

# **XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial**

**Ingeniería Industrial y los desafíos del desarrollo**

## **Libro de ponencias**

### **Ejes temáticos del congreso:**

**Operaciones y logística**

**Gestión de las organizaciones,  
economía y toma de decisiones**

**Desarrollos tecnológicos industriales**

**Empresas de triple impacto**

**Educación en la ingeniería industrial**

**Trabajos de cátedras estudiantiles**

Mohamad, Jorge Alejandro

Libro de ponencias XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial: COINI 2025: ingeniería industrial y los desafíos del desarrollo / Jorge Alejandro Mohamad; Compilación de Jorge Alejandro Mohamad. –1ª ed.– Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Universidad Católica Argentina, 2026.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-44-0138-4

1. Ingeniería. 2. Ingeniería Industrial. 3. Congreso. I. Mohamad, Jorge Alejandro, comp. II. Título.

CDD 600



**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA**

A. M. de Justo 1400 • P.B., Contrafrente • (C1107AAZ)

0810-2200-822 Int.1177 • educa@uca.edu.ar

Av. Alicia Moreau de Justo 1400

Planta Baja - Contrafrente

Campus Papa Francisco - Buenos Aires, mayo 2026

ISBN: 978-950-44-0138-4

# ESTRATEGIAS DE SOLUCIONES LOGÍSTICAS DE ÚLTIMA MILLA PARA LA DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS FRESCOS FRUTIHORTÍCOLAS

Berardi, María Betina; Onaine, Adolfo

*Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.*  
[bberardi@fi.mdp.edu](mailto:bberardi@fi.mdp.edu); [aeonaine@fi.mdp.edu.ar](mailto:aeonaine@fi.mdp.edu.ar)

## RESUMEN

La logística de última milla, impulsada por el crecimiento del comercio electrónico y los cambios en los hábitos de consumo, se ha consolidado como un objetivo estratégico para las organizaciones. En este contexto, la distribución final de productos frutihortícolas representa un desafío particular, ya que exige rapidez en los envíos, control riguroso de variables como la temperatura y una gestión eficiente que garantice la conservación de la calidad. La revisión bibliográfica y tecnológica realizada permitió identificar las principales estrategias emergentes aplicables a este sector: vehículos autónomos y eléctricos que reducen costos y emisiones, *lockers* inteligentes que aseguran accesibilidad y disminuyen fallas de entrega, plataformas digitales de optimización de rutas que mejoran la eficiencia operativa, e IoT con sensores y *blockchain* para reforzar la trazabilidad y preservar la frescura. El análisis de estas herramientas, a través de indicadores de eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio, evidenció su potencial para transformar la distribución de productos frescos en entornos urbanos. Los resultados destacan que la integración de dichas tecnologías contribuye a reducir pérdidas, mejorar la experiencia del consumidor y avanzar hacia modelos logísticos más sostenibles. Este trabajo aporta lineamientos estratégicos que orientan a organizaciones y PyMEs hacia la innovación y la viabilidad técnica en la última milla frutihortícola.

**Palabras Claves:** última milla; logística; productos frutihortícolas, soluciones tecnológicas

## ABSTRACT

Last-mile logistics, driven by the growth of e-commerce and changing consumer habits, has established itself as a strategic objective for organizations. In this context, the final distribution of fruit and vegetable products represents a particular challenge, as it requires rapid shipments, rigorous control of variables such as temperature, and efficient management that guarantees quality. The literature and technology review identified the main emerging strategies applicable to this sector: autonomous and electric vehicles that reduce costs and emissions; smart lockers that ensure accessibility and reduce delivery errors; digital route optimization platforms that improve operational efficiency; and IoT with sensors and blockchain to strengthen traceability and preserve freshness. The analysis of these tools, through indicators of operational efficiency, environmental sustainability, and service quality, demonstrated their potential to transform the distribution of fresh produce in urban environments. The results highlight that the integration of these technologies contributes to reducing losses, improving the consumer experience, and moving toward more sustainable logistics models. This work provides strategic guidelines that guide organizations and SMEs toward innovation and technical viability in the last mile of fruit and vegetable production.

**Keywords:** last mile; logistics; fruit and vegetable products, technological solutions

## 1. INTRODUCCIÓN

El panorama comercial contemporáneo se ha visto profundamente transformado por el crecimiento exponencial del comercio electrónico y la evolución de los hábitos de consumo, que demandan entregas rápidas y personalizadas. (Frau, M. 2022) En este contexto dinámico, la logística de última milla emerge como un eje estratégico para las organizaciones, siendo el eslabón final y crítico en la cadena de suministro que conecta directamente el producto con el consumidor. Su eficiencia no solo impacta la satisfacción del cliente, sino también la rentabilidad y la sostenibilidad empresarial. (Dong, Y., et al., 2023). La digitalización del sector agroalimentario está estrechamente ligada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, facilitando procesos más eficientes y sostenibles en la cadena de suministro (Sridhar et al., 2023). El uso de Big Data e inteligencia artificial muestra un gran potencial para reducir pérdidas y optimizar procesos en cadenas de suministro alimentarias (Ahmed & Elgalb, 2024).

El desafío se acentúa en el sector frutihortícola, donde la naturaleza perecedera de los productos impone requisitos logísticos específicos y estrictos. (Asimiyu, Z.2024). A diferencia de otros bienes, las frutas y verduras frescas exhiben una alta variabilidad en precio y rendimiento, y su calidad se degrada rápidamente con el tiempo, lo que exige rapidez en los envíos, un control riguroso de la temperatura y una gestión eficiente para garantizar su conservación. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022).

