo de dron adecuado para el piloto de entregas en zonas urbanas. Estas especificaciones responden a criterios de seguridad, autonomía operativa, eficiencia en el consumo energético y compatibilidad con entornos urbanos densos.

Tabla 5

Características técnicas

Característica	Especificación Técnica
Estructura	Octocóptero
Carga máxima	2.25 kg
Autonomía de vuelo	30 minutos
Velocidad promedio	30 km/h
Altura de vuelo	120 m
Radio máximo de entrega	15 km
Espacio necesario despegue	1.5 m

Nota. Adaptado de "The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan" por Borghetti et al. (2022)

Infraestructura Logística

Centros de Distribución (CD) especializados: Con una estructura vertical tipo "colmena" para optimizar espacios y facilitar maniobras de despegue y aterrizaje.

Cobertura del servicio: Áreas urbanas delimitadas en radios de hasta 15 km alrededor de cada CD.

Cantidad de drones por centro: Se recomienda una cantidad inicial de entre 200 y 240 drones por CD, según demanda proyectada. Para efectos del piloto se requieren 10 drones.

Operaciones

Ciclos operativos de 45 minutos, incluyendo entregas de hasta 30 minutos y recargas o cambios rápidos de batería durante 15 minutos.

Horarios extendidos desde las 8:00 hasta las 21:15, logrando así un mínimo de 18 entregas diarias por dron.

La Tabla 6 resume los parámetros clave que delimitan el alcance operativo, geográfico y estratégico del proyecto piloto. Estos valores han sido seleccionados para garantizar un balance entre control, escalabilidad y demostración de impacto, en condiciones urbanas reales.

Tabla 6

Alcance del Piloto

Aspecto	Descripción
Ciudad piloto	Bogotá, Medellín o Cali
Duración	6 meses
Flota inicial	10 drones eléctricos de 2 kg de capacidad
Rango de operación	15 km desde el centro logístico
Número de entregas objetivo	32.000 - 65.000

Nota. Elaboración propia

La Tabla 7 describe el plan de ejecución del piloto en siete fases secuenciales. Cada etapa ha sido diseñada para garantizar un despliegue ordenado, seguro y medible del servicio, desde la planificación inicial hasta la evaluación final. Este enfoque por etapas permite controlar riesgos, realizar ajustes oportunos y generar aprendizajes antes de escalar el piloto.

Tabla 7

Plan de Ejecución

Fase	Duración
Planificación y permisos	3 semanas
Compra e instalación	4 semanas
Capacitación	2 semanas
Operación piloto (Fase 1)	8 semanas
Evaluación intermedia	2 semanas
Operación optimizada	8 semanas
Evaluación final	2 semanas

Nota. Elaboración propia

La Tabla 8 resume los principales indicadores que se utilizarán para monitorear y evaluar el rendimiento del piloto de entregas con drones. Estos KPIs permiten medir la eficiencia operativa, la calidad del servicio, la satisfacción del usuario y el impacto económico y

ambiental del proyecto. Todos han sido definidos con metas realistas basadas en estándares internacionales, experiencias similares y condiciones del mercado colombiano.

Tabla 8

Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)

Indicador	Fórmula / Criterio	Meta Esperada
Entregas diarias por dron	Total entregas / nº drones / días hábiles	≥ 13,5 (75% uso)
Precisión de entrega	% entregas realizadas sin errores (fallos, lugar incorrecto, etc.)	≥ 95%
Tiempo promedio de entrega	Minutos desde despacho hasta entrega	≤ 20 min
% drones en operación efectiva	Drones operativos / Total flota	≥ 90%
Satisfacción del usuario final	Encuesta con escala de 1 a 5	≥ 4/5
Costo por entrega	Costos operativos / entregas totales	≤ \$6,000 COP
Emissiones evitadas	Comparación CO ₂ vs. entregas terrestres (km evitados)	≥ 30% reducción CO ₂
Tiempo sin servicio por clima	Días con interrupción / total de días	≤ 10%

Nota. Elaboración propia

La Tabla 9 resume los recursos económicos requeridos para poner en marcha el piloto de entrega con drones. Esta inversión inicial cubre los activos físicos, licencias tecnológicas, formación del personal y el acondicionamiento operativo necesario para iniciar operaciones con una flota de 10 drones en una ciudad urbana de Colombia.

Tabla 9

Inversión requerida

Concepto	Valor COP
Compra de drones	\$200.000.000
Software y licencias	\$10.000.000
Capacitación	\$5.000.000
Acondicionamiento base	\$0 (alquiler)
Total inicial	\$215.000.000

Nota. Elaboración propia

La Tabla 10 presenta una estimación detallada de los costos operativos necesarios para mantener en funcionamiento el piloto durante un año calendario completo. Estos costos reflejan las necesidades reales de personal, soporte técnico, infraestructura y servicios básicos para una flota de 10 drones operando en una ciudad principal de Colombia.

Tabla 10*Costos Operativos Anuales (COP)*

Concepto	Valor COP
Salarios	\$204.000.000
Mantenimiento drones	\$25.000.000
Alquiler base	\$42.000.000
Software y soporte	\$5.000.000
Energía y datos	\$5.000.000
Seguros y licencias	\$10.000.000
Total anual	\$291.000.000

Nota. Elaboración propia**Proyecciones de Ingresos por escenarios.**

Con base en la capacidad operativa de la flota, la estructura de costos y la tarifa promedio por entrega, se han desarrollado proyecciones de ingresos para el primer año del piloto. Estas proyecciones contemplan tres escenarios posibles —pesimista, moderado y optimista— que varían según el nivel de utilización diaria de los drones. Esta aproximación permite evaluar la viabilidad financiera del piloto en distintos contextos operativos, anticipando tanto los riesgos como las oportunidades de rentabilidad desde el primer año de funcionamiento.

Suponiendo una tarifa por entrega de \$15,000 COP y una capacidad operativa de 18 entregas diarias por dron, los ingresos anuales proyectados serían:

Pesimista: 50% de utilización de la capacidad máxima.

Ingresos anuales = 10 drones*9 entregas/día*365 días* \$15,000 = \$492,750,000 COP

Moderado: 75% de utilización de la capacidad máxima.

Ingresos anuales = 10 drones*13.5 entregas/día*365 días*\$15,000 = \$739,125,000

COP

Optimista: 100% de utilización de la capacidad máxima.

Ingresos anuales = 10 drones*18 entregas/día*365 días*\$15,000 = \$985,500,000 COP

La Tabla 11 presenta una estimación comparativa del desempeño financiero del proyecto bajo tres escenarios operativos: pesimista, moderado y optimista, basados en distintos niveles de utilización de la capacidad instalada de la flota de drones. Esta proyección permite analizar la solidez financiera del piloto ante distintas condiciones de demanda y operación.

