

Análisis del problema de optimización de una red de cadena de suministro mediante técnicas exactas y estrategias de entrega al consumidor final

Jenny Marcela Rincón Silva

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Correo electrónico: jemar021199@gmail.com.co

RESUMEN

Esta investigación aborda la entrega eficiente en áreas urbanas densamente pobladas. Utilizando un modelo de optimización con GAMS, se evaluaron estrategias de entrega final considerando costos de transporte e inventario. Se diseñó una red de distribución de última milla para minimizar costos en B2B y B2C, incluyendo centros de distribución, tiendas y clientes. Se analizaron bicicletas, motocicletas y vans, destacando la eficiencia de las motocicletas, la sostenibilidad de las bicicletas y los bajos costos operativos de las vans. Estrategias como Parcel Lockers y entrega en el baúl del coche también mostraron eficiencia. El modelo 7, que propone la entrega directa desde el centro de distribución al cliente mediante el baúl del coche, resultó ser el más eficiente en costos. La investigación promovió prácticas sostenibles, minimizando combustibles fósiles y maximizando la eficiencia energética, garantizando una distribución adaptable y alineada con la sostenibilidad empresarial.

Palabras clave: cadena de suministro, decisiones de localización, inventario y transporte, multi-ítem, múltiples periodos, optimización lineal, SCND, un solo criterio objetivo.

1. INTRODUCCIÓN

El comercio electrónico ha experimentado una consolidación significativa como un canal de venta global omnipresente, acentuándose aún más con la aparición de la pandemia del COVID-19. Este cambio hacia lo digital ha desafiado la preeminencia de las tiendas físicas en la comercialización de productos, redefiniendo así el panorama del comercio. Sin embargo, este cambio también ha reconfigurado el papel fundamental de la logística dentro de la cadena de suministro (Zennaro et al., 2022)

Es innegable que un sistema de entrega eficiente juega un papel vital en el éxito de los minoristas en línea, quienes invierten considerablemente en la entrega de productos a sus clientes (Shavarani et al., 2019). Las fluctuaciones en los costos del combustible han generado un aumento en los costos de entrega, planteando un nuevo desafío para los minoristas en línea en su búsqueda por ofrecer precios competitivos. La preferencia de los clientes por la entrega a domicilio, en lugar de pasar tiempo en centros comerciales, ha contribuido a este cambio en las tendencias de compra (Magretta, 2002). En medio de la creciente demanda de operaciones de entrega y la

naturaleza altamente competitiva de este mercado, la reducción del tiempo de entrega se convierte en un desafío adicional que agrega complejidad a la ecuación.

A medida que los minoristas se esfuerzan por proporcionar servicios de entrega más rápidos y económicos, se enfrentan a obstáculos considerables, especialmente en áreas densamente pobladas. Según (Zeithaml et al. 1985) y (Shavarani et al. 2018), las congestiones en zonas urbanas densamente pobladas y los elevados costos del combustible son factores que afectan negativamente la eficiencia de las operaciones de entrega. A lo largo del tiempo, se han realizado diversos intentos para abordar estas complicaciones y mejorar la eficiencia en las operaciones de entrega.

Es por esto por lo que se realiza la presente investigación donde se busca mediante un modelo de optimización matemática con el fin de considerar diversas estrategias de entrega al consumidor final mediante el uso del lenguaje de programación GAMS

2. Metodología

Fase 1: Revisión de Literatura (Cumplimiento del Objetivo 1)

En esta etapa, se analizó la actividad científica sobre redes de distribución y diseño de la cadena de suministro, enfocándose en la logística de última milla y su aplicación urbana. Se cubrieron aspectos estratégicos, tácticos y operativos, especialmente en modelos de negocio B2B y B2C. Se identificaron palabras clave para construir ecuaciones de búsqueda, las cuales se utilizaron en SCOPUS y WEB SCIENCE, limitando los resultados a publicaciones desde 2020 hasta la fecha actual. La búsqueda incluyó términos como "cadena de suministro", "inventario", "transporte", "multi-item", "multi-periodo", y "diseño de la red de cadena de suministro". Las ecuaciones de búsqueda se analizaron con VOSviewer para identificar documentos relevantes, que se revisaron por títulos, resúmenes y conclusiones. Esta fase estableció la base teórica y metodológica para el proyecto.