La problemática se complejiza aún más en el entorno urbano, donde la distribución final se enfrenta a obstáculos inherentes como la congestión del tráfico, las restricciones horarias para el transporte y la imperativa necesidad de una trazabilidad completa que asegure la calidad y el origen del producto. Ante estas dificultades, se vuelve indispensable analizar estrategias emergentes y soluciones tecnológicas que permitan superar estos retos y optimizar la entrega de productos frutihortícolas. (Asimiyu, Z.2024). Estudios recientes destacan que la digitalización del transporte de productos perecederos puede apoyarse en gemelos digitales e IoT para anticipar riesgos y mejorar la eficiencia (Falayi et al., 2024). Además, las cadenas de frío en países en desarrollo requieren enfoques integrales que combinen infraestructura y digitalización para reducir pérdidas (Tokala & Mohammed, 2022).

En respuesta a esta necesidad, el objetivo general de este trabajo es examinar el impacto de soluciones tecnológicas aplicadas a la última milla en la distribución urbana de productos frutihortícolas. Para ello, se realizará una revisión bibliográfica y tecnológica con el fin de identificar y clasificar las principales tendencias disponibles, y establecer un marco conceptual que sustente el diseño de modelos logísticos innovadores.

## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los fundamentos conceptuales y antecedentes relevantes que permiten comprender los desafíos de la logística de última milla y las particularidades de la distribución de productos frutihortícolas en entornos urbanos.

### 2.1. Logística de última milla

La logística de última milla se define como el tramo final del proceso de entrega, donde los bienes son transportados desde un centro de distribución o un centro de operaciones centralizado directamente al consumidor final, ya sea en su domicilio o en un punto de recogida. Este segmento es crucial para la satisfacción del cliente y la eficiencia general de la cadena de suministro, aunque a menudo implica altos costos y una considerable complejidad. Históricamente, la entrega de última milla se caracterizaba por métodos tradicionales como el reparto a pie o en bicicleta, centrándose en rutas locales. Sin embargo, la llegada del comercio electrónico a finales de los años 90, impulsada por gigantes como Amazon, transformó drásticamente este panorama, exigiendo una adaptación rápida de los proveedores de logística para satisfacer las crecientes demandas de entregas más rápidas y fiables, incluyendo servicios en el mismo día o al día siguiente. La evolución ha sido marcada por la integración de sistemas de gestión de transporte, herramientas de gestión de flotas y software de optimización logística, que han permitido a las empresas agilizar sus operaciones y mejorar la eficiencia. (Gevaers, R., et al., 2011).

#### 2.1.1. Desafíos logísticos en entornos urbanos

La logística de última milla en entornos urbanos presenta desafíos significativos que impactan directamente la eficiencia y la rentabilidad. La eficiencia de costos es un obstáculo importante, ya que

este segmento representa una parte sustancial de los costos totales de envío, influenciado por factores como los precios del combustible, el mantenimiento de vehículos, los costos laborales y las entregas fallidas. La congestión del tráfico urbano afecta gravemente los tiempos de entrega y los costos operativos, provocando retrasos e ineficiencias en la planificación de rutas en áreas densamente pobladas. Además, la infraestructura deficiente puede complicar aún más las entregas al limitar el acceso a ciertos puntos. La gestión de paquetes pequeños o múltiples paradas dificulta el uso eficiente del espacio en los vehículos de reparto, lo que aumenta los costos y los tiempos de entrega. La seguridad de los paquetes y el riesgo de robo representan una amenaza significativa, lo que lleva a la insatisfacción del cliente y a costos operativos adicionales para las empresas que deben gestionar reemplazos o reembolsos. Finalmente, la necesidad de que el cliente esté presente para la recogida o entrega, especialmente en servicios a domicilio, añade complejidad a la planificación. (Gevaers, R. et al., 2011).

## **2.2. Cadena de suministro de productos frutihortícolas**

La gestión de la cadena de suministro de productos frutihortícolas es inherentemente compleja debido a su naturaleza perecedera y a la rápida degradación de la calidad con el tiempo. Estos productos exhiben altos niveles de variabilidad en precio y rendimiento, lo que los distingue de otros productos agroalimentarios con mayor vida útil. Un problema clave es la pérdida de calidad y valor a medida que pasa el tiempo, lo que requiere que los modelos de optimización consideren no solo la cantidad, sino también la degradación de la calidad y tiempos de transporte controlables. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022). La cadena de frío ininterrumpida es esencial para mantener la calidad y seguridad de los productos frescos durante la manipulación, el transporte y el almacenamiento, siendo crucial para el comercio global de perecederos. Las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de calidad y la reducción de la vida útil, un deterioro que a menudo no es visible hasta que es demasiado tarde para ajustar la logística. (Su, J. et al., 2014).

### **2.2.1 Requisitos de calidad y tiempos críticos**

Para los productos frutihortícolas, los requisitos de calidad son primordiales y están directamente vinculados a la frescura y la seguridad alimentaria. La gestión de la calidad del producto debe integrarse con la logística para garantizar el rendimiento de la cadena de suministro, incluyendo la prevención de la contaminación y la adulteración. (Ellahi, R. M. et al., 2024). La visibilidad en tiempo real de la información es fundamental para la toma de decisiones, ya que la falta de datos precisos sobre el mercado puede generar incertidumbre para los productores y contribuir al desperdicio de alimentos (Su, J. et al., 2014). La optimización del inventario es clave para reducir los costos de deterioro, lo que implica disminuir el exceso de existencias en minoristas y centros de distribución, suavizar los ciclos de pedido y aumentar la frecuencia de estos. La capacidad de respuesta rápida es esencial para adaptarse a los cambios en la demanda y la oferta, minimizando los tiempos de entrega y preservando la calidad. (Peinado-Guerrero, M. et al., 2022).