Tabla 11

Proyecciones Financieras

Escenario	Utilización	Ingresos Anuales	Utilidad Neta	ROI Año 1
Pesimista	50%	\$492.750.000	\$201.750.000	94%
Moderado	75%	\$739.125.000	\$448.125.000	208%
Optimista	100%	\$985.500.000	\$694.500.000	323%

Nota. Elaboración propia

El análisis comparativo de los tres escenarios operativos —pesimista (50% de utilización), moderado (75%) y optimista (100%)— demuestra que el proyecto piloto de entregas con drones no solo es viable, sino también altamente rentable desde el primer año, incluso en condiciones conservadoras.

En el escenario pesimista, con apenas la mitad de la capacidad operativa utilizada, el proyecto alcanza una utilidad neta anual superior a \$200 millones COP, recuperando la inversión inicial en poco más de un año. Esto valida la solidez del piloto incluso ante incertidumbres como baja demanda inicial o restricciones climáticas.

El escenario moderado —considerado el más realista— genera un retorno de inversión (ROI) del 208% en el primer año y permite la recuperación del capital en menos de seis meses. Esta situación muestra que, con una tasa de uso razonable y sin necesidad de saturar la flota, el proyecto es financieramente muy atractivo.

En el escenario optimista, el piloto opera a plena capacidad, generando una utilidad neta cercana a \$700 millones COP anuales. Este nivel de rendimiento no solo permite una

recuperación casi inmediata de la inversión (en menos de 4 meses), sino que ofrece un flujo de caja robusto para reinversión o expansión.

Con esta propuesta piloto de entregas con drones, se evidencia que no solo es viable técnica y financieramente, sino que está alineada con los desafíos y oportunidades de la logística urbana moderna. La propuesta está lista para realizarse en un entorno controlado y escalable, con retornos atractivos y un impacto tangible.

Discusión

La propuesta desarrollada para la implementación de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia permite identificar no solo el potencial transformador de esta tecnología en el ámbito logístico, sino también los múltiples desafíos que deben ser abordados para su adopción efectiva. Los resultados obtenidos a través del análisis documental, el diagnóstico contextual y las encuestas a actores del sector logístico de distribución y transporte revelan una convergencia entre el interés por innovar y la necesidad de superar limitaciones regulatorias, técnicas, ambientales y sociales.

En primer lugar, se evidenció que los drones pueden mejorar significativamente la eficiencia logística, especialmente en términos de tiempos de entrega y reducción de emisiones, lo cual coincide con estudios internacionales (Borghetti et al., 2022; Moshref-Javadi & Winkenbach, 2021). Asimismo, la encuesta aplicada confirmó una percepción favorable respecto a su adopción por parte de las empresas, reforzando la hipótesis alterna (H_1) y permitiendo rechazar la hipótesis nula (H_0). Esta validación estadística fortalece el argumento sobre el valor estratégico de incorporar drones en contextos urbanos colombianos.

Sin embargo, el análisis también deja claro que existen importantes barreras que condicionan la viabilidad de la propuesta. Entre las más relevantes se encuentran las restricciones legales, como las impuestas por la RAC 100 de la Aeronáutica Civil, y la necesidad de realizar estudios de seguridad operacional para cada operación específica. Estas restricciones, aunque necesarias desde la perspectiva de seguridad aérea, pueden dificultar la escalabilidad del uso de drones sin un acompañamiento institucional sólido.

En el ámbito técnico, las limitaciones de carga útil, autonomía de vuelo y resistencia a condiciones climáticas adversas fueron mencionadas recurrentemente por los encuestados. Esto sugiere que, aunque la tecnología avanza rápidamente, aún existen restricciones que

limitan su aplicación masiva en el corto plazo, especialmente para entregas que requieran volúmenes altos o distancias extensas.

Desde el punto de vista social, la aceptación pública representa un factor clave. Aunque los resultados muestran una apertura hacia esta tecnología, también se detectaron preocupaciones relacionadas con la privacidad, el ruido y la seguridad de las operaciones. Esto coincide con hallazgos internacionales (Madani & Ndiaye, 2023), y refuerza la necesidad de acompañar cualquier iniciativa con campañas de sensibilización y participación comunitaria.

Además, la propuesta desarrollada contempla componentes de sostenibilidad y eficiencia, lo cual representa un aporte relevante para las empresas colombianas en su transición hacia cadenas de suministro más verdes. A su vez, la inclusión de aspectos económicos y de generación de empleo destaca que la adopción de drones no debe percibirse únicamente como un reemplazo tecnológico, sino como una oportunidad para la reconversión laboral y la innovación en los modelos de negocio.

Entre las limitaciones del estudio, se reconoce el uso de un muestreo por conveniencia en la encuesta, lo que podría afectar la generalización de los resultados. No obstante, los 70 casos analizados brindan una base sólida para establecer tendencias preliminares y orientar futuras investigaciones.

Finalmente, este trabajo contribuye al cuerpo de conocimiento nacional al presentar una propuesta aplicable al contexto colombiano, alineada con las tendencias globales en logística de última milla. Queda abierta la posibilidad de realizar pruebas piloto colaborativas con empresas e instituciones gubernamentales, así como estudios comparativos con otras ciudades latinoamericanas, para robustecer la estrategia de implementación a largo plazo. En la Tabla 12 se realiza una comparación de modelos de transporte de última milla empleando drones, según sus características técnicas y descripción de los costos.

Tabla 12*Modelos de implementación de drones*

Modelo	Descripción	Costos Principales	Ventajas	Limitaciones
Drone convencional (OD: One-to-One)	Cada dron lleva un paquete por vuelo. Vuelve al centro tras cada entrega.	- Costo por viaje elevado - Más drones requeridos	- Alta flexibilidad - Simplicidad operacional	- Limitada eficiencia - Alto costo operativo por unidad entregada
Drone múltiple (MD: One-to-Many)	Cada dron entrega múltiples paquetes antes de regresar.	- Costos más bajos por paquete - Requiere mayor energía de batería	- Menor flota necesaria - Reducción de costos de operación	- Requiere baterías de alta capacidad - Planificación de rutas complejas
Drone + Camión (DT: Drone-Truck)	El camión actúa como base móvil; drones realizan entregas locales mientras el camión sigue en ruta.	- Costo compartido entre camión y drones - Costo de sincronización	- Reducción de tiempos de entrega - Ahorro en costos en zonas suburbanas	- Coordinación compleja - Requiere inversión en camiones adaptados
Hub-and-Spoke con drones	Uso de drones para recogida y entrega de última milla desde hubs, camiones hacen transbordos entre hubs.	- Costo de establecimiento de hubs - Costos operativos de drones	- Alta eficiencia urbana - Optimización logística	- Alto costo inicial - Dependencia de infraestructura establecida
Sistema urbano de entrega directa (caso Milan)	Drones operan directamente desde centros logísticos urbanos pequeños. Enfocado en paquetes livianos.	- Costo de drones - Costos regulatorios	- Bajo impacto ambiental - Agilidad en zonas urbanas	- Limitado a distancias y pesos bajos - Barreras regulatorias y climáticas

Nota. Adaptado de "The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy" por Borghetti et al 2022; "Drone-Based Instant Delivery Hub-and-Spoke Network Optimization" por Hu et al 2024; "A comparison of optimized deliveries by drone and truck" Choi, Y., & Schonfeld, P. M. 2021.

