

Aplicación de la Investigación de Operaciones en Ingeniería en Computación para resolver problemas de optimización de rutas de distribución con Logística Inversa

Application of Operations Research in Computer Engineering to solve distribution route optimization problems with Reverse Logistics.

Valery M. Carvajal Oreamuno, Anthony J. Rojas Fuente, Jesús G. Cordero Díaz

Tecnológico de Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica

vmo.carvajal@gmail.com, ajrojasfuentes@gmail.com, jesusgcdiaz@estudiantec.cr

<https://orcid.org/0009-0004-2839-3544>, <https://orcid.org/0009-0006-5040-5761>

, <https://orcid.org/0009-0005-1162-4163>

Resumen

Este artículo analiza cómo la integración de la Investigación de Operaciones (IO) con la logística inversa, apoyada en la Ingeniería en Computación, ofrece soluciones más eficientes y sostenibles para la gestión de la cadena de suministro moderna. La logística inversa, que permite la recuperación, reutilización y reciclaje de productos, es fundamental para reducir el impacto ambiental y avanzar hacia un modelo de economía circular más factible. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica, se exploran diversas técnicas de IO, como la programación lineal, la simulación y los modelos estocásticos, aplicadas a la optimización

de rutas de recolección, la planificación de inventarios y el control de recursos en sistemas logísticos. Asimismo, se evalúa cómo tecnologías emergentes, como la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático, potencian la implementación de estas soluciones al mejorar la capacidad de análisis y toma de decisiones en entornos dinámicos y complejos. Los resultados subrayan la importancia de esta integración para reducir costos operativos, mejorar la sostenibilidad y maximizar la reutilización de materiales. Estas sinergias ofrecen un camino sólido hacia la transformación de las cadenas de suministro, alineándose con los principios de sostenibilidad y eficiencia que caracterizan a la economía circular.

Abstract

This article examines how the integration of Operations Research (OR) with reverse logistics, supported by Computer Engineering, provides more efficient and sustainable solutions for managing modern supply chains. Reverse logistics, which enables the recovery, reuse, and recycling of products, is crucial for reducing environmental impact and advancing towards a more feasible circular economy. Through a comprehensive literature review, various OR techniques such as linear programming, simulation, and stochastic models are explored, focusing on optimizing collection routes, inventory planning, and resource control in logistical systems. Additionally, the role of emerging technologies like Artificial Intelligence and Machine Learning is evaluated, showing how these technologies enhance the implementation of OR solutions by improving analysis and decision-making capabilities in dynamic, complex environments. The results emphasize the importance of this integration in reducing operational costs, improving sustainability, and maximizing material reuse. These synergies offer a solid pathway towards transforming supply chains, aligning with the principles of sustainability and efficiency that define the circular economy.

Palabras Clave

Economía circular, Gestión de inventarios, Ingeniería en Computación, Investigación de Operaciones, Logística inversa, Optimización de rutas, Sistemas de soporte a la decisión.

Key Words

Circular Economy, Inventory Management, Computer Engineering, Operations Research, Reverse Logistics, Route Optimization, Decision Support Systems.

Introducción

El aumento en la demanda de optimización operativa y reducción del impacto ambiental ha impulsado nuevas estrategias, destacando la logística inversa como un elemento clave en la cadena de suministro moderna. Esta permite el retorno eficiente de productos y la recuperación de materiales, apoyando la economía circular, donde los recursos se reutilizan (Banyai et al. 2019). La Investigación de Operaciones (IO) facilita la optimización en logística inversa mediante modelos matemáticos, algoritmos y simulaciones, mientras que la Ingeniería en Computación proporciona las herramientas tecnológicas, como la Inteligencia Artificial, para implementar y escalar estas soluciones en entornos reales. Este ensayo explora la aplicación de la Investigación de Operaciones (IO) en la Ingeniería en Computación para optimizar rutas de distribución en el contexto de la logística inversa. A través de una revisión literaria de estudios entre 2010 y 2023, se analizan contribuciones clave de ambas disciplinas, destacando cómo la Ingeniería en Computación facilita la implementación de modelos y algoritmos de IO mediante la integración de datos y automatización de procesos. El estudio ofrece una visión detallada de las mejores prácticas y oportunidades futuras para impulsar la sostenibilidad y la eficiencia

operativa en las empresas Wu et al. (2023).