## **2.3. Tecnologías emergentes aplicadas a la última milla**

En el contexto de la logística moderna, la última milla se ha convertido en un eslabón crítico para garantizar entregas rápidas, seguras y sostenibles. La incorporación de tecnologías emergentes, como los vehículos autónomos y eléctricos, los *lockers* inteligentes, las plataformas digitales para la optimización de rutas y el uso de IoT con sensores para la trazabilidad, representa una transformación significativa en la manera en que las empresas gestionan sus operaciones, mejorando tanto la eficiencia como la experiencia del cliente.

### **2.3.1. Vehículos autónomos y eléctricos**

Los vehículos autónomos y eléctricos están transformando la logística de última milla, ofreciendo soluciones para el transporte seguro y eficiente de mercancías dentro de las comunidades. Modelos de estimación de energía para vehículos eléctricos de última milla muestran la necesidad de integrar factores como topografía, tráfico y estilo de conducción para mejorar la planificación (Snoeck et al., 2024). Empresas como Nuro han desarrollado vehículos eléctricos compactos y diseñados específicamente para la entrega de última milla, con compartimentos con temperatura controlada que

mantiene productos como comestibles, lácteos, comidas y productos frescos en condiciones óptimas durante el tránsito. Estos vehículos, como el modelo R3 de Nuro, son totalmente eléctricos, producen cero emisiones y están optimizados para operaciones de entregas eficientes, fiables y escalables, integrándose sin problemas en entornos urbanos modernos. La incorporación de vehículos eléctricos en las flotas de reparto de última milla es una estrategia creciente para alcanzar objetivos de sostenibilidad, aunque presenta desafíos en la predicción del consumo de energía para la planificación de rutas. (Barrios Estrada, F. 2022).

### **2.3.2. Lockers inteligentes**

Los *lockers* inteligentes representan una solución innovadora para la entrega de última milla, especialmente en contextos donde la accesibilidad y la discreción son importantes. (Gómez, A. et al., 2024). Estos casilleros seguros y automatizados permiten el acceso 24/7 a los artículos, lo que es particularmente útil para estudiantes o personas con horarios no tradicionales, ya que pueden recoger sus productos en cualquier momento, incluso fuera del horario comercial habitual. Ofrecen un acceso discreto, lo que ayuda a los usuarios a evitar el estigma o la incomodidad asociados con la recogida en persona. Para productos frescos, los *lockers* inteligentes pueden incluir almacenamiento refrigerado, manteniendo artículos como lácteos, frutas, verduras o comidas preparadas seguros y utilizables. Además, facilitan el seguimiento del inventario, lo que permite a los administradores optimizar el stock y priorizar los artículos próximos a caducar para reducir el desperdicio de alimentos (Pitney Bowes. 2025)

### **2.3.3. Plataformas digitales para optimización de rutas**

Las plataformas digitales para optimización de rutas son herramientas cruciales para mejorar la eficiencia en la logística de última milla, especialmente para productos perecederos. Estas plataformas determinan las rutas más eficientes para una flota de vehículos, equilibrando múltiples objetivos y restricciones. Permiten reducir los costos de entrega al aumentar la densidad de las rutas (más paradas por ruta, menos kilómetros recorridos) y minimizar el tiempo de inactividad de los conductores. Para el transporte de productos frescos, estas soluciones son capaces de considerar restricciones específicas de la cadena de frío, asignando pedidos a camiones según las necesidades de control de temperatura y asegurando el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega de los clientes. La anticipación inteligente del tráfico y el ajuste dinámico de rutas en tiempo real son características clave, permitiendo que las rutas se optimicen continuamente incluso después de que los vehículos hayan partido, integrando eventos imprevistos como clientes ausentes o interrupciones del tráfico. Esto asegura la integridad de la cadena de frío y la adherencia a los compromisos de entrega, lo que puede generar ganancias de productividad de hasta el 15% en comparación con la planificación manual. (West, N. R. B., 2023).

### **2.3.4. IoT, sensores de temperatura y trazabilidad**

El Internet de las Cosas (IoT) y los sensores son fundamentales para la visibilidad y el monitoreo en tiempo real en la cadena de suministro de productos frescos. Los dispositivos IoT, que incluyen sensores, GPS y redes inalámbricas, permiten el seguimiento continuo de los productos alimenticios durante el tránsito y el almacenamiento. Los sensores de temperatura y humedad son esenciales para monitorear las condiciones ambientales críticas, detectando desviaciones de los niveles óptimos y permitiendo acciones correctivas antes de que se produzca un deterioro significativo (Asimiyu, Z. 2024). Sensores más avanzados, como las narices electrónicas (*e-Noses*), pueden detectar olores y evaluar la frescura o el deterioro analizando compuestos orgánicos volátiles, mientras que las lenguas electrónicas (*e-Tongues*) analizan composiciones líquidas para simular el gusto humano, utilizadas para probar la frescura y consistencia (Rabehi, A. et al., 2024). La trazabilidad se mejora significativamente con estos sistemas, ya que proporcionan datos en tiempo real sobre el origen, las condiciones de transporte y el estado del producto, lo que es crucial para la seguridad alimentaria y la confianza del consumidor. La tecnología *blockchain* complementa al IoT al proporcionar un registro digital inmutable y transparente de cada transacción, desde la producción hasta la venta minorista, verificando la autenticidad y el origen del producto y previniendo la falsificación (Ellahi, R. M. et al., 2024).

## 2.4. Indicadores clave de análisis

El análisis de desempeño en la última milla requiere la consideración de indicadores clave que permitan evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Entre los más relevantes se encuentran la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la calidad del servicio al cliente.