En síntesis, la elección del modelo óptimo debe considerar un equilibrio entre costos de operación, capacidad técnica de los drones, infraestructura disponible y contexto regulatorio, así como las expectativas de los consumidores en términos de velocidad, costo y sostenibilidad ambiental.

Capítulo VI. Conclusiones y Trabajo Futuro

Conclusiones

El análisis bibliométrico permitió identificar una evolución significativa en la investigación global sobre el uso de drones en la entrega de última milla entre 2019 y 2024, con un total de 2.789 documentos, evidenciando un crecimiento sostenido en el interés académico y tecnológico en esta área, con un aumento en las publicaciones anuales cercano al 48%, donde el 64,5% de las publicaciones fueron artículos científicos y el 21% ponencias en conferencias, destacándose revistas como Sustainability Switzerland y Drones. Las publicaciones (26) de Yuen, K.F. centradas en la aceptación tecnológica de soluciones como los ADR (robots autónomos de entrega), resaltan su aporte dentro de más de 100 investigadores que trabajan en este campo. China encabeza la producción científica destacándose la Nanyang Technological University con 48 publicaciones, seguida por Estados Unidos y Reino Unido. Con esto se demuestra que el uso de drones en la última milla se ha convertido en un campo emergente y multidisciplinar de alto impacto, enfocado en la sostenibilidad logística y una creciente exploración de aplicaciones prácticas en entornos urbanos.

El diagnóstico realizado permitió establecer que, aunque el uso de drones en la logística de última milla ha crecido globalmente —con una proyección de mercado de USD 213 mil millones para 2032 y una tasa de crecimiento anual del 31.1%— en Colombia su adopción aún es incipiente. A pesar de experiencias piloto exitosas lideradas por empresas como Orkid y Black Square, el 85.71% de las empresas encuestadas no tiene planes actuales de implementar drones, lo que refleja una baja madurez del mercado.

En Colombia, a los líderes logísticos les preocupa principalmente la seguridad y privacidad (68.6%), además de los ataques a las comunicaciones (65.7%) y vulnerabilidades informáticas (60%). En el plano normativo, el 80% de los encuestados percibe que las restricciones del espacio aéreo y los requerimientos legales, como los establecidos en la RAC

100, representan barreras críticas para la operación de drones en entornos urbanos. Para la parte técnica, consideran como factores restrictivos la limitada capacidad de carga (65.7%), la falta de infraestructura (64.3%) y la baja autonomía de vuelo (48.6%), sin embargo, proponen que tecnologías como GPS autónomo (87.1%), sensores de evitación de obstáculos (67.1%) y baterías de larga duración (72.9%) pueden ayudar a superarlos. En términos económicos, aunque la inversión inicial (41.4%) es percibida como el principal desafío, el 81.4% de los encuestados considera que la inversión es beneficiosa en relación con los ahorros operacionales. Por otra parte, el temor a accidentes (47.1%) y la falta de confianza (34.3%) se considera los principales factores psicológicos con respecto a la percepción y aceptación pública. A pesar de estos retos, el 45.71% de los líderes logísticos prevé una tendencia creciente en la adopción de drones en los próximos cinco años, resaltando beneficios como la reducción de emisiones de CO₂ (90%) y una mayor eficiencia operativa, hecho demostrado también mediante una prueba estadística que confirmó la existencia de una relación significativa entre el uso de drones y la percepción de mejora en la eficiencia logística y la satisfacción del cliente. Todo lo anterior demuestra que Colombia cuenta con condiciones potenciales para el desarrollo de la logística con drones, pero requiere avances sustanciales en regulación, tecnología, infraestructura y confianza social para lograr una implementación efectiva y sostenible en áreas urbanas.

La propuesta elaborada responde integralmente a las barreras identificadas en el diagnóstico previo, integrando soluciones normativas, tecnológicas, ambientales, sociales y económicas para fomentar una adopción escalable, segura y sostenible de drones en las entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia. Los resultados del análisis financiero de la propuesta piloto de implementación demuestran su viabilidad técnica y económica y refuerzan su integralidad como solución para transformar la logística urbana en Colombia, incorporando innovación, sostenibilidad y generación de valor económico y social.

Las siguientes acciones pueden facilitar la implementación de drones en entregas de última milla: en lo normativo, establecer un sistema progresivo de licencias y monitorear pólizas adaptativas; aplicar blockchain, optimización, inteligencia artificial y sensores avanzados para mejorar la eficiencia de las operaciones mediante transferencia de tecnología; con un enfoque sostenible, también se propone el uso de tecnologías limpias como baterías de energía renovable, vehículos eléctricos terrestres y gestión de residuos tecnológicos, alineados con las metas ambientales del país; por último, la propuesta integra un enfoque social que busca trabajar en procesos de aceptación pública mediante estrategias de comunicación y divulgación, talleres participativos y medidas para reducir el ruido, y también, generar un impulso a las economías locales mediante el desarrollo de startups tecnológicas y el apoyo a la logística de las pymes.

Trabajo Futuro

A partir de los hallazgos obtenidos, se sugieren las siguientes líneas de trabajo para investigaciones futuras:

Implementación de pilotos reales en ciudades con alto volumen de entregas y condiciones urbanas desafiantes (como Bogotá, Medellín o Cali), que permitan evaluar la efectividad operativa, el impacto ambiental y la aceptación ciudadana.

Desarrollo de estudios comparativos regionales, con países de América Latina que ya han iniciado pilotos (Brasil, México, Chile), para identificar buenas prácticas y lecciones aprendidas aplicables al caso colombiano.

Profundización en el análisis económico-financiero de las operaciones con drones, incluyendo simulaciones de retorno sobre la inversión, análisis de costos operativos en distintas escalas y estrategias de monetización del servicio.

Estudios sobre percepción ciudadana, aplicando metodologías cualitativas y cuantitativas para comprender a fondo los factores que influyen en la aceptación del uso de drones en contextos urbanos, y cómo diseñar políticas públicas que fomenten la confianza.

Desarrollo de marcos regulatorios adaptativos, que equilibren seguridad con innovación, incluyendo mecanismos de certificación, zonas habilitadas para pruebas, y esquemas de incentivos para empresas que implementen tecnologías limpias en logística.

