

Análisis del problema de Optimización denominado Diseño de la red de cadena de suministro (SCND por su sigla en inglés) a través de técnicas exactas, considerando diversas estrategias de entrega al consumidor final

Jenny Marcela Rincón Silva

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero industrial

Director

Javier Eduardo Arias

Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería industrial

Bucaramanga

2024

### Dedicatoria

A lo largo de este camino académico, he contado con el amor y apoyo de personas maravillosas que han sido mi pilar. A mi querida familia, especialmente a mis padres, quienes con su amor y sacrificio me han guiado siempre, enseñándome el valor del esfuerzo. A mi hija, cuya sonrisa y alegría diaria me han inspirado a seguir adelante, siendo mi mayor motivación. A mis hermanos, por su constante apoyo y por estar siempre presentes con una palabra de aliento. A mi cuñado y mi cuñada, por su cariño y respaldo incondicional. A mi sobrino, cuya presencia y alegría han sido una fuente de inspiración. A toda mi familia, por su amor y apoyo incondicional. Y a todas las personas que creyeron en mí y me brindaron su confianza, su apoyo ha sido esencial para alcanzar este logro. Este trabajo de grado es tanto mío como suyo, ya que han estado conmigo en cada paso del camino.

### Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a Dios por ser mi guía y fuente de fortaleza en todo momento. A mis padres, por su amor incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A todas las personas que estuvieron a mi lado, ofreciéndome su apoyo y palabras de aliento cuando más lo necesitaba. Sin su presencia y respaldo, no habría llegado hasta aquí. A mi director de trabajo de grado, Javier Eduardo Arias Osorio, le agradezco su paciencia, orientación y conocimientos, que fueron fundamentales para la realización de este proyecto. A todos ustedes, gracias por creer en mí y ser parte de este logro.

**Tabla de contenido**

	Pág.
Introducción .....	12
1.Planteamiento del problema.....	13
2.Objetivos .....	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Metodología .....	17
3.1. Fase 1: Revisión de literatura (Cumplimento al objetivo 1).....	17
3.2. Fase 2: Definir escenarios (Cumplimento al objetivo 2) .....	19
3.3. Fase 3: Formular modelos (Cumplimento al objetivo 3).....	21
3.4. Fase 4: Evaluar escenarios (Cumplimento al objetivo 4) .....	22
3.5. Fase 5: Artículo publicable (Cumplimento al objetivo 5).....	23
4. Revisión de literatura .....	23
4.1 Análisis Bibliométrico .....	23
4.2 Análisis preliminar de literatura.....	33
5. Marco referencial .....	37
5.1 Marco de antecedentes .....	37

5.1.1	Modelado de la red de distribución multi -ítem, multi- escalón y multi- periodo, a través de un modelo determinístico de optimización matemática, en un contexto de logística de ciudad	37
5.1.2	Una nueva Metaheurística hibrida para resolver el problema 2eLIRP .....	38
5.1.3	Una nueva metaheurística hibrida para resolver el problema 2eLIRP Solución de 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 hibrida.....	39
6.	Formulación del modelo matemático.....	45
6.1	Supuestos de la red de distribución.....	45
6.2	Modelo 1 .....	46
6.3	Modelo 2 .....	51
6.4	Modelo 3 .....	54
6.5	Modelo 4 .....	57
6.6	Modelo 5 .....	62
6.7	Modelo 6 .....	67
6.8	Modelo 7 .....	71
6.9	Artículo publicable.....	74
8.	Recomendaciones .....	88
	Referencias Bibliográficas .....	90
	Apéndices.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

**Lista de tablas**

	Pág.
Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda teniendo en cuenta desde 2020 a 2024.....	18
Tabla 2. Índices de los modelos .....	75
Tabla 3. Descripción general de los modelos.....	75