### 2.4.1. Eficiencia operativa

La eficiencia operativa en la logística de última milla de productos frutihortícolas se puede medir a través de varios indicadores clave que reflejen la optimización de recursos y procesos. La reducción de costos se logra mediante la optimización de rutas para minimizar el consumo de combustible y los costos laborales, así como la reducción de los costos de mantenimiento de vehículos. La productividad se mejora al aumentar la densidad de las rutas (más paradas por ruta) y reducir los tiempos de inactividad de los conductores (Gevaers, R. et al., 2011). La precisión en la previsión de la demanda es crucial para evitar el exceso de existencias o la falta de productos, lo que impacta directamente en la reducción del desperdicio y los costos de almacenamiento (Asimiyu, Z., 2024). La automatización de procesos en centros de distribución y almacenes, así como la automatización de pedidos, aumentan la productividad y reducen los errores humanos, liberando recursos y disminuyendo los costos. Los tiempos de entrega y la tasa de utilización de camiones son también indicadores fundamentales de la eficiencia operativa (Dong, Y. et al., 2023).

### 2.4.2. Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental es un pilar fundamental en la evaluación de las soluciones de última milla para productos frutihortícolas, buscando minimizar el impacto ecológico de las operaciones logísticas (Dong, Y. 2023). La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se logra mediante la optimización de rutas, lo que disminuye el consumo de combustible y por el uso de vehículos eléctricos que producen cero emisiones. La reducción del desperdicio de alimentos es un indicador crítico, ya que la digitalización, a través de la previsión de la demanda, el seguimiento en tiempo real y la gestión optimizada del inventario, contribuye directamente a minimizar las pérdidas de productos perecederos (Bocean, C. G., 2024). La optimización del uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas en la producción primaria, también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Además, la trazabilidad impulsada por *blockchain* puede promover el abastecimiento sostenible al verificar que los proveedores cumplen con los estándares éticos y ambientales (Ellahi, R. M. et al., 2024).

### 2.4.3. Calidad del servicio al cliente

La calidad del servicio al cliente es un indicador esencial que refleja la capacidad de la cadena de suministro para satisfacer las expectativas del consumidor y construir lealtad a la marca. La satisfacción del cliente se logra mediante la entrega de productos frescos y de alta calidad, lo cual es posible gracias al control de la cadena de frío y la reducción del deterioro. Los tiempos de entrega puntuales y el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega son cruciales para la experiencia del cliente. La transparencia y la trazabilidad del producto, habilitadas por tecnologías como *blockchain*, permiten a los clientes acceder a información detallada sobre el origen y las condiciones de transporte, lo que genera confianza y reduce el escepticismo sobre afirmaciones engañosas. La confianza del consumidor hacia los alimentos orgánicos puede fortalecerse a través de sistemas de trazabilidad basados en *blockchain* (Duong et al., 2025). Las notificaciones automáticas y el seguimiento de pedidos en línea mantienen a los clientes informados sobre el progreso de su entrega, mejorando la experiencia general. La discreción y la disponibilidad 24/7 que ofrecen los *lockers* inteligentes también contribuyen a una mejor calidad de servicio, adaptándose a las necesidades y horarios de los consumidores (Ellahi, R. M. et al., 2024).

## 3. METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque exploratorio-descriptivo, con el objetivo de identificar, analizar y clasificar las principales soluciones tecnológicas aplicadas a la distribución urbana de productos frutihortícolas en la etapa de última milla. Dado que se trata de un campo en constante evolución, con fuerte incidencia de la innovación tecnológica, se considera pertinente utilizar una metodología basada en la revisión sistemática de fuentes secundarias y el análisis cualitativo de tendencias.

### 3.1. Revisión bibliográfica y tecnológica

La principal técnica utilizada será la revisión bibliográfica sistemática, complementada por la identificación de desarrollos tecnológicos recientes. Para ello, se consultarán bases de datos académicas reconocidas (*Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Google Scholar*), así como documentos técnicos, informes de organismos internacionales (FAO, CEPAL, BID) y reportes de empresas proveedoras de soluciones logísticas innovadoras.

Los criterios de inclusión de fuentes serán:

- Relevancia directa con la temática de logística de última milla en productos perecederos.
- Enfoque en tecnologías aplicadas a la distribución urbana.
- Publicaciones entre los años 2015 y 2025, priorizando artículos revisados por pares y casos documentados en contextos urbanos.
- Fuentes en idioma español e inglés.

### 3.2. Clasificación y análisis de tecnologías

Una vez identificadas las tecnologías relevantes se procederá a clasificarlas según su funcionalidad, grado de adopción, ventajas operativas y requerimientos de implementación.

### 3.3. Evaluación mediante indicadores clave

A fin de estudiar el impacto potencial de las soluciones tecnológicas identificadas, se empleará una matriz de evaluación basada en tres dimensiones principales:

- Eficiencia operativa: reducción de tiempos de entrega, mejora en la utilización de recursos, optimización de rutas.
- Sostenibilidad ambiental: disminución de emisiones, uso de energías limpias, reducción del desperdicio.
- Calidad del servicio: mantenimiento de la cadena de frío, trazabilidad, cumplimiento de ventanas horarias.

## 4. DESARROLLO

A partir del marco conceptual expuesto, en este apartado se analizan las tendencias tecnológicas identificadas y su grado de adopción, proponiendo esquemas de integración que permitan diseñar modelos logísticos innovadores y adaptables a distintos contextos

### 4.1. Tendencias tecnológicas identificadas

Las tecnologías digitales están redefiniendo la logística de última milla para productos frutihortícolas, ofreciendo soluciones innovadoras para los desafíos inherentes a su limitada vida útil y a los entornos urbanos.