Definición de objetivos

Objetivo General

Realizar una revisión exhaustiva para explorar cómo la Investigación de Operaciones (IO) se aplica en Ingeniería en Computación para optimizar rutas de distribución en Logística Inversa. El ensayo busca identificar y analizar las contribuciones de diversos estudios científicos, destacando la relevancia y sinergia entre estas disciplinas para desarrollar soluciones eficientes, sostenibles y aplicables a la gestión moderna de la cadena de suministro.

Objetivos Específicos

1. **Identificar estudios clave:** Revisar la literatura científica en Web Of Science sobre la optimización de rutas en Logística Inversa mediante técnicas de IO apoyadas en Ingeniería en Computación, priorizando estudios metodológicamente relevantes y de alto impacto.

2. **Analizar las aplicaciones de la IO:** Examinar cómo técnicas como la programación lineal y la simulación se aplican a la optimización de rutas en Logística Inversa, evaluando sus beneficios y desafíos en estudios empíricos.

3. **Evaluar el rol de la Ingeniería en Computación:** Analizar cómo el desarrollo de software y el uso de tecnologías emergentes como IA y Aprendizaje Automático facilitan la implementación de modelos de IO en la Logística Inversa.

4. **Evaluar el impacto en contextos como la sostenibilidad y la economía circular:** Revisar cómo la combinación de IO y tecnologías computacionales reduce residuos, optimiza recursos y facilita la transición hacia modelos de negocio sostenibles basados en la economía circular.

5. **Sintetizar conclusiones:** Integrar los hallazgos de los estudios revisados para destacar las mejores prácticas y áreas que requieren mayor investigación en la optimización de la Logística Inversa.

Método

Para cumplir con los objetivos del ensayo, se realizó una revisión exhaustiva de literatura publicada entre 2010 y 2023 en bases de datos reconocidas. Se seleccionaron estudios sobre la optimización de rutas en logística inversa mediante técnicas de Investigación de Operaciones (IO) y su implementación en Ingeniería en Computación. La selección se basó en criterios de relevancia, calidad y aplicabilidad, incluyendo enfoques teóricos y soluciones prácticas. Ejemplos clave fueron el marco conceptual de (Jianguo and Zhong 2007) y el análisis de Deng et al. (2014). Se evaluaron las metodologías y resultados de los artículos para garantizar conclusiones útiles en contextos reales.

La búsqueda se realizó en Web of Science y Mendeley, utilizando términos clave como "logística inversa" y "optimización", limitando a publicaciones en inglés y español de 2010 a 2023. De 500 resultados iniciales, se seleccionaron 15

artículos relevantes. Los criterios incluyeron estudios publicados en revistas de alto impacto con datos replicables.

La calidad de los artículos se evaluó revisando su metodología y resultados, priorizando estudios robustos y replicables. Además, se analizaron la variabilidad, fiabilidad y validez de los estudios para asegurar que los hallazgos fueran precisos y aplicables a otros contextos.

Desarrollo y discusión

La Logística Inversa gestiona el retorno de productos y residuos para reciclaje, reutilización o disposición adecuada, añadiendo complejidad en la trazabilidad. Contribuye a la sostenibilidad al recuperar materiales, reducir desperdicios y generar nuevas fuentes de ingresos, como la remanufactura y reciclaje (Liu and Zhang 2008).

La Investigación de Operaciones (IO) optimiza estos procesos mediante modelos matemáticos y algoritmos para mejorar la planificación de rutas y gestión de inventarios. Herramientas como la programación lineal y simulación ayudan a reducir costos y tiempos. Tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA) y el Aprendizaje Automático (ML) permiten anticipar devoluciones y mejorar la eficiencia.

El ensayo destaca la importancia de la logística inversa en la sostenibilidad y cómo la IO, junto con tecnologías computacionales, es clave para optimizar

la cadena de suministro y mejorar la eficiencia organizacional.