Trabajo de investigación

Con el objetivo de dar continuidad a esta investigación y la divulgación de sus resultados, se presenta para estudio y posterior publicación, un artículo ante la revista DYNA de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, catalogada en el Publindex de MinCiencias en Categoría C.

Referencias

Aeronáutica Civil. (2023). *Visor geográfico UAS* [Mapa].

<https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html>

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). (s.f.). *Drones*. <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones>

Agresti, A. (2018). *Statistical methods for the social sciences* (5.^a ed.). Pearson.

<https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/statistical-methods-for-the-social-sciences/P200000006062/9780137546060?srsId=AfmBOor8fBjvA9JLqKnmc8G5KkhfYeNNgOQTKPpTjwlcQIG0kMx-DAS>

Aized, T., & Srail, J. (2014). Hierarchical modelling of last mile logistic distribution system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1053-1061.

<https://doi.org/10.1007/S00170-013-5349-3>

Alrayes, F. S., Alotaibi, S. S., Alissa, K. A., Maashi, M. S., Alhogail, A., Alotaibi, N., Mohsen, H., & Motwakel, A. (2022). Artificial intelligence-based secure communication and classification for drone-enabled emergency monitoring systems. *Drones*, 6(9), 222.

<https://doi.org/10.3390/drones6090222>

Amazon Staff. (2022, agosto 16). *How Amazon is building its drone delivery system*.

<https://www.aboutamazon.com/news/transportation/how-amazon-is-building-its-drone-delivery-system>

Ameso, E. A. (2024). Digital entanglements: Medical drones in African healthcare systems.

Global Public Health, 19(1). <https://doi.org/10.1080/17441692.2024.2405987>

Andersson, F. (2021). *Drones in humanitarian logistics: Benefits for the last mile context* [Tesis de grado, Metropolia Ammattikorkeakoulu]. Theseus. [https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-](https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021061115825)

[2021061115825](https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021061115825)

- Aurambout, J., Gkoumas, K., & Ciuffo, B. (2019). Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11, 1-21. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2>.
- Avila-Herrera, C. (2017). Drones vs. Aeronáutica Civil licencias para pilotos y su procedimiento. *Novum Jus: Revista Especializada en Sociología Jurídica y Política*, 11(2), 135-165. <http://hdl.handle.net/10983/16366>
- Babazade, A., & Gurtov, A. (2022). Registration of drones through blockchains. *Azerbaijan Journal of High Performance Computing*. 5(2), 318-325 <https://doi.org/10.32010/26166127.2022.5.2.318.325>
- Ballare, S. (2020). *Investigation in crowdshipping enabled urban and last-mile delivery paradigms* [Tesis doctoral, University of Illinois at Chicago]. INDIGO. https://indigo.uic.edu/articles/thesis/Investigation_in_Crowdshipping_Enabled_Urban_and_Last-mile_Delivery_Paradigms/13475112
- Bandeira, R., Goes, G., Gonçalves, D., D'agosto, M. & Oliveira, C. (2019). Electric vehicles in the last mile of urban freight transportation: A sustainability assessment of postal deliveries in Rio de Janeiro-Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 67, 491-502 <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.12.017>
- Bansode, U. M., Kulkarni, P., Kedar, Y., Saravde, O., & Nikam, K. (2023). Automated Drone Delivery System. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*. 11. 1430 – 1434. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56559>
- Behnke, M. (2019). Recent trends in last mile delivery: Impacts of fast fulfillment, parcel lockers, electric or autonomous vehicles, and more. In *Logistics Management: Strategies and Instruments for digitalizing and decarbonizing supply chains-Proceedings of the German Academic Association for Business Research*. (pp. 141-156). https://doi.org/10.1007/978-3-030-29821-0_10

- Behroozi, M., & Ma, D. (2023). Last mile delivery with drones and sharing economy. *ArXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.16408>
- Benarbia, T., & Kyamakya, K. (2021). A Literature Review of Drone-Based Package Delivery Logistics Systems and Their Implementation Feasibility. *Sustainability*, *14*(1), 360
<https://doi.org/10.3390/su14010360>
- Bermúdez Hernández, E. Y., & Sarmiento Saavedra, O. E. (2020). Análisis de los indicadores de satisfacción de la empresa Tu envío fácil S.A.S. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales Y Humanas*, *11*(2), 85-95.
<https://investigiumire.unicesmag.edu.co/index.php/ire/article/view/332/383>
- Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R., Barabino, B. (2022). The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy. *Sustainability*, *14*, 1766. <https://doi.org/10.3390/su14031766>
- Bosona, T. (2020). Urban Freight Last Mile Logistics—Challenges and Opportunities to Improve Sustainability: A Literature Review. *Sustainability*, *12*, 8769.
<https://doi.org/10.3390/su12218769>
- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2020). Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, *43*, 1-58.
<https://doi.org/10.1007/S00291-020-00607-8>
- Breuer, J., Samsun, R. C., Stolten, D., & Peters, R. (2021). How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. *Environment International*, *152*, 106474.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106474>
- Budinger, M., Reysset, A., Ochotorena, A., & Delbecq, S. (2020). Scaling laws and similarity models for the preliminary design of multirotor drones. *Aerospace Science and Technology*. *98*. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105658>

- Caballero-Martin, D., López-Guede, J. M., Estévez, J., & Graña, M. (2024). Artificial Intelligence Applied to Drone Control: A State of the Art. *Drones*, 8(7), 296; <https://doi.org/10.3390/drones8070296>
- Cai, L., Yuen, K. F., Fang, M., & Wang, X. (2023). A literature review on the impact of the COVID-19 pandemic on consumer behaviour: implications for consumer-centric logistics. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 35(11), 2682-2703. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1108/APJML-08-2022-0731>
- Castillo, J.C., Goicochea, E., Chong, M. & Rodriguez, M. (2019), "Inmegacity characterization: trends and realities", *Management Research*, 17 (2),187-204. <https://doi.org/10.1108/MRJIAM-05-2018-0835>
- Choi, Y., & Schonfeld, P. M. (2021). A comparison of optimized deliveries by drone and truck. *Transportation Planning and Technology*, 44(3), 319–336. <https://doi.org/10.1080/03081060.2021.1883230>
- Coïc, C., Budinger, M., & Delbecq, S. (2023). Multirotor drone sizing and trajectory optimization within Modelon Impact. Linköping Electronic Conference Proceedings. <https://doi.org/10.3384/ecp2118656>
- Comi, A., & Savchenko, L. (2021). Last-mile delivering: Analysis of environment-friendly transport. *Sustainable Cities and Society*, 74. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103213>
- Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2014). Nonparametric statistics: A step-by-step approach (2nd ed.). Wiley.
- Demir, E., Syntetos, A., & Woensel, T. (2022). Last mile logistics: Research trends and needs. *IMA Journal of Management Mathematics*. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpac006>
- Dhelia, M., Chaughule, S., Choraria, A., Hariharan, A., & Pai, M. M. (2022). Protall: An intelligent, multi-sensor, comprehensive obstacle avoidance system for automobiles and