#### 4.1.1. Descripción y funcionamiento

Los vehículos autónomos y eléctricos están emergiendo como una tendencia clave para el transporte de última milla. Empresas como Nuro han desarrollado vehículos eléctricos compactos, diseñados específicamente para la entrega de mercancías, que incluyen compartimentos con temperatura controlada para mantener productos frescos, lácteos y comidas en condiciones óptimas durante el tránsito. Estos vehículos son totalmente eléctricos, lo que significa cero emisiones, y están optimizados para operaciones de entregas eficientes y escalables en entornos urbanos modernos. Su implementación, sin embargo, presenta desafíos en la predicción precisa del consumo de energía para la planificación de rutas.

Los *lockers* inteligentes ofrecen una solución flexible y segura para la entrega de productos. Estos casilleros automatizados permiten el acceso 24/7 a los artículos, lo que es particularmente útil para consumidores con horarios no tradicionales, ofreciendo una recogida discreta y sin contacto. Para productos frescos, los *lockers* inteligentes pueden incorporar almacenamiento refrigerado, asegurando que artículos como lácteos o frutas se mantengan en condiciones adecuadas. Además, facilitan el

seguimiento del inventario, lo que permite a los administradores optimizar el stock y priorizar los artículos próximos a caducar, contribuyendo a la reducción del desperdicio de alimentos. El despliegue de *lockers* inteligentes para alimentos frescos está siendo explorado como estrategia discreta y escalable en campus y comunidades (Smiota, n.d.).

Las plataformas digitales para optimización de rutas son herramientas cruciales que determinan las rutas más eficientes para una flota de vehículos, equilibrando múltiples objetivos y restricciones. Estas plataformas permiten reducir los costos de entrega al aumentar la densidad de las rutas y minimizar el tiempo de inactividad de los conductores. Para el transporte de productos frescos, son capaces de considerar restricciones específicas de la cadena de frío, asignando pedidos a camiones según las necesidades de control de temperatura y asegurando el cumplimiento de las ventanas de tiempo de entrega. Plataformas digitales como Kardinal.ai y Route4Me evidencian el papel de la analítica avanzada en la reducción de costos y tiempos en la distribución de perecederos (Kardinal.ai, n.d.; Route4Me, n.d.). La anticipación inteligente del tráfico y el ajuste dinámico de rutas en tiempo real son características clave, permitiendo optimizar las rutas continuamente incluso después de que los vehículos hayan partido, integrando eventos imprevistos como clientes ausentes o interrupciones del tráfico.

El Internet de las Cosas (IoT), los sensores de temperatura y la trazabilidad son fundamentales para la visibilidad en tiempo real. Los dispositivos IoT, que incluyen sensores, GPS y redes inalámbricas, permiten el seguimiento continuo de los productos alimenticios durante el tránsito y el almacenamiento, proporcionando datos sobre temperatura, humedad y composición de gases. Sensores más avanzados, como las narices electrónicas (E-Noses) y las lenguas electrónicas (E-Tongues), pueden detectar olores y analizar composiciones líquidas para evaluar la frescura o el deterioro. La tecnología *blockchain* complementa al IoT al proporcionar un libro de contabilidad digital descentralizado e inalterable que registra de forma segura e inmutable las transacciones desde la producción hasta la venta minorista, verificando la autenticidad y el origen del producto y mejorando la confianza del consumidor.

#### **4.1.2. Grado de adopción actual en contextos urbanos**

La adopción de estas tecnologías está en constante crecimiento. Nuro ha establecido asociaciones con empresas como Domino's, CVS, Kroger y Uber para la entrega autónoma de última milla, demostrando la viabilidad de sus vehículos en entornos urbanos. Walmart ha implementado inteligencia artificial y tecnología automatizada en su cadena de suministro global, incluyendo sistemas predictivos en Coyoacán, Costa Rica, para clasificar productos frescos y sistemas de "inventario auto-reparador" en la Ciudad de México que redirigen productos para evitar el exceso de existencias. Migros, un importante minorista de comestibles en Suiza, ha digitalizado sus operaciones para reducir el deterioro de frutas y verduras frescas, utilizando datos históricos y de punto de venta en vivo para automatizar pedidos y optimizar el inventario (Seifert, R. et al., 2017).

En el contexto de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) agroalimentarias, la transformación digital es crucial para mejorar el rendimiento y la eficiencia, aunque su grado de adopción varía. Si bien hay una creciente conciencia sobre los beneficios de las TIC, persisten desafíos como la inversión inadecuada, la falta de capital y la adhesión a modelos de negocio tradicionales. Sin embargo, estudios en América Latina y el Caribe (ALC) han mostrado una notable resiliencia e implementación de innovaciones en la cadena agroalimentaria durante la pandemia de COVID-19, con más del 70% de las empresas implementando innovaciones, muchas de ellas a largo plazo. Esto sugiere un potencial significativo para una mayor adopción en la región, especialmente con el apoyo público o privado y el acceso al crédito (Frau, M. et al., 2022).

### **4.2. Integración de tecnologías en modelos logísticos innovadores**

La sinergia de las tecnologías digitales permite la creación de modelos logísticos innovadores que abordan los desafíos específicos de la última milla frutihortícola.

#### **4.2.1. Propuestas de esquemas de distribución basados en tecnología**

Los esquemas de distribución innovadores se centran en la creación de cadenas de suministro de respuesta rápida habilitadas por tecnología, como el concepto "*Terra-fresh*", que integra planificación,

análisis y coordinación para construir cadenas cortas y orientadas al mercado, resilientes a través de la reconfigurabilidad basada en datos en tiempo real (Peinado-Guerrero, M., et al., 2022). Esto implica la integración profunda de IoT, IA, Big Data y *Blockchain* para proporcionar una visibilidad completa, análisis predictivos avanzados y una trazabilidad inmutable desde la granja hasta el consumidor.