La Ingeniería en Computación y la Investigación de Operaciones son disciplinas complementarias que se intersecan en diversas áreas clave:

A.Optimización Algorítmica: La Ingeniería en Computación diseña algoritmos esenciales para resolver problemas de optimización en la IO, como la programación lineal y la optimización combinatoria.

B.Modelado de Sistemas: Ambas disciplinas crean modelos para representar sistemas, con los ingenieros simulando comportamientos y la IO analizando estrategias de decisión.

C.Análisis de Datos: La IO depende del análisis de grandes volúmenes de datos, mientras que la Ingeniería en Computación utiliza herramientas como la minería de datos y el aprendizaje automático para mejorar la toma de decisiones, comparando múltiples modelos matemáticos para encontrar la solución óptima. (Zeballos and Marcovecchio 2024)

D.Simulación: Los ingenieros desarrollan software de simulación que permite a la IO evaluar el rendimiento de sistemas bajo diversas condiciones y realizar experimentos virtuales.

E.Aplicaciones Prácticas: La Ingeniería en Computación y la IO colaboran en diversas industrias, creando soluciones que mejoran la eficiencia organizacional y resuelven problemas operativos.

En base a esta información, podemos concluir que la relación entre la Ingeniería en Computación y la Investigación de

Operaciones es fundamental para abordar problemas complejos en un entorno cada vez más basado en datos (data-driven). La sinergia entre estas disciplinas no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también potencia la capacidad de las organizaciones para tomar decisiones informadas y estratégicas.

Aplicaciones Concretas de la Ingeniería en Computación y la Investigación de Operaciones en la Logística Inversa

La Investigación de Operaciones (IO) y la Ingeniería en Computación convergen en áreas clave como la optimización algorítmica, el modelado de sistemas, el análisis de datos y la simulación. Esta combinación aborda problemas complejos en entornos basados en datos, mejorando la eficiencia, reduciendo costos y fortaleciendo la toma de decisiones estratégicas. Aplicaciones concretas en logística inversa incluyen la optimización de rutas de recolección, la gestión de inventarios, la simulación de procesos y el desarrollo de sistemas de soporte a la decisión.

1. Optimización de Rutas de Recolección

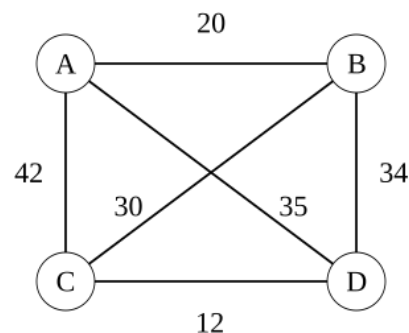
La logística inversa implica la recolección eficiente de productos desde múltiples ubicaciones para su reciclaje, reparación o disposición. La optimización de rutas es esencial para reducir costos y tiempos de transporte en redes complejas. Técnicas como el problema del viajante han sido aplicadas exitosamente para minimizar la distancia recorrida, costos de combustible

y emisiones, como lo menciona Banyai et al. (2019).

En este contexto, Scroccaro et al. (2024) presentan un enfoque de optimización inversa que aprende el comportamiento de los tomadores de decisiones en enrutamiento, utilizando datos históricos para inferir funciones de costo desconocidas. Este método, probado en el Amazon Last Mile Routing Research Challenge, replicó decisiones humanas y mostró flexibilidad en escenarios reales, subrayando la importancia de los grandes volúmenes de datos para optimizar dinámicamente las rutas de recolección en logística inversa Rossit et al. (2024).

Algoritmos Aplicados:

- **Problema del Viajante (TSP):** Este problema clásico de IO, donde se busca encontrar la ruta más corta que visite un conjunto de ubicaciones y regrese al punto



de partida, es adaptado en la logística inversa para planificar rutas de recolección.