UAVs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2161, 012056.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2161/1/012056>

DHL Freight (2024). Future of Freight: The Use of Drones in Logistics. FREIGHT CONNECTIONS. <https://dhl-freight-connections.com/en/solutions/future-of-freight-the-use-of-drones-in-logistics/>

Elsight. (2023). Orkid signed an LOI to provide eVTOL drones integrated with Elsieht's BVLOS multi-link connectivity platform to Flyzz, enabling expansion of their drone deliveries across Mexico. Elsieht. Recuperado el 6 de marzo de 2025, de <https://www.elsight.com/blog/orkid-signed-an-loi-to-provide-evtol-drones-integrated-with-elsights-bvlos-multi-link-connectivity-platform-to-flyzz-enabling-expansion-of-their-drone-deliveries-across-mexico/>

Engesser, V., Rombaut, E., Vanhaverbeke, L., & Lebeau, P. (2023). Autonomous Delivery Solutions for Last-Mile Logistics Operations: A Literature Review and Research Agenda. *Sustainability*. 15(3), 2774. <https://doi.org/10.3390/su15032774>.

Escudero, A., Muñuzuri, J., Lorenzo-Espejo, A., & Muñoz-Díaz, M. (2022). Improving E-Commerce Distribution through Last-Mile Logistics with Multiple Possibilities of Deliveries Based on Time and Location. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 17, 507-521. <https://doi.org/10.3390/jtaer17020027>

Eskandaripour, H., & Boldsai Khan, E. (2023). Last-Mile Drone Delivery: Past, Present, and Future. *Drones*. 7(2), 77. <https://doi.org/10.3390/drones7020077>.

EuroNews. (agosto 23 de 2024). Una empresa británica de logística prueba el reparto de sangre con drones entre dos hospitales. EuroNews. <https://es.euronews.com/my-europe/2024/08/23/una-empresa-britanica-de-logistica-prueba-el-reparto-de-sangre-con-drones-entre-dos-hospit>

European Union Aviation Safety Agency [EASA]. (s.f.). Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and 2019/945).

<https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulation-eu>

Federal Aviation Administration (FAA). (s.f.). Certificated Remote Pilots including Commercial Operators. U.S. Department of Transportation.

https://www.faa.gov/uas/commercial_operators

Fehling, C., & Saraceni, A. (2023). Technical and legal critical success factors: Feasibility of drones & AGV in the last-mile-delivery. *Research in Transportation Business & Management*, 50, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101029>

Forbes. (2020, 16 de abril). Rappi inicia sus primeras entregas con robots en Medellín.

<https://forbes.co/2020/04/16/tecnologia/rappi-inicia-sus-primeras-entregas-con-robots>

Forbes. (2021, 24 de julio). Colombia tiene su primera flota de drones para entregar paquetes.

<https://forbes.co/2021/07/24/empresas/entrega-de-paquetes-con-drones-en-colombia/>

Fortune Business Insights (2025). Drone Services Market Size, Share, Russia-Ukraine War Impact Analysis, By Service Type (Drone Platform Services, Drone MRO Services, and Drone Training & Simulation Services), By Application (Aerial Photography, Product Delivery, Surveillance & Inspection, Data Acquisition & Analytics, and Others), By End-use Industry (Agriculture, Infrastructure, Oil & Gas, Logistics, and Others), and Regional Forecast, 2025-2032. <https://www.fortunebusinessinsights.com/drone-services-market-102682>

Fuest, B. (2021, 8 agosto). Deutsche Post DHL stellt die Entwicklung der Drohne „Paketkopter“

ein. *DIE WELT*. [https://www.welt.de/wirtschaft/article232996761/Deutsche-Post-DHL-](https://www.welt.de/wirtschaft/article232996761/Deutsche-Post-DHL-stellt-die-Entwicklung-der-Drohne-Paketkopter-)

[stellt-die-Entwicklung-der-Drohne-Paketkopter-](https://www.welt.de/wirtschaft/article232996761/Deutsche-Post-DHL-stellt-die-Entwicklung-der-Drohne-Paketkopter-ein.html?icid=search.product.onsitesearch)

ein.html?icid=search.product.onsitesearch

Garces, E., Tomei, J., Franco, C., & Dyner, I. (2021). Lessons from last mile electrification in

Colombia: Examining the policy framework and outcomes for sustainability. *Energy research and social science*, 79, 102156. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102156>.

- Garcés, L., Benjumea, M., Cardona, S., Valencia, A., Patiño, C., Padierna, O., & Garay, R. (2022). Análisis bibliométrico en adopción de logística de entrega de mercancías mediante el uso de drones. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação. RISTI*, 50, 386-397.
<https://www.proquest.com/openview/802b5239fe1d162785aba0e573512898/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Ganjipour, H., & Edrisi, A. (2022). Applying the integrated model to understanding online buyers' intention to adopt delivery drones in Iran. *Transportation Letters*, 15(2), 98–110.
<https://doi.org/10.1080/19427867.2022.2035130>
- Gutierrez-Franco, E., Mejia-Argueta, C., & Rabelo, L. (2021). Data-driven methodology to support long-lasting logistics and decision making for urban last-mile operations. *Sustainability*, 13(11), 6230. <https://doi.org/10.3390/su13116230>
- Gutiérrez Sandoval, C. D., Takemoto Silva, T. A., Venegas Minchola, B. A., Vidondo Chafloc, G. & Villanueva Ramos, J. R. (2024). Análisis de Factores Críticos de Éxito para la Implementación de Drones en el Sector Logístico: *Revisión Sistemática. Gestión De Operaciones Industriales*, 3(1), 48-63.
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/RINGIND/article/view/6044>
- Halldórsson, Á. & Wehner, J. (2020). Cumplimiento logístico de última milla: un marco para la eficiencia energética. *Investigación en gestión y negocios del transporte*, 37.
<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100481>
- Han, T., Ribeiro, I. D. L., Magaia, N., Preto, J., Segundo, A. H. F. N., De Macedo, A. R. L., Muhammad, K., & De Albuquerque, V. H. C. (2021). Emerging Drone Trends for Blockchain-Based 5G Networks: Open Issues and Future Perspectives. *IEEE Network*, 35(1), 38-43. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000151>

- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza Torres, C. P. (2023). Metodología de la Investigación. McGraw-Hill Interamericana. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/?il=31455>
- Hu, Z.-H., Huang, Y.-L., Li, Y.-N., & Bao, X.-Q. (2024). Drone-Based Instant Delivery Hub-and-Spoke Network Optimization. *Drones*, 8(6), 247. <https://doi.org/10.3390/drones8060247>
- International Renewable Energy Agency [IRENA]. (2022). Renewable power generation costs in 2021. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>
- Jalali, S., & C. Wohlin (2012). "Systematic Literature Studies: Database Searches Vs. backward Snowballing." International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, 29–38. <https://doi.org/10.1145/2372251.2372257>
- Jaller, M., Otero-Palencia, C., & Pahwa, A. (2020). Automation, electrification, and shared mobility in urban freight: opportunities and challenges. *Transportation research procedia*, 46, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.158>.
- Jazairy, A., Persson, E., Brho, M., von Haartman, R. & Hilletoft, P. (2024). Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective, *The International Journal of Logistics Management*. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2023-0149>
- Jenitta J, Naik, N. S., & Harish, C. (2022). Design and Development of Autonomous Delivery Drone. *Advances in Intelligent Systems and Technologies*. 057-060. 10.53759/aist/978-9914-9946-1-2_11
- José, R., Antonio, P., & Astrid, S. (2020). Evaluation of the feasibility of implementing 4.0 industry technologies in the Last Mile processes case: Logistic Operators of the Department of Atlántico. 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 1-8. <https://doi.org/10.23919/CISTI49556.2020.9140936>.

- Koh, L. Y., Xia, Z., & Yuen, K. F. (2024). Consumer acceptance of the autonomous robot in last-mile delivery: A combined perspective of resource-matching, perceived risk and value theories. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 182, 104008. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104008>
- Koshta, N., Devi, Y., & Chauhan, C. (2024). Evaluating barriers to the adoption of delivery drones in rural healthcare supply chains: Preparing the healthcare system for the future. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 13096–13108. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3210121>
- Kosovac, A., Sabic, M., Muharemović, E., & Šimić, E. (2022). Shipment delivery challenges using unmanned aerial vehicles. *First International Conference on Advances in Traffic and Communication Technologies (ATCT 2022)*. 161-166 <https://doi.org/10.59478/atct.2022.22>
- Kumar, G., Tanvir, O., Kumar, A., & Goswami, M. (2024). Optimal drone deployment for cost-effective and sustainable last-mile delivery operations. *International Transactions in Operational Research*.0, 1-37 <https://doi.org/10.1111/itor.13527>
- La República. (2021, 23 de julio). Los drones autónomos con capacidad de carga llegan al país con el lanzamiento de Orkid. <https://www.larepublica.co/empresas/los-drones-autonomos-con-capacidad-de-carga-llegan-al-pais-con-el-lanzamiento-de-orkid-3205833>
- La República. (2024, 9 de septiembre). El director de Mercado Libre busca integrar drones en sus entregas e impulsar la IA. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/el-director-de-mercado-libre-busca-integrar-drones-en-sus-entregas-e-impulsar-la-ia-3948284>
- Lemardelé, C., Estrada, M., Pagès, L., & Bachofner, M. (2021). Potentialities of drones and ground autonomous delivery devices for last-mile logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102325>

Leon, S., Chen, C., & Ratcliffe, A. (2021). Consumers' perceptions of last mile drone delivery.

International Journal of Logistics Research and Applications, 26(3), 345–364.

<https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1957803>

Levine, D. M., Stephan, D. F., Szabat, K. A., & Berenson, M. L. (2016). *Statistics for managers using Microsoft Excel* (8th ed.). Pearson.

Li, X., Gong, L., Liu, X., Jiang, F., Shi, W., Fan, L., Gao, H., & Xu, J. (2020). Solving the last mile problem in logistics: A mobile edge computing and blockchain-based unmanned aerial vehicle delivery system. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34. <https://doi.org/10.1002/cpe.6068>

Lyons, T., & McDonald, N. C. (2022). Last-Mile Strategies for Urban Freight Delivery: A Systematic Review. *Transportation Research Record*, 2677(1), 1141-1156. <https://doi.org/10.1177/03611981221103596>

Madani, B., & Ndiaye, M. (2023). Drone delivery systems for logistics operations: Identification of regulatory challenges.. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC58018.2023.10332420>

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>

McNabb, M. (2022, marzo 21). Delivery Startup ORKID and Unifyly partner to test drone operations in Colombia. DroneLife. <https://dronelife.com/2022/03/21/delivery-startup-orkid-and-unifyly-partner-to-test-drone-operations-in-colombia/>

Mesa, J. (2020, mayo 20). Propuesta para el fortalecimiento de la regulación colombiana para la operación civil de los drones en el país [Ensayo]. <http://hdl.handle.net/10654/36437>

MinTIC. (2021). Estudio sobre logística última milla. Recuperado el 26 de abril de 2025, de https://observatorioecommerce.mintic.gov.co/797/articles-198595_recurso_1.pdf

Min, H. (2023). Leveraging Drone Technology for Last-Mile Deliveries in the e-Tailing Ecosystem. *Sustainability*. 2023, 15, 11588. <https://doi.org/10.3390/su151511588>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2023). Guía técnica colombiana para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/03/Guia-tecnica-para-la-gestion-integral-de-los-RAEE-2023-1.pdf>

Moore, D. S., McCabe, G. P., & Craig, B. A. (2017). Introduction to the practice of statistics (9th ed.). W.H. Freeman and Company.

Moshref-Javadi, M. & Winkenbach, M. (2021). Applications and Research avenues for drone-based models in logistics: A classification and review. *Expert Systems with Applications*, 177, 114854, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114854>.

Moya Aero. (s.f.). Drones de carga. <https://moyaaero.com/>

Mundo Logística. (2024, marzo 4). Moya Aero realiza primeiro voo com eVTOL. Mundo Logística. <https://mundologistica.com.br/noticias/moya-aero-realiza-primeiro-voo-com-evtol>

Muñoz, G., Barrado, C., Çetin, E., & Salami, E. (2019). Deep reinforcement learning for drone delivery. *Drones*, 3(3), 72. <https://doi.org/10.3390/drones3030072>

Muñoz-Villamizar, A., Solano-Charris, E., Reyes-Rubiano, L., & Faulin, J. (2021). Measuring Disruptions in Last-Mile Delivery Operations. *Logistics*. 2021, 5, 17. <https://doi.org/10.3390/LOGISTICS5010017>

Na, H., & Chang, Y. S. (2024). Study on the Policies, Regulations of Drone-Based Logistics. 2024 2nd International Conference on Cyber Resilience (ICCR), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCR61006.2024.10533097>

Nasution, T., Andayani, U., Syahputra, K. A., & Fahriza, M. A. (2020). Design of fixed-wing unmanned aircraft for monitoring. 2020 4rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM). pp. 229-232 <https://doi.org/10.1109/ELTICOM50775.2020.9230525>