La automatización de almacenes y procesos mediante robótica es fundamental. Esto incluye la recolección robótica de frutas maduras, líneas de procesamiento automatizadas para clasificación y envasado, y sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados que reducen errores y acortan los tiempos de entrega. Los robots móviles autónomos pueden utilizarse para la recolección asistida y equiparse con sensores para monitorear la calidad de los productos frescos en los almacenes (MorePeople, 2024).

Conceptos como el "inventario auto-reparador" del supermercado Walmart, que redirige automáticamente los productos a donde más se necesitan antes de que el exceso de existencias se convierta en desperdicio, y el "*Smart Data Escrow*", que permite el intercambio de datos controlados entre socios de la cadena de suministro sin comprometer la información propietaria, son ejemplos de cómo la tecnología puede crear sistemas más inteligentes y eficientes. Estos esquemas buscan pasar de una gestión reactiva a operaciones proactivas y fluidas, optimizando el abastecimiento, la trazabilidad y la rentabilidad.

#### **4.2.2. Adaptabilidad a contextos locales o regionales**

La implementación de estos modelos innovadores debe considerar la adaptabilidad a contextos locales y regionales, especialmente en áreas como América Latina. Las PyMEs agroalimentarias en estas regiones a menudo enfrentan barreras significativas como la inversión inadecuada, la falta de capital y la adhesión a modelos de negocio tradicionales. (Peinado-Guerrero, M., et al., 2022).

Para una adopción exitosa, es crucial el apoyo público y privado a largo plazo, así como el acceso al crédito, que han demostrado ser factores clave para la implementación de innovaciones duraderas en ALC. Las soluciones deben ser escalables y adaptables a las necesidades locales, aprovechando una columna vertebral tecnológica unificada que permita la personalización para mercados específicos. Esto implica diseñar sistemas digitales modulares que puedan ajustarse a las particularidades de cada región, maximizando el retorno de la inversión y acelerando la implementación (Dong, Y. et al., 2023).

Además, la alfabetización digital y la capacitación de la fuerza laboral son esenciales para la transición. A medida que la automatización y la IA se integran más, los roles humanos evolucionarán de la mano de obra manual a la supervisión, el análisis de datos y la gestión de sistemas, lo que requiere un enfoque en el desarrollo de competencias digitales y analíticas. La colaboración entre los actores de la cadena de suministro, facilitada por plataformas digitales, es fundamental para una coordinación en tiempo real y una respuesta rápida a las fluctuaciones del mercado (Seifert, R., et al., 2017).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se exponen a continuación los resultados de la revisión y su discusión en torno a las estrategias tecnológicas identificadas para la última milla frutihortícola

### **5.1. Principales hallazgos de la revisión**

La implementación de tecnologías emergentes en la logística de última milla para productos frutihortícolas augura un impacto transformador en la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la calidad del servicio al cliente. La innovación en cadenas agroalimentarias de América Latina y el Caribe mostró resiliencia frente a la pandemia, destacando la importancia de la digitalización en contextos de crisis (IDB Invest, 2024).

El potencial de la inteligencia artificial aplicada a la gestión de inventarios perecederos aún requiere exploración, particularmente en entornos con alta variabilidad de la demanda (Şimşek, 2024). Los datos de disponibilidad y pérdidas alimentarias, como los reportados por el USDA (2025), podrían servir como base para modelar la eficiencia de la última milla en productos frescos.

Casos como el de LCR International (2024) señalan que las tecnologías emergentes no solo transforman la logística, sino también los perfiles y competencias de las personas que participan en la cadena de valor. La experiencia de empresas como Nuro confirma la factibilidad de integrar vehículos

autónomos a gran escala en la distribución urbana (Nuro, n.d.). El análisis de riesgos operativos en mercados de África y Asia refuerza la necesidad de métricas claras y estrategias de mitigación para la entrega de perecederos (Rafiq, 2024). Reportes de expertos internacionales confirman que la transformación digital de la cadena de suministro de productos frescos será clave en los próximos años (Dodson, 2025).

La tabla 1 resume de manera comparativa los principales hallazgos de la investigación respecto a las cuatro innovaciones tecnológicas aplicadas a la cadena de suministro: vehículos autónomos y eléctricos, *lockers* inteligentes, plataformas digitales de optimización de rutas y el uso de IoT con trazabilidad mediante *blockchain*. La organización en tres ejes —eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio al cliente— permite visualizar de forma clara y sintética los beneficios y aportes de cada tecnología, facilitando la comprensión de sus impactos diferenciales y su potencial para transformar la logística.

Tabla 1: Matriz de evaluación. Elaboración propia

Innovación tecnológica	Eficiencia operativa	Sostenibilidad ambiental	Calidad del servicio al cliente
<b>Vehículos autónomos y eléctricos</b>	Reducción de costos laborales (hasta 40% en última milla). Operación 24/7 con rutas optimizadas por IA. Mejora en productividad y reducción de tiempos de entrega.	Cero emisiones directas. Menor huella de carbono gracias a la electricidad y optimización de rutas.	Entregas rápidas y consistentes. Mayor fiabilidad y llegada en condiciones óptimas.
<b>Lockers inteligentes</b>	Eliminan fallos y reentregas. Reducción de costos de última milla. Posibilitan almacenamiento refrigerado y optimización del stock.	Menor tráfico, ruido y emisiones por consolidación de entregas. Reducción del desperdicio de alimentos.	Acceso 24/7, flexibilidad y seguridad en la recogida. Notificaciones automáticas que mejoran la experiencia.
<b>Plataformas digitales para optimización de rutas</b>	Disminuyen costos operativos (combustible, desgaste, tiempos muertos). Incrementan productividad hasta un 15%. Ajustes dinámicos en tiempo real.	Reducción de emisiones y consumo de combustible. Favorecen el uso de vehículos eléctricos.	Garantizan entregas puntuales y dentro de ventanas horarias. Comunicación en tiempo real aumenta la transparencia.
<b>IoT, sensores de temperatura y trazabilidad (Blockchain)</b>	Monitoreo en tiempo real de condiciones y ubicación. Reducción de deterioro e inventario optimizado (FIFO).	Menor desperdicio de alimentos. Optimización del uso de recursos en agricultura de precisión. Menos emisiones por reducción de productos dañados.	Frescura y calidad garantizadas. Confianza del consumidor por trazabilidad verificable y lucha contra la falsificación.