Fase 2: Definición de Escenarios (Cumplimiento del Objetivo 2)

Se partió del análisis de la literatura de la fase anterior para identificar los elementos esenciales de los escenarios matemáticos a modelar. Se establecieron las estructuras y condiciones de cada modelo, considerando diferentes métodos de entrega, como entregas a domicilio utilizando cicla, moto y van, y combinaciones de estos medios. También se consideraron otras opciones como recogida en tienda, parcel lockers y trunk of car.

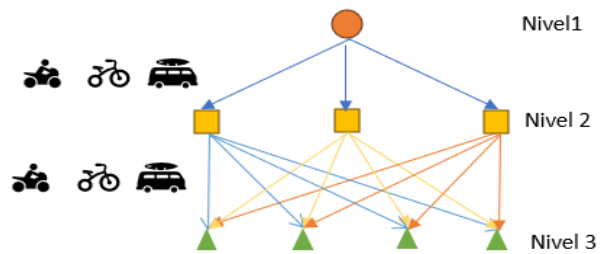
Fase 3: Formulación de Modelos (Cumplimiento del Objetivo 3)

Se identificaron los factores importantes para cada escenario, diseñando una red de distribución multi-item, multiescalón y multiperiodo mediante un modelo determinístico de optimización matemática. Los modelos se centraron en minimizar costos, analizando variables clave y restricciones. Se abordaron modelos de dos escalones, capacidades distintas, opciones de entrega, y envíos a domicilio, desarrollando un modelo matemático para validar estos factores.

En la figura 1 se evidencia el esquema del modelo 4, donde se tiene como método de envtres opciones de entrega (Bicicletas, moto, Vans), el modelo escoge la opción optima de despacho de producto

Figura 1.

Esquema modelo 4



La función objetivo, índices, parámetros y variables del modelo mencionado se presenta a continuación con sus restricciones

Índices

- i: Centro de distribución (N1) [1...I]
- j: Almacenes locales (N2) [1...J]
- n: Minoristas (N3) [1...N]
- t: Numero de periodos [1...T]

Parámetros

- CH1 ikt: Costo de almacenamiento en cada i por cada k en cada periodo t.
- CH2 j: Costo de almacenamiento en cada j por cada k en cada periodo t
- CO2 jt: Costo de pedir en cada j en el periodo t.
- CO3 nt: Costo de pedir en cada n en el periodo t.
- C21C ijkt: Costo de enviar de i a j cada k en cada periodo t en cicla.
- C32C jn: Costo de enviar de j a n cada k en cada periodo t en cicla.
- C21M ijkt: Costo de enviar de i a j cada k en cada periodo t en moto.
- C32M jn: Costo de enviar de j a n cada k en cada periodo t en moto.
- C21V ijkt: Costo de enviar de i a j cada k en cada periodo t en van.
- C32V jn: Costo de enviar de j a n cada k en cada periodo t en van.
- Dj: Demanda de producto.
- Capacidad1 i: Capacidad de almacenamiento en cada i.

Capacidad2 j: Capacidad de almacenamiento en cada j.

Variables

Of : Función objetivo

X21C ijkt Unidades enviadas por cada i a cada j por cada k en cada periodo t

X32C jnkt Unidades enviadas por cada j a cada n por cada k en cada periodo t

X21M ijkt Unidades enviadas por cada i a cada j por cada k en cada periodo t

X32M jnkt Unidades enviadas por cada j a cada n por cada k en cada periodo t

X21V ijkt Unidades enviadas por cada i a cada j por cada k en cada periodo t

X32V jnkt Unidades enviadas por cada j a cada n por cada k en cada periodo t

S1ikt: Unidades a mantener en cada i por cada k en cada periodo t.

S2kjt: Unidades a mantener en cada j por cada k en cada periodo t.

R1 jt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada j, 0 de lo contrario.

R2 nt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada n, 0 de lo contrario.

R3 ikt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en cicla de desde i, 0 de lo contrario

R4 jkt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en cicla de desde j, 0 de lo contrario

R5 ikt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de desde i, 0 de lo contrario

R6 jkt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de desde j, 0 de lo contrario

R7 ikt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de desde i, 0 de lo contrario