El TSP se puede formular de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \times x_{ij}$$

Sujeto a:

- $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n$
- $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n$
- $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \subset \{1, 2, \dots, n\}, 2 \leq |S| \leq n - 1$
- $x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j = 1, 2, \dots, n$

Explicación de las variables:

- **n**: Número total de ciudades o puntos de recolección.
- **c_{ij}** : Costo, distancia o tiempo de viajar entre las ciudades 'i' y 'j'.
- **x_{ij}** : Variable binaria que vale 1 si la ruta incluye el viaje directo de la ciudad 'i' a la ciudad 'j', y 0 en caso contrario.
- **S**: Subconjunto de ciudades. La tercera restricción evita subciclos, asegurando que el viajante visite todas las ciudades sin completar un ciclo prematuro.
- **Optimización Multiobjetivo**: Se emplean algoritmos que no solo minimizan la distancia recorrida, sino que también optimizan otras variables, como el tiempo, el costo de combustible, y la capacidad del vehículo (Chen, Yu, and Nielsen 2019).

2. Gestión de Inventarios y Almacenamiento

El manejo eficiente de inventarios en logística inversa es crucial debido a la naturaleza impredecible de los flujos de retorno de productos como menciona Rossit and Bard (2024). La IO y la ingeniería en computación desempeñan un rol clave al desarrollar modelos para optimizar los niveles de inventario, reduciendo costos de almacenamiento y riesgo de obsolescencia. Los modelos

estocásticos de control de inventario se utilizan para gestionar la incertidumbre en la demanda de productos retornados, permitiendo ajustar dinámicamente el inventario disponible Wei, Zhao, and Qu (2012).



Modelos de Control de Inventario:

- **Control Estocástico de Inventario**: Este modelo se aplica en situaciones donde la demanda y el retorno de productos son inciertos. Ayuda a determinar cuándo y cuánto inventario debe reordenarse para minimizar los costos de inventario Mao-Zeng (2008).

El 'Control Estocástico de Inventario' se puede formular de la siguiente manera:

$$\min \sum_{t=0}^T E[c_t(S_t, I_t)]$$

Sujeto a:

- $I_{t+1} = I_t + O_t - D_t, \forall t = 1, 2, \dots, T$
- $S_t = I_t + O_t$

Explicación de las variables:

- **T**: Horizonte temporal (por ejemplo, días, semanas).

- I_t : Inventario disponible al inicio del periodo 't'.
- Q_t : Cantidad ordenada en el periodo 't'.
- D_t : Demanda en el periodo 't'.
- S_t : Nivel de inventario después de recibir Q_t .
- $c_t(S_t, I_t)$: Costo asociado con el inventario en el periodo 't' (incluye costos de almacenamiento, pedido y penalizaciones por faltantes).

• **Modelos de Gestión de Inventario de Ciclo de Vida:** Los modelos de ciclo de vida se centran en la gestión de productos al final de su vida útil, optimizando la recolección, clasificación y procesamiento de productos devueltos.

3. Simulación y Modelado

La simulación y el modelado son herramientas clave en la logística inversa, permitiendo prever y analizar escenarios antes de implementar cambios operacionales. Basadas en modelos matemáticos y algoritmos de investigación de operaciones, se utilizan simulaciones de eventos discretos y modelos basados en agentes para evaluar el impacto de diversas variables. Esto optimiza procesos críticos como la recolección y el reciclaje de productos Weerasinghe et al. (2024)

Tipos de Simulación:

- **Simulación Discreta de Eventos:** Modela el flujo de productos en la cadena de suministro inversa, permitiendo analizar el impacto de variaciones en la demanda, retornos de productos y políticas de inventario.
- **Simulación Basada en Agentes:** Utiliza modelos que representan a actores

individuales (como consumidores o centros de recolección) para simular sus interacciones y el impacto en la logística inversa.

4. Sistemas de Soporte a la Decisión

Los DSS combinan la Investigación de Operaciones (IO) y la ingeniería en computación para facilitar decisiones informadas en logística inversa. Integran datos en tiempo real, algoritmos de optimización y análisis predictivos para ofrecer recomendaciones optimizadas. Los DSS modernos incluyen componentes de sostenibilidad, apoyando prácticas de logística verde que reducen la huella de carbono y maximizan la eficiencia de los recursos Zhou et al. (2023).