**Lista de figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fase 1: Revisión de literatura .....	19
Figura 2. Fase 2: Definición de escenarios .....	20
Figura 3. Fase 3: Formulación de modelos .....	22
Figura 4. Fase4: Evaluación de escenarios .....	23
Figura 5. Áreas estudiadas por los autores.....	25
Figura 6. Autores más citados.....	27
Figura 7. Palabras Clave .....	29
Figura 8. Países con mayor cantidad de publicación de artículos.....	31
Figura 9 Publicaciones por año.....	32
Figura 10. Red del Modelo de Transporte .....	43
Figura 11. Esquema modelo 1.....	46
Figura 12. Esquema modelo 2 .....	51
Figura 13. Esquema modelo 3 .....	54
Figura 14. Esquema modelo 4 .....	57
Figura 15. Esquema modelo 5 .....	62
Figura 16. Esquema modelo 6 .....	67
Figura 17. Esquema modelo 7 .....	71
Figura 18. Datos Capacidad y demanda modelo 1 .....	79
Figura 19. Datos Capacidad y demanda modelo 1.1 .....	79
Figura 20. Datos Capacidad y demanda modelo 2 .....	80
Figura 21. Datos Capacidad y demanda modelo 2.1 .....	80

Figura 22. Datos Capacidad y demanda modelo 3 .....	81
Figura 23. Datos Capacidad y demanda modelo 3.1 .....	81
Figura 24. Distribución de transporte de pedidos en cada periodo del modelo 4.1 .....	82
Figura 25. Datos Descuento modelo 5 .....	82
Figura 26. Datos Descuento modelo 5.1 .....	83
Figura 27. Datos Capacidad modelo 6 .....	83
Figura 28. Datos Capacidad modelo 6.1 .....	83
Figura 29. Datos Demanda modelo 7 .....	84
Figura 30 Datos Demanda modelo 7.1 .....	84

**Lista de Apéndices**

Apéndice A Modelo 1 .....  
Apéndice B Modelo 1.1 .....  
Apéndice C Modelo 2 .....  
Apéndice D Modelo 2.1 .....  
Apéndice E Modelo 3 .....  
Apéndice F Modelo 3.1.....  
Apéndice G Modelo 4.....  
Apéndice H Modelo 4.1 .....  
Apéndice I Modelo 4.2 .....  
Apéndice J Modelo 5 .....  
Apéndice K Modelo 5.1 .....  
Apéndice L Modelo 6 .....  
Apéndice M Modelo 6.1 .....  
Apéndice N Modelo 7.....  
Apéndice O Modelo 7.1 .....  
Apéndice P Articulo publicable .....

## Resumen

**Título del proyecto:** Análisis del problema de Optimización denominado Diseño de la red de cadena de suministro (SCND por su sigla en inglés) a través de técnicas exactas, considerando diversas estrategias de entrega al consumidor final\*

**Nombre autor:** Jenny Marcela Rincón Silva \*\*

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

**Descripción:** La investigación aborda los desafíos de la entrega eficiente en áreas urbanas densamente pobladas, donde la congestión y los altos costos de combustible complican las operaciones logísticas. Utilizando un modelo de optimización matemática con GAMS, se exploran estrategias de entrega al consumidor final, considerando variables como costos de transporte e inventario. El proyecto diseña una red de distribución de última milla que incluye centros de distribución, tiendas y clientes finales, con el objetivo de minimizar los costos totales de distribución en relaciones B2B (Business to Business) y B2C (Business to Consumer). Se evaluaron múltiples estrategias de entrega utilizando bicicletas, motocicletas y vehículos tipo van, cada uno con ventajas específicas: las motocicletas destacan por su rapidez y eficiencia en entornos urbanos, las bicicletas, aunque más sostenibles, presentan costos más elevados, y las van ofrecen una solución eficiente en términos de costos operativos. Además, se consideraron estrategias como la integración de Parcel Lockers y entrega en el baúl del coche, destacándose por su eficiencia y reducción de costos operativos. El modelo 7, donde se plantea, la entrega directa desde el centro de distribución al cliente por medio del baúl del coche utilizando una combinación de medios de transporte resultó ser la opción más eficiente en términos de costos operativos más bajos que con los demás modelos, proporcionando soluciones rentables y adaptables a diferentes escenarios logísticos. La investigación también se centra en la sostenibilidad, promoviendo prácticas que minimicen el uso de combustibles fósiles y maximicen la eficiencia energética. La elección de métodos de distribución debe equilibrar la eficiencia operativa, los costos y los impactos ambientales, alineándose con las prioridades de sostenibilidad de la empresa. Esta estrategia integrada garantiza la satisfacción de la demanda de manera efectiva y permite adaptarse rápidamente a los cambios del mercado, asegurando una ventaja competitiva duradera.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingeniería físico mecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales.