R8 jkt: Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de desde j, 0 de lo contrario

$$\begin{aligned} \text{Min of} = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_j \sum_k \sum_t CH2_{jkt} * S2_{jkt} + \sum_j \sum_t CO2_{jt} * R1_j \\ & + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_n + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21C_{ijkt} * X21C_{ijkt} * (demand_j/5) \\ & * R3_{ikt} + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32C_{jnkt} * X32C_{jnkt} * (demand_j/5) * R4_{jkt} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21M_{ijkt} * X21M_{ijkt} * (demand_j/30) * R5_{ikt} \\ & * \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32M_{jnkt} * X32M_{jnkt} * (demand_j/30) * R6_{jkt} \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21V_{ijkt} * X21V_{ijkt} * (demand_j/700) * R7_{ikt} \\ & + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32V_{jnkt} * X32V_{jnkt} * (demand_j/700) * R8_{jkt} \end{aligned}$$

Restricciones

$$\sum_k \sum_t S1_{ikt} \geq capacidad1_i$$

$$\sum_k \sum_t S2_{jkt} \geq capacidad2_j$$

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21C_{ijkt} * R3_{ikt} \leq \sum_n \sum_k \sum_t X32C_{jnkt} * R4_{jkt}$$

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21M_{ijkt} * R5_{ikt} \leq \sum_n \sum_k \sum_t X32M_{jnkt} * R6_{jkt}$$

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21V_{ijkt} * R7_{ikt} \leq \sum_n \sum_k \sum_t X32V_{jnkt} * R8_{jkt}$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32C_{jnkt} * R4_{jkt} \geq demand_j$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32M_{jnkt} * R6_{jkt} \geq demand_j$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32V_{jnkt} * R8_{jkt} \geq demand_j$$

$$R3_{ikt} + R5_{ikt} + R7_{ikt} = 1$$

$$R4_{jkt} + R6_{jkt} + R8_{jkt} = 1$$

El modelo de optimización tiene como objetivo minimizar los costos totales de almacenamiento, pedidos y envío en una cadena de suministro que incluye un centro de distribución, varios almacenes locales y

clientes, considerando múltiples periodos y productos. La entrega a domicilio se realiza mediante bicicletas, motos y vans. La ecuación objetivo busca minimizar los costos de almacenamiento en el centro de distribución y almacenes locales, los costos de pedidos en los almacenes locales y clientes, y los costos de envío desde el centro de distribución a los almacenes locales y desde estos a los clientes, diferenciando según el tipo de transporte. Las restricciones aseguran que las unidades almacenadas no excedan la capacidad, que las unidades enviadas cubran la demanda y que cada tipo de transporte se utilice adecuadamente.

Fase 4: Evaluación de Escenarios (Cumplimiento del Objetivo 4)

Se compararon los resultados de los modelos formulados para identificar la solución óptima. En caso de no alcanzar la solución óptima, se buscaron soluciones factibles que cumplieran con los objetivos del proyecto.

Fase 5: Publicación del Artículo (Cumplimiento del Objetivo 5)

Se recopilaron y presentaron los resultados del proyecto en un artículo publicable, abordando el problema de optimización del diseño de la red de cadena de suministro mediante técnicas exactas y considerando diversas estrategias de entrega al consumidor final.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Modelo 1: Donde se hacen envíos por medio de bicicleta, Muestra un alto costo de 132.289.000 debido a las limitaciones en capacidad de carga y altos costos operativos. Aunque es una opción sostenible, no es rentable en comparación con otros métodos. Con demanda y capacidad constante, el costo se incrementa a 860.366.500, indicando que la variabilidad en demanda y capacidad puede ayudar a reducir costos.

Modelo 2: Donde se hacen envíos por medio de moto, es más eficiente con un costo de 28.358.156 gracias a su mayor capacidad de carga y eficiencia operativa. Sin embargo, con demanda y capacidad constante, el costo aumenta a 174.115.000,

subrayando la importancia de la flexibilidad en la planificación logística.

Modelo 3: Realiza envíos por medio de van, muestra una significativa reducción en costos operativos a 4.045.600 debido a su alta capacidad de carga. Con demanda y capacidad constante, el costo incrementa a 13.436.405, destacando la ventaja de la variabilidad en la demanda.

Modelo 4: Considera tres tipos de posibles métodos de entrega y escoge el óptimo, lo que dio como resultado optimizar la operación con un costo de 1.819.875. Tanto el Modelo 4.1, con demanda y capacidad constante, como el Modelo 4.2, con demanda más baja y capacidad más alta, muestran el mismo costo de 1.819.875, indicando que la flexibilidad en la selección del transporte puede mantener una eficiencia significativa en costos independientemente de las variaciones en demanda y capacidad.