- Nataraj, S., Ferone, D., Quintero-Araujo, C., Juan, A., & Festa, P. (2019). Consolidation centers in city logistics: A cooperative approach based on the location routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 10(3), 393-404. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.1.001
- Nguyen, C. T., Yuen, K. F., Kim, T. Y., & Wang, X. (2023). An empirical research on the determinants of driver-partners' participative behaviour in crowd logistics: from a motivation theory perspective. *The International Journal of Logistics Management*, 35(2), 601-622. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1108/IJLM-12-2022-0496>
- Niu, B., Zhang, J., & Xie, F. (2024). Drone logistics' resilient development: impacts of consumer choice, competition, and regulation. *Transportation Research. Part A, Policy and Practice*, 185(104126), 104126. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104126>
- Orjuela-Castro, J., Orejuela-Cabrera, J., & Adarme-Jaimes, W. (2019). Last mile logistics in mega-cities for perishable fruits. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(2), 318-327. <https://doi.org/10.3926/JIEM.2770>.
- Orkid. (s.f.). Sobre nosotros. Orkid Tech. Recuperado el 6 de marzo de 2025, de <https://orkid.tech/about-us/>
- Orozco, J. (2019). Analysis of Energy Efficiency in Truck-Drone "Last Mile" Delivery Systems. (Master's thesis, Purdue University) <https://www.proquest.com/openview/07e161dd7fbb74a8d014a3544513b592/1?cbl=18750&diss=y&pq-origsite=gscholar>
- Oršić, J., Jereb, B., & Obrecht, M. (2022). Sustainable Operations of Last Mile Logistics Based on Machine Learning Processes. *Processes*. 10, 2524. <https://doi.org/10.3390/pr10122524>.
- Pacheco, D. A. D. J., Sarker, S., Bilal, M., Chamola, V., & Garza-Reyes, J. A. (2024). Opportunities and challenges of drones and internet of drones in healthcare supply

- chains under disruption. *Production Planning & Control*, 1-23.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2437041>
- Paddeu, D., & Parkhurst, G. (2020). The potential for automation to transform urban deliveries: Drivers, barriers and policy priorities. In *Advances in transport policy and planning*. 5, 291-314) <https://doi.org/10.1016/bs.atpp.2020.01.003>
- Parameswarath, R. P., & Sikdar, B. (2023, December). Privacy-Preserving Mutual Authentication Protocol for Drone Delivery Services. In *GLOBECOM 2023-2023 IEEE Global Communications Conference*. 2166-2171.
10.1109/GLOBECOM54140.2023.10436751
- ParaZero Technologies Ltd. (2023, agosto 17). ParaZero signs new development agreement with Latin American drone manufacturer black square. ParaZero Technologies Ltd. <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/08/17/2727260/0/en/ParaZero-Signs-New-Development-Agreement-with-Latin-American-Drone-Manufacturer-Black-Square.html>
- Patella, S. M., Grazieschi, G., Gatta, V., Marcucci, E., & Carrese, S. (2020). The adoption of green vehicles in last mile logistics: A systematic review. *Sustainability*, 13(1), 6.
<https://doi.org/10.3390/su13010006>
- Patro, R. K., Chandra, S., & Patro, J. P. (2024). Drone Integration in Last-Mile Delivery Operations. *International Journal of Supply Chain and Logistics*, 8(2), 109–122.
<https://doi.org/10.47941/ijscsl.2286>
- Petrovic, O., Harnisch, M., & Puchleitner, T. (2013). Opportunities of mobile communication systems for applications in last-mile logistics. *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport*, 354-359.
<https://doi.org/10.1109/ICADLT.2013.6568484>.

- Pina-Pardo, J. C., Silva, D. F., Smith, A. E., & Gatica, R. A. (2024). Fleet resupply by drones for last-mile delivery. *European Journal of Operational Research*, 316(1), 168–182.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.01.045>
- PricewaterhouseCoopers (2016). Clarity from above PwC global report on the comercial applications of drone technology. <https://www.pwc.pl/pl/pdf/clarity-from-above-pwc.pdf>
- Primicias. (2020, 9 de octubre). Rappi prueba entregas con drones en Quito.
<https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/rappy-entregas-drone-quito-puembo>
- Puente-Mejia, B., Palacios-Argüello, L., Suárez-Núñez, C., & González-Feliu, J. (2018). Freight trip generation modeling and data collection processes in Latin American cities. Modeling framework for Quito and generalization issues. *Transportation Research Part A-policy and Practice*, 132, 226-241. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2019.10.013>.
- Purdon, K., van Niekerk, T., Phillips, R. & Marais, S. (2023). 3D mapping and photogrammetry sensor payload for unmanned aerial vehicles. *MATEC Web of Conferences*, 388(04013), 16. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202338804013>
- Qin, G., Tao, F., & Li, L. (2019). A Vehicle Routing Optimization Problem for Cold Chain Logistics Considering Customer Satisfaction and Carbon Emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(4), 576.
<https://doi.org/10.3390/ijerph16040576>
- Qian, L., Graham, S., & Liu, H. (2020). Guidance and Control Law Design for a Slung Payload in Autonomous Landing: A Drone Delivery Case Study. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25, 1773-1782. <https://doi.org/10.1109/tmech.2020.2998718>
- Rappi Merchants. (2023). La influencia de la IA en la entrega de alimentos a domicilio.
<https://merchants.rappi.com/es-mx/influencia-ia-entrega-alimentos-domicilio>
- Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S., & Treiblmaier, H. (2021). Humanitarian drones: A review and research agenda. *Internet of Things*, 16, 100434.
<https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100434>

- Sadra Rajabi, M., Beigi, P., & Aghakhani, S. (2022). Drone Delivery Systems and Energy Management: A Review and Future Trends. arXiv e-prints, 2206.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.10765>
- Sah, B., Gupta, R., & Bani-Hani, D. (2021). Analysis of barriers to implement drone logistics. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(6), 531-550.
<https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1782862>
- Sandvik, K. B., & Martins, B. O. (2018). Revisitando el espacio aéreo latinoamericano: una exploración de los drones como sujetos de regulación. *Latin American Law Review*, (1), 61-81. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/lar/article/view/4661/4171>
- Schermer, D., Moeini, M., & Wendt, O. (2018). A variable neighborhood search algorithm for solving the vehicle routing problem with drones. Technical Report. 2.
https://www.researchgate.net/publication/326478770_A_Variable_Neighborhood_Search_Algorithm_for_Solving_the_Vehicle_Routing_Problem_with_Drones
- Scopus. (2024). Analyze search results. <https://www-scopus-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=18a6b610c8ce5133663c5a54995809f6&sot=a&sdt=a&sl=79&s=ALL%28drone+AND+last+AND+mile+AND+delivery%29+AND+PUBYEAR+%3e+2018+AND+PUBYEAR+%3c+2025&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>
- Serna Zapata, L.F. (2020). Registro y control de aeronaves no tripuladas en Colombia en el marco de la seguridad ciudadana [Tesis de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG.
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstreams/2e2b0404-092f-4844-8b5f-1e38c324d6b5/download>
- Shyamsunder, C., Gowda, D., Soni, H., Mohanrao, M., Palanikkumar, D., & Abdullah, I. (2024). Optimizing last-mile logistics with machine learning and drone technology in aerial