La combinación de ingeniería en computación e investigación de operaciones en logística inversa mejora la eficiencia, reduce costos y apoya iniciativas de sostenibilidad y economía circular. A través de la optimización de rutas, gestión avanzada de inventarios, simulación, modelado y sistemas de soporte a la decisión, las empresas transforman la logística inversa en un proceso eficiente y sostenible. Estos avances no solo benefician económicamente a las empresas, sino que también tienen un impacto positivo en el medio ambiente y la sociedad, haciendo que la integración de estas disciplinas sea clave para el futuro Vahrenkamp (2023).

Componentes de un DSS:

- **Modelos de Optimización:** Incluir modelos matemáticos que optimizan aspectos como la ubicación de centros de

recolección, rutas de transporte y gestión de inventarios.

●**Análisis Predictivo:** Utiliza técnicas de machine learning para predecir flujos de retorno de productos y optimizar la capacidad de procesamiento y almacenamiento.

Las aplicaciones concretas de la ingeniería en computación y la investigación de operaciones en la logística inversa no solo mejoran la eficiencia y reducen costos, sino que también apoyan las iniciativas de sostenibilidad y economía circular. A través de la optimización de rutas, la gestión avanzada de inventarios, la simulación y el modelado, y los sistemas de soporte a la decisión, las empresas pueden transformar su logística inversa en un proceso altamente eficiente y sostenible. Estos avances no solo benefician a las empresas desde una perspectiva económica, sino que también tienen un impacto positivo en el medio ambiente y la sociedad, haciendo que la integración de estas disciplinas sea una estrategia clave para el futuro.

Conclusión

Este ensayo ha demostrado la importancia de la convergencia entre la Investigación de Operaciones (IO) y la Ingeniería en Computación en la optimización de rutas de distribución dentro del ámbito de la logística inversa. A lo largo del estudio, se ha subrayado cómo la logística inversa no solo mejora la gestión de retornos y el reciclaje de productos, sino que también juega un papel crucial en la sostenibilidad empresarial y la transición hacia la

economía circular. Este enfoque permite a las empresas reducir el desperdicio, maximizar la reutilización de materiales y disminuir su impacto ambiental, mientras que, al mismo tiempo, optimizan sus operaciones y costos logísticos.

La Investigación de Operaciones aporta un conjunto de herramientas metodológicas robustas, tales como la programación lineal, la simulación y la teoría de colas, que permiten resolver problemas complejos asociados a la planificación de rutas, la gestión de inventarios y la optimización del transporte. Sin embargo, la implementación eficaz de estos modelos en entornos empresariales requiere el apoyo de tecnologías avanzadas desarrolladas por la Ingeniería en Computación, como los sistemas de información integrados y los algoritmos de optimización basados en Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático. Estas tecnologías permiten analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones estratégicas y mejora la eficiencia operativa.

Además, este estudio ha destacado cómo la combinación de IO y la Ingeniería en Computación no solo beneficia a las empresas desde un punto de vista económico, sino que también promueve prácticas empresariales más sostenibles. Al implementar soluciones tecnológicas avanzadas, las organizaciones pueden abordar los desafíos de la logística inversa de manera más efectiva, contribuyendo a una reducción significativa del desperdicio, la optimización de recursos y la reutilización de materiales.

Podemos entonces concluir que la revisión literaria realizada a lo largo de este trabajo proporciona una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la optimización de la logística inversa, proponiendo nuevas áreas de estudio como el desarrollo de algoritmos más sofisticados, la integración de tecnologías emergentes y la mejora de las prácticas de sostenibilidad empresarial. La sinergia entre IO y la Ingeniería en Computación continuará siendo esencial para enfrentar los desafíos complejos de las cadenas de suministro modernas, especialmente en un mundo donde la sostenibilidad y la eficiencia operativa son fundamentales para el éxito empresarial a largo plazo.