Modelo 5: Se tiene en cuenta los tres tipos de domicilio o recogida en tienda, lo cual, es altamente rentable con un costo de 1.792.600, destacándose como una opción rentable. Incluso con un descuento del 90%, el costo es competitivo, incrementando ligeramente a 1.794.850.

Modelo 6: se centra en entregas en parcel lockers, como resultado optimiza la gestión de la demanda y la asignación de recursos con un costo de 1.804.700. Con una capacidad tres veces mayor, el costo es de 1.824.100, reflejando eficiencia en diferentes escenarios.

Modelo 7: La entrega por medio del baul del coche (Trunk Car), es la más eficiente en términos de costos operativos con un valor de 1.688.632. Sin embargo, con un aumento en la demanda, el costo se incrementa significativamente a 17.286.660, subrayando la necesidad de equilibrar demanda y capacidad.

De acuerdo con los modelos planteados, el análisis revela que la elección del método de entrega debe considerar la relación entre capacidad de carga, costos operativos y flexibilidad en la demanda.

Mientras que las bicicletas ofrecen sostenibilidad, las motocicletas y vans presentan una mayor eficiencia en costos y capacidad de carga. Los modelos híbridos y estrategias como la recogida en tienda y Parcel Lockers proporcionan soluciones rentables y adaptables a diferentes escenarios logísticos, con la entrega directa emergiendo como la opción más eficiente en términos de costos operativos en condiciones de demanda variable.

4. CONCLUSION

La distribución logística óptima depende de la elección estratégica entre ciclas, motos y vans, cada una con sus ventajas específicas. Las motos destacan por su rapidez y eficiencia en entornos urbanos, siendo ideales para minimizar costos operativos y maximizar la velocidad de entrega. En contraste, las ciclas ofrecen una alternativa más sostenible pero con costos de entrega más elevados, limitando su viabilidad económica en comparación con las motos.

La incorporación de vans en la estrategia logística representa una reducción significativa en los costos totales, manteniendo una eficiencia operativa similar a la de las motos. Este enfoque es especialmente efectivo para gestionar grandes volúmenes de carga y rutas de entrega que requieren capacidad adicional de almacenamiento.

La implementación estratégica de parcel lockers también se destaca como una solución eficiente para optimizar recursos y mejorar la experiencia del cliente, reduciendo costos operativos y ofreciendo flexibilidad en las entregas.

La elección entre estos métodos de distribución debe equilibrar la eficiencia operativa, los costos asociados y los impactos ambientales, alineándose con las prioridades y objetivos de sostenibilidad de la empresa. Esta estrategia integrada no solo garantiza la satisfacción de la demanda de manera efectiva, sino que también posiciona a la empresa para adaptarse rápidamente a los cambios del mercado y las preferencias de los consumidores, asegurando una ventaja competitiva duradera.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aldrighetti, R., Battini, D., Ivanov, D., & Zennaro, I. (2021). Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: A review and future research directions. *International Journal of Production Economics*, 235(March 2020), 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108103>

Arias-Osorio, J., & Camacho-Pinto, J. C. (2021). Una nueva metaheurística híbrida para resolver el problema 2eLIRP. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2). <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021013>

Baquela, E. G., & Redchuk, A. (2013). Optimización Matemática con R. Volumen I: Introducción al modelado y resolución de problemas. *Bubok Publishing S.L.*, 13.

BÜYÜKÖZKAN, G., GÜLER, M., MUKUL, E., & GÖÇER, F. (2019). Evaluation of Supply Chain Analytics With an Integrated Fuzzy Mcdm Approach. *Beykoz Akademi Dergisi*, 136–147. <https://doi.org/10.14514/byk.m.26515393.2019.sp/136-147>

Cadena, L., & Cadena, L. (2021). *Tendencias en estrategias y tecnología aplicadas a la Logística de ciudad . Revisión de literatura . 2008*, 1–25.

Castro, L. y yepes S. (universidad del rosario). (2015). *Analisis de los componentes de la cadena de suministro y su relación con el desempeño superior de la organización en el sector manufacturero. 2015*, 1–239.

Córdoba, E. (2020). *Solución a un modelo de optimización para la gestión de inventario y ruteo de vehículos de dos escalones con transbordos laterales (2E-IRPT) a través de una metaheurística híbrida. 1*, 105–112.

Das, S. K., Pervin, M., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2023). Multi-objective solid transportation-location problem with variable carbon emission in inventory management: a hybrid approach. *Annals of Operations Research*, 324(1–2), 283–309. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03809-z>

Delivery, L. M. (2013). *Capítulo adicional c*.