Director M.Sc. Javier Eduardo Arias Osorio.

### Abstract

**Project title:** Analysis of the Optimization problem called Supply Chain Network Design (SCND) through exact techniques, considering various delivery strategies to the final consumer. \*

**Author name:** Jenny Marcela Rincón Silva \*\*

**Keywords:** supply chain, location decisions, inventory and transportation, multi-item, multiple periods, linear optimization, SCND, a single objective criterion.

**Description:** The research addresses the challenges of efficient delivery in densely populated urban areas, where congestion and high fuel costs complicate logistics operations. Using a mathematical optimization model with GAMS, last-mile delivery strategies are explored, considering variables such as transportation and inventory costs. The project designs a last-mile distribution network that includes distribution centers, stores, and end customers, aiming to minimize total distribution costs in B2B (Business to Business) and B2C (Business to Consumer) relationships. Multiple delivery strategies were evaluated using bicycles, motorcycles, and vans, each with specific advantages: motorcycles stand out for their speed and efficiency in urban environments, bicycles, although more sustainable, have higher costs, and vans offer an efficient solution in terms of operating costs. Additionally, strategies such as the integration of Parcel Lockers and trunk delivery were considered, highlighting their efficiency and reduction in operating costs. Model 7, which proposes direct delivery from the distribution center to the customer via trunk delivery using a combination of transportation means, proved to be the most efficient option in terms of lower operating costs compared to other models, providing cost-effective and adaptable solutions to different logistical scenarios. The research also focuses on sustainability, promoting practices that minimize the use of fossil fuels and maximize energy efficiency. The choice of distribution methods must balance operational efficiency, costs, and environmental impacts, aligning with the company's sustainability priorities. This integrated strategy ensures effective demand satisfaction and allows for quick adaptation to market changes, ensuring a lasting competitive advantage

---

\*Degree work

\*\* Faculty of mechanical physics engineering. School of industrial and business studies. Director M.Sc. Javier Eduardo Arias Osorio.

## Introducción

El comercio electrónico ha experimentado una consolidación 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 preponderante 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.

La presente investigación se centra en la implementación de un modelo de optimización matemática para explorar diversas estrategias de entrega al consumidor final, utilizando el lenguaje de programación GAMS (General Algebraic Modeling System)).

## **1. Planteamiento del problema**

El eslabón final de la cadena de suministro en entornos urbanos enfrenta una serie de desafíos únicos y complejos que requieren una atención especial, estos incluyen la distribución en áreas densamente pobladas, donde se presenta congestión de tráfico, originado altos niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> que contribuyen a la contaminación ambiental. Además, de la necesidad de realizar entregas precisas y rápidas en un entorno de demanda variable añade una componente adicional de complejidad a la operación logística.

En este contexto, el principal objetivo es maximizar la eficiencia en la gestión de estas operaciones finales de la cadena de suministro. Esto implica reducir los costos asociados, que permiten mejorar la rentabilidad de las operaciones logísticas y, de otra parte, impactar positivamente en la competitividad de las empresas que operan en estos entornos urbanos.

La gestión simultánea de múltiples productos y consideraciones temporales, también conocida como la gestión multi producto y multi periodo, es esencial para abordar la complejidad inherente a las operaciones de última milla. Esta gestión debe adaptarse de manera dinámica a las cambiantes necesidades de la demanda y garantizar la entrega oportuna y eficiente de los productos.

En el corazón de la toma de decisiones para abordar estos desafíos complejos se encuentra el uso de modelos determinísticos de optimización matemática. Estos modelos aseguran que las

decisiones tomadas estén fundamentadas en datos precisos y se basen en un marco matemático riguroso. Esto conduce a resultados confiables y reproducibles que pueden guiar eficazmente las operaciones logísticas en entornos urbanos.

La creciente urbanización y densidad de población en las ciudades ha elevado la logística urbana y la última milla a áreas críticas de enfoque. La optimización de este proceso es fundamental para reducir la congestión en las ciudades y minimizar el impacto ambiental asociado con las operaciones logísticas.

La ubicación estratégica de centros de distribución y puntos de entrega juega un papel crucial en la reducción de las distancias de transporte y los tiempos de entrega. Este enfoque contribuye a mejorar la eficiencia general de la cadena de suministro y a reducir los costos logísticos asociados.