Referencias

- Banyai, Tamas, Peter Tamas, Bela Illes, and Agota Stankeviciute Zivile and Banyai. 2019. "Optimization of Municipal Waste Collection Routing: Impact of Industry.0 Technologies on Environmental Awareness and Sustainability." *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH* 16(4). doi: 10.3390/ijerph16040634.
- Chen, Gang, Bin Yu, and Peter Nielsen. 2019. "Preface: Operations Research for Transportation." *ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH* 273(1–2, SI):1–3. doi: 10.1007/s10479-018-3113-7.
- Deng, Shuai, Ting Zhou, Yi Cao, and Yanhui Li. 2014. "Study on Recyclable Reserve Logistics Network Optimization Based On-Commerce." Pp. 337–40 in *2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF E-COMMERCE AND E-GOVERNMENT (ICMECG)*.
- Jianguo, Xu, and Qiao Zhong. 2007. "Study Systematically on Enterprise Reverse Logistics Management." Pp. 191–96 in *TIRMDCM 2007: PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY INNOVATION, RISK MANAGEMENT AND SUPPLY CHAIN MANAGEMENT, VOLS 1 AND 2*, edited by J. L. Li, D. H. Zhu, A. Porter, and D. D. Wu.
- Liu, Qiong, and Chaoyong Zhang. 2008. "Reverse Logistics Alliance and Its Consolidation Algorithm." Pp. 3511–16 in *2008 7TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, VOLS 1-23*.
- Mao-Zeng, Xu. 2008. "Inventory Control with Stochastic Demand and Transport Time Based on Inventory State Equation." Pp. 379–85 in *PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON RISK MANAGEMENT & ENGINEERING MANAGEMENT, VOLS 1 AND 2*, edited by D. Wu and D. Niu.
- Rossit, Diego, and Jonathan Bard. 2024. "Avances En Un Modelo Estocástico Para La

- Localización y Dimensionamiento de Puntos Limpios En La Gestión de Residuos Urbanos.” *Memorias de Las JAIIO* 10(14):398–400.
- Rossit, Diego, Begoña González, Mariano Frutos, and Máximo Méndez. 2024. “Resolución Simultánea de Problemas de Localización-Ruteo En La Cadena Logística Inversa de Los Residuos Urbanos.” *Memorias de Las JAIIO* 10(14):414–17.
- Scroccaro, Pedro Zattoni, Piet van Beek, Peyman Mohajerin Esfahani, and Bilge Atasoy. 2024. “Inverse Optimization for Routing Problems.” *TRANSPORTATION SCIENCE*. doi: 10.1287/trsc.2023.0241.
- Vahrenkamp, Richard. 2023. “Mathematical Management-Operations Research in the United States and Western Europe, 1945-1990.” *MANAGEMENT REVUE* 34(1):69–91. doi: 10.5771/0935-9915-2023-1-69.
- Weerasinghe, Buddhi A. A., H. Niles Perera, and Xiwen Bai. 2024. “Optimizing Container Terminal Operations: A Systematic Review of operations Research Applications.” *MARITIME ECONOMICS & LOGISTICS* 26(2, SI):307–41. doi: 10.1057/s41278-023-00254-0.
- Wei, Guo, Shiwei Zhao, and Wenfang Qu. 2012. “Research of Stochastic Control on Aviation Supplies Inventory.” P. 3339+ in *ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, PTS 1-4*. Vols. 472–475, *Advanced Materials Research*, edited by W. Z. Chen, X. P. Xu, P. Q. Dai, and Y. L. Chen.
- Wu, Yiwei, Shuaian Wang, Lu Zhen, and Gilbert Laporte. 2023. “Integrating Operations Research into Green Logistics: A Review.” *FRONTIERS OF ENGINEERING MANAGEMENT* 10(3):517–33. doi: 10.1007/s42524-023-0265-1.
- Zeballos, Luis, and Marian Marcovecchio. 2024. “Análisis Comparativo de Dos Modelos Matemáticos Para El Problema Estocástico de Recolección y Transporte Óptimo de Residuos Médicos.” *Memorias de Las JAIIO* 10(14):1–15.
- Zhou, Ji, Senyan Yang, Hui Feng, and Zexu An. 2023. “Multi-Echelon Sustainable Reverse Logistics Network Design with incentive Mechanism for Eco-Packages.” *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 430. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139500.