- solutions. In 2024 2nd World Conference on Communication & Computing (WCONF) (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCONF61366.2024.10692008>
- Siegfried, P., & Zhang, J. (2021). Developing a sustainable concept for urban last-mile delivery. *Open Journal of Business and Management*. 9 (1). 268-287
<https://doi.org/10.4236/OJBM.2021.91015>
- Sonkar, S., Kumar, P., Tanjore Puli, Y., George, R., Philip, D., & Ghosh, A. K. (2023). Design & Implementation of an Electric Fixed-wing Hybrid VTOL UAV for Asset Monitoring. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 15, 082, 16 p
<https://jatm.com.br/jatm/article/view/1297/970>
- Sorooshian, S., Sharifabad, S., Parsaee, M., & Afshari, A. (2022). Toward a Modern Last-Mile Delivery: Consequences and Obstacles of Intelligent Technology. *Applied System Innovation*. 2022, 5, 82. <https://doi.org/10.3390/asi5040082>.
- Sun, G., Tian, Z., Liu, R., Jing, Y., & Ma, Y. (2020). Research on coordination and optimization of order allocation and delivery route planning in take-out system. *Mathematical Problems in Engineering*. 7248492, 16 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/7248492>
- Tadić, S., Krstić, M., & Radovanović, L. (2024). Assessing Strategies to Overcome Barriers for Drone Usage in Last-Mile Logistics: A Novel Hybrid Fuzzy MCDM Model. *Mathematics*. 12(3), 367; <https://doi.org/10.3390/math12030367>
- The Logistics World (2023). Viabilidad del uso de drones para la entrega de mercancías en Latinoamérica. <https://thelogisticsworld.com/logistica-comercio-electronico/viabilidad-del-uso-de-drones-para-la-entrega-de-mercancias-en-latinoamerica/>
- The Logistics World (2024) El Auge del comercio electrónico en Latinoamérica: Cómo la Logística de última Milla Está Transformando El Sector.
<https://thelogisticsworld.com/logistica-comercio-electronico/el-auge-del-comercio-electronico-en-latinoamerica-como-la-logistica-de-ultima-milla-esta-transformando-el-sector>

Tordecilla, R. D., Martins, L. D. C., Panadero, J., Copado, P. J., Perez-Bernabeu, E., & Juan, A.

A. (2021). Fuzzy simheuristics for optimizing transportation systems: Dealing with stochastic and fuzzy uncertainty. *Applied Sciences*, 11(17), 7950.

<https://doi.org/10.3390/app11177950>

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil). (2024). RAC 100 -

Reglamentación Operación de Sistemas de Aeronaves no Tripuladas UAS.

<https://www.aerocivil.gov.co/normatividad/RAC/RAC%20%20100%20%20-%20Reglamentaci%C3%B3n%20Operaci%C3%B3n%20de%20Sistemas%20de%20Aeronaves%20no%20Tripuladas%20UAS.p>

Unmanned Airspace. (2023). Certification moves Orkid closer to drone deliveries in Colombia.

Unmanned Airspace. Recuperado el 6 de marzo de 2025, de

<https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/certification-moves-orkid-closer-to-drone-deliveries-in-colombia/>

Vadduri, A., Benjwal, A., Pai, A., Quadros, E., Kammar, A., & Uday, P. (2023). Precise Payload

Delivery via Unmanned Aerial Vehicles: An Approach Using Object Detection

Algorithms. *ArXiv*, abs/2310.06329. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06329>

Ventas de Seguridad. (2023). Impacto de la tecnología de drones en la seguridad: perspectivas

y desafíos. [https://www.ventasdeseguridad.com/mas-a-fondo/analisis-](https://www.ventasdeseguridad.com/mas-a-fondo/analisis-tecnologico/23864-impacto-de-la-tecnologia-de-drones-en-la-seguridad-perspectivas-y-desafios.html)

[tecnologico/23864-impacto-de-la-tecnologia-de-drones-en-la-seguridad-perspectivas-y-desafios.html](https://www.ventasdeseguridad.com/mas-a-fondo/analisis-tecnologico/23864-impacto-de-la-tecnologia-de-drones-en-la-seguridad-perspectivas-y-desafios.html)

Vera-Amaro, R., Burke, M., & Saad, W. (2022). Coordinated UAVs for Effective Payload

Delivery. *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, 3718-

3723. <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001285>

Verri, F., Marcondes, C., Loubach, D., Sbruzzi, E., Marques, J. C., Júnior, L. P., & Máximo, M.

R. O. A. (2020). An analysis on tradable permit models for last-mile delivery drones.

IEEE Access, 8, 186279–186290. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030612>

- Wang, L., & Siddique, A. A. (2020). Facial recognition system using LBPH face recognizer for anti-theft and surveillance application based on drone technology. *Measurement and Control*, 53(1070), 1070-1077. <https://doi.org/10.1177/0020294020932344>
- Wingcopter. (s.f.). Wingcopter. <https://wingcopter.com/>
- Xu, J., Liu, X., Li, X., Zhang, L., Jin, J., & Yang, Y. (2021). Energy-aware computation management strategy for smart logistic system with MEC. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(11), 8544-8559. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3115346>
- World Population Review. Logistics Performance Index by Country 2025. World Population Review. <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/logistics-performance-index-by-country#title>.
- Wüest, V., Ajanic, E., Müller, M., & Floreano, D. (2022). Accurate vision-based flight with fixed-wing drones. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 12344-12351 <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981921>
- Yang, Y., Zang, Y., & Qi, M. (2021). Robust network design and last-mile delivery in cold chain logistics system. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. pp. 765-772
<https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672909>
- Yue, H., Medromi, H., Ding, H., & Bassir, D. (2021). A novel hybrid drone for multi-purpose aerial transportation and its conceptual optimization based on surrogate approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1972(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1972/1/012103>
- Yuen, K. F., Cai, L., Wee, S. C. K., & Wang, X. (2024). Pandemic-driven acceptance of urban drone deliveries. *Transport Policy*, 146, 356-370.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.12.007>
- Zepeda Cancino, R. M., & Vázquez García, V. (2021). Potencial social y ambiental de la industria eólica para una transición energética en América Latina. *Letras Verdes*.

Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales, (30), 66–85.

<https://doi.org/10.17141/letrasverdes.30.2021.4598>

Zipline International. (2021). *Zipline expands to new markets for COVID-19 deliveries*.

<https://www.flyzipline.com/covid-19-expansion>

Anexos

Anexo 1. Encuesta de estudio para el uso de drones en entregas de última milla en áreas urbanas de Colombia.

Anexo 2. Estimado de costos.