## 5.2. Contribución teórica y práctica

Este estudio contribuye al conocimiento de soluciones de última milla para productos frutihortícolas al proporcionar una descripción de las tecnologías digitales emergentes. Se destaca la necesidad de considerar la degradación de la calidad dependiente del tiempo y las condiciones ambientales en tiempo real (temperatura, humedad, gases) y no solo la cantidad, lo cual es un factor crítico para los productos frescos.

El trabajo subraya la importancia de la coordinación en tiempo real y la colaboración entre todos los actores de la cadena de suministro, desde el productor hasta el consumidor final, para lograr una verdadera capacidad de respuesta rápida. Se enfatiza el diseño de sistemas logísticos que sean

inherentemente resilientes y reconfigurables, capaces de adaptarse dinámicamente a cambios imprevistos en la demanda o la oferta, un cambio de paradigma de la gestión reactiva a la proactiva.

Se plantean también opciones para la toma de decisiones estratégicas tales como priorizar la inversión en infraestructura robusta de IoT y en la gestión de datos de alta calidad, ya que la precisión de los datos es la base para todas las capacidades digitales avanzadas. Implementar modelos de IA y aprendizaje automático para la previsión de la demanda y la optimización del inventario es crucial, superando los métodos tradicionales que no pueden manejar la complejidad y la dinámica de los productos frescos. Utilizar la tecnología *blockchain* para mejorar la trazabilidad y construir la confianza del consumidor, especialmente para productos de alto valor o certificados, diferenciando la oferta y satisfaciendo las demandas de transparencia del mercado.

Sería de suma importancia que las soluciones puedan ser adaptables a contextos locales y regionales, especialmente para las PyMEs en América Latina, lo que implica superar las barreras de inversión y capacitación. Tampoco se puede soslayar que la creciente automatización y la integración de la IA requieren una inversión en la recalificación de los empleados para que puedan operar y gestionar estos sistemas avanzados.

### 5.3. Limitaciones del estudio

Este estudio, al ser una revisión bibliográfica y tecnológica, no es un estudio empírico primario, lo que significa que no se generaron datos nuevos ni se realizaron experimentos controlados. La información se basa en fuentes secundarias publicadas.

La investigación se limita a la información disponible públicamente, que puede no ser exhaustiva en ciertos detalles operativos o financieros de las implementaciones tecnológicas. Además, las publicaciones pueden tener un sesgo hacia los éxitos, subestimando los desafíos o fracasos.

Las tecnologías emergentes, especialmente en el ámbito digital, evolucionan a un ritmo acelerado. Esto implica que algunas descripciones o grados de adopción pueden quedar desactualizados en un corto período de tiempo.

El énfasis principal del estudio está en los beneficios de las soluciones de aplicar tecnologías digitales. Las complejidades de la implementación, como los altos costos iniciales, la integración de sistemas heterogéneos, la resistencia al cambio organizacional y las posibles consecuencias no deseadas (ej. aumento del consumo de recursos por mayor eficiencia), podrían requerir un análisis más profundo.

### 5.4. Líneas futuras de investigación

A partir de las limitaciones identificadas y las tendencias emergentes, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Desarrollar modelos cuantitativos que integren la degradación de la calidad dependiente del tiempo y las condiciones ambientales en tiempo real (temperatura, humedad, gases) para la optimización de rutas y la gestión de inventario en la última milla de productos frutihortícolas.
- Crear modelos de simulación para evaluar el impacto sinérgico de la integración de múltiples tecnologías en escenarios urbanos específicos, cuantificando los beneficios en eficiencia, sostenibilidad y calidad del servicio.
- Investigar el uso de la teoría de juegos para analizar la interacción estratégica entre los diferentes actores de la cadena de suministro (productores, distribuidores, minoristas, consumidores) y el impacto de las políticas de subsidio gubernamentales en la voluntad de adoptar tecnologías digitales.
- Desarrollar modelos de aprendizaje profundo para predecir con alta precisión el consumo de energía de vehículos eléctricos en rutas de última milla, considerando factores como la topografía, el tráfico y el comportamiento del conductor, para una planificación de rutas más eficiente y sostenible.

## 6. CONCLUSIONES

La logística de última milla para productos frutihortícolas se erige como un componente crítico y desafiante en la cadena de suministro moderna, exacerbado por la naturaleza perecedera de los productos y las complejidades inherentes a los entornos urbanos. El crecimiento del comercio

electrónico y la evolución de las expectativas del consumidor han transformado este segmento en un eje estratégico, donde la rapidez, el control de calidad y la eficiencia son imperativos para minimizar el desperdicio y garantizar la satisfacción del cliente.

Este estudio, a partir de la revisión bibliográfica y tecnológica, permitió identificar estrategias emergentes con alto potencial de impacto: vehículos autónomos y eléctricos, *lockers* inteligentes, plataformas digitales de optimización de rutas y soluciones de IoT y *blockchain*. Estas tecnologías demostraron ser catalizadores fundamentales para mejorar indicadores clave de eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y calidad del servicio al cliente, contribuyendo a reducir pérdidas, fortalecer la trazabilidad y transformar la última milla en una ventaja competitiva.