- Durán, Y. (2012). Administración del inventario: elemento clave para la optimización de las utilidades en las empresas. *Visión Gerencial*, 1, 55–78.
- Fernando, D., Pérez, S., Orozco, E. F., & Meza Peralta, K. (2013). *Planteamientos Estratégicos para la Logística Urbana: Perspectiva de la Relación Universidad-Estado-Empresa Strategic Approaches for Urban Logistics: Perspective Regarding State-University-Industry Relationship*. 15(15), 1909–2458.
- García, F. (2017). Una Mirada Desde La Perspectiva. *Visión Gerencial*, 7(1), 53–62. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=465545874007>
- Ge, H., Goetz, S. J., Cleary, R., Yi, J., & Gómez, M. I. (2022). Facility locations in the fresh produce supply chain: An integration of optimization and empirical methods. *International Journal of Production Economics*, 249(June). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108534>
- Isabel, M., Vanegas, C., & Chacón, E. (2022). *Modelado determinístico de una red de distribución*. 1. 1–93.
- Kotler, P., & Keller, K. (2012). Ventas personales. In *Dirección De Marketing*. <http://www.montartuempresa.com/wp-content/uploads/2016/01/direccion-de-marketing-14edi-kotler1.pdf>
- Mrabti, N., Hamani, N., Boulaksil, Y., Amine Gargouri, M., & Delahoche, L. (2022). A multi-objective optimization model for the problems of sustainable collaborative hub location and cost sharing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164(June), 102821. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102821>
- Ponsot B, E. (2008). El estudio de inventarios en la cadena de suministros: Una mirada desde el subdesarrollo. *Actualidad Contable Faces*, 11(17), 82–94.
- Rózga, R. (2021). El papel de la logística urbana en el concepto de ciudad inteligente. *Recuperación Transformadora de Los Territorios Con Equidad y Sostenibilidad*, 1, 1–20. <http://ru.iiec.unam.mx/5405/1/218-Rózga.pdf>
- Shavarani, S. M., Golabi, M., & Izbirak, G. (2021). A capacitated biobjective location problem with uniformly distributed demands in the UAV-supported delivery operation. *International Transactions in Operational Research*, 28(6), 3220–3243. <https://doi.org/10.1111/itor.12735>
- Universidad politecnica de cartagena, F. De. (1999). *Fundamentos de Optimización Matemática en Economía*. 2. <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/25951/FundamentosdeOptimizacionMatematicaenEconomia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wang, L., Wang, S., Gong, Y., & Peng, L. (2023). Optimizing a multi-echelon location-inventory problem with joint replenishment: A Lipschitz ϵ -optimal approach using Lagrangian relaxation. *Computers and Operations Research*, 151(March 2022), 106128. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106128>
- Wang, Y., Wang, X., Guan, X., & Tang, J. (2021). Multidepot Recycling Vehicle Routing Problem with Resource Sharing and Time Window Assignment. *Journal of Advanced Transportation*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2327504>
- Yılmaz, A., & Demirel, J. (2022). *Journal of Turkish Operations Management Novel last mile delivery models in terms of sustainable urban logistics*. 1(6), 1076–1091.
- Yılmaz, Ö. F., Özçelik, G., & Yeni, F. B. (2021). Ensuring sustainability in the reverse supply chain in case of the ripple effect: A two-stage stochastic optimization model. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124548>
- Zennaro, I., Finco, S., Calzavara, M., & Persona, A. (2022). Implementing E-Commerce from Logistic Perspective: Literature Review and Methodological Framework. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020911>
- Zeithaml VA, Parasuraman A, Berry LL (1985) Problemas y estrategias en el marketing de servicios. *J Marcos* 49:33. doi: ambiente. *J Intell*

Fuzzy Syst 29:2217–2226.
<https://doi.org/10.3233/ifs-151697> 10.2307/1251563

Ariza, Á. L. G., & Llinás, G. A. G. (2015). Método simplex. In *Manual práctico de investigación de Operaciones I* (4th ed., pp. 98–143). Editorial Universidad del Norte.
<https://doi.org/10.2307/j.ctvdf0jz0.8>

Pardal-Refoyo, J. L., Pardal-Peláez, B., Pardal-Refoyo, J. L., & Pardal-Peláez, B. (2020). Anotaciones para estructurar una revisión sistemática. *Revista ORL*, 11(2), 155–160.
<https://doi.org/10.14201/ORL.22882>