Además, la capacidad de adaptarse a diferentes modelos de negocio ya sea Business to Business (B2B) o Business to Customer (B2C), es esencial en un entorno logístico diversificado. Esto permite a las empresas responder de manera efectiva a las necesidades de sus clientes y socios comerciales, manteniendo al mismo tiempo un alto nivel de eficiencia operativa.

El uso de herramientas como el lenguaje de programación GAMS proporciona un modelado intuitivo, eficiencia computacional, integración con solvers externos, interfaz amigable y amplia documentación y soporte. Esto la convierte en una herramienta poderosa y flexible para resolver problemas de optimización en diversos campos, incluyendo la logística.

De acuerdo con el artículo (Cadena & Cadena, 2021), Tendencias en estrategias y tecnología aplicadas a la Logística de ciudad, se resalta la importancia de establecer estrategias innovadoras en procesos y servicios de logística de ciudad, especialmente en el contexto del crecimiento del comercio electrónico, con enfoque en el análisis de tendencias en tecnología y estrategias de negocio en la Cadena de Distribución de la última milla, entendido como el último eslabón de la cadena, asociado a la entrega al cliente final en un entorno urbano. El diseño de las cadenas de suministro se basa en entender las interacciones de la empresa con las organizaciones que mantienen relaciones comerciales.

En resumen, la complejidad de la logística urbana y la última milla requiere un enfoque integral que combine la optimización matemática, la gestión dinámica de la demanda y la adaptación a diferentes modelos de negocio. Este proyecto se propone analizar diferentes escenarios para el diseño de la red de distribución, centrándose en el último eslabón de la cadena de suministro, en la búsqueda de contribuir a la eficiencia operativa de las empresas y la reducción de costos logísticos en entornos urbanos. (Delivery, 2013)

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Analizar el problema de optimización del diseño de la red de cadena de suministro (SCND), mediante técnicas exactas y estrategias de entrega al consumidor final, haciendo uso del lenguaje de programación GAMS.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Revisar literatura científica sobre el diseño de la red de cadena de suministro, considerando estrategias de localización, estrategias de transporte y estrategia de entrega al consumidor final.
2. Definir los aspectos a considerar en los diversos escenarios a analizar con respecto a las estrategias en la red de distribución
3. Formular los modelos matemáticos correspondientes a los escenarios definidos
4. Evaluar los escenarios con varias instancias sintéticas, considerando indicadores de eficiencia operacional.
5. Realizar un artículo publicable sobre el trabajo desarrollado

### 3. Metodología

Las fases que se llevarán a cabo en el desarrollo de proyecto

#### 3.1. Fase 1: Revisión de literatura (Cumplimento al objetivo 1)

En esta etapa, se llevó a cabo un análisis de la actividad científica en torno a las redes de distribución y al diseño de la cadena de suministro, con especial énfasis en la logística de última milla y su aplicación en entornos urbanos. Se abordaron aspectos cruciales de la planificación estratégica, táctica y operativa, centrándose en los modelos de negocio B2B y B2C. El proceso se inició con la identificación de palabras clave, las cuales se utilizaron para construir ecuaciones de búsqueda. Estas ecuaciones fueron posteriormente introducidas en los motores de búsqueda de SCOPUS y WEB SCIENCE, limitando la búsqueda desde el año 2020 hasta la fecha actual.

Se generaron diversas ecuaciones de búsqueda, incorporando términos como "cadena de suministro", "inventario", "transporte", "multi- ítem", "multi- periodo", "un solo periodo objetivo", "diseño de la red de cadena de suministro", "decisiones de localización". Para realizar la búsqueda bibliográfica se tuvieron en cuenta las palabras clave mencionadas anteriormente, ajustadas a operadores booleanos (OR, AND) para lograr una mayor homogeneidad en la cantidad de datos, dando como resultado la ecuación seleccionada para la investigación.

Una vez elegida la ecuación, se procedió a realizar un análisis bibliométrico utilizando el software VOSviewer. Este análisis permitió identificar documentos potenciales para la investigación. Posteriormente, se descargaron y revisaron los títulos, resúmenes y conclusiones de dichos documentos para evaluar su relevancia con respecto al tema de estudio.

Esta fase sienta