Si bien la adopción tecnológica en PyMEs y en contextos regionales enfrenta barreras de inversión y capacitación, la resiliencia demostrada por el sector agroalimentario latinoamericano subraya el potencial de adaptación y el valor estratégico de estas innovaciones con el apoyo adecuado.

Las recomendaciones estratégicas enfatizan la necesidad de invertir en infraestructura de datos, adoptar análisis predictivos, aprovechar *blockchain* para la confianza, fomentar la colaboración y adaptar las soluciones a los contextos locales, al tiempo que se impulsa la recualificación de la fuerza laboral.

A pesar de las limitaciones inherentes a una revisión bibliográfica, este trabajo abre diversas líneas futuras de investigación, desde el desarrollo de modelos cuantitativos que integren la degradación de la calidad en tiempo real, hasta la evaluación empírica mediante simulaciones o proyectos piloto en entornos reales.

En definitiva, la integración estratégica de estas tecnologías no es solo una opción, sino una necesidad imperante para construir cadenas de suministro frutihortícolas rápidas, eficientes, resilientes y sostenibles en un mundo en constante cambio.

## 7. REFERENCIAS

Ahmed, E., & Elgalb, A. (2024). Optimizing supply chain logistics with big data and AI: Applications for reducing food waste. *Journal of Current Science and Research Review*, 2(02), 29-39.

Asimiyu, Z. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Barrios Estrada, F. (2022). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Bocean, C. G. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Dong, Y., Ahmad, S. F., Irshad, M., Al-Razgan, M., Ali, Y. A., & Awwad, E. M. (2023). The digitalization paradigm: Impacts on agri-food supply chain profitability and sustainability. *Sustainability*, 15(21), 15627. <https://doi.org/10.3390/su152115627>

Duong, C. D., Dao, T. T., Vu, T. N., Ngo, T. V. N., & Nguyen, M. H. (2025). Blockchain-enabled food traceability system and consumers' organic food consumption: A moderated mediation model of blockchain knowledge and trust in the organic food chain. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 82, 103901. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2025.103901>

Ellahi, R. M., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

Falayi, A., Ayeni, A., Adebayo, B., & Abdullahi, A. (2024). Towards digitalization of fruits and vegetables supply chain: Digital twins and Internet of Things approach. *Global Journals of Research in Engineering*, 24(G1), 11–20.

Frau, M., Moreno, M., Moi, L., & Cabiddu, F. (2022). Digital transformation through the lens of digital data handling: An exploratory analysis of agri-food SMEs. *Journal of Small Business Strategy*, 32(3).

Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanellander, T. (2011). Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context. En *City distribution and urban freight transport: Multiple perspectives* (pp. 56-71). Edward Elgar Publishing.

Gómez, Á., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].

- IDB Invest. (2024). *COVID-19 and innovation in agrifood systems in Latin America and the Caribbean*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Kardinal.ai. (n.d.). *Route optimization: Addressing the challenges of fresh produce transport*. <https://kardinal.ai/route-optimization-addressing-the-challenges-of-fresh-produce-transport/>
- LCR International. (2024, febrero 2). *How emerging technologies are shaping the future of people in fresh produce*. <https://www.lcrint.com/blog/how-emerging-technologies-are-shaping-the-future-of-people-in-fresh-produce>
- Nuro. (n.d.). *Decoding Nuro: From last-mile delivery to scaled autonomy*. <https://www.boringsage.com/post/decoding-nuro-from-last-mile-delivery-to-scaled-autonomy>
- Peinado-Guerrero, M., & Villalobos, J. R. (2022). Technology-enabled, rapid-response fresh food supply chains: A paradigm and case study. *Transportation Research Procedia*, 67, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.005>
- Pitney Bowes. (2025, junio 9). *Breaking barriers: Smart lockers for campus food pantries*. Pitney Bowes. <https://www.pitneybowes.com/us/blog/smart-lockers-campus-food-pantry.html>
- Rafiq, S. (2024). Operational risks, mitigation strategies, and key performance indicators in last-mile delivery of perishable goods for African and Asian retailers. Linnaeus University.
- Rabehi, A., et al. (2024). [Referencia citada en texto, completar con datos de publicación si corresponde].
- Route4Me. (n.d.). *Food and beverage route optimization*. <https://route4me.com/solutions/food-and-beverage-routing-software>
- Seifert, R., & Kirci, M. (2017). Digitalization: A fresh idea for the fruit and veg supply chain. *IMD Research Knowledge*.
- Şimşek, A. B. (2024). AI in managing perishable goods inventory. En *AI and smart manufacturing: Building Industry 4.0* (pp. 29-70). IGI Global.
- Smiota. (n.d.). *Solving campus hunger with smart food lockers: A scalable, 24/7, discreet solution*. <https://smiota.com/resources/solving-campus-hunger-with-smart-food-lockers/>
- Snoeck, A., Bhargava, A., Merchan, D., Davis, J., & Pachon, J. (2024). Energy estimation of last-mile electric vehicle routes. *arXiv preprint arXiv:2408.12006*.
- Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D.-V. N., & Rangasamy, G. (2023). Digitalization of the agro-food sector for achieving sustainable development goals: A review. *Sustainable Food Technology*, 1(4), 783-801. <https://doi.org/10.1002/sft2.68>
- Su, J., Wu, J., & Liu, C. (2014). Research on coordination of fresh produce supply chain in big market sales environment. *Scientific World Journal*, 2014, 873980. <https://doi.org/10.1155/2014/873980>
- Tokala, V. Y., & Mohammed, M. (2022). *Cold chain management for the fresh produce industry in the developing world*. CRC Press.
- USDA Economic Research Service. (2025, enero 5). *Food availability (per capita) data system: Food loss*. United States Department of Agriculture. <https://www.ers.usda.gov/data-products/food-availability-per-capita-data-system/food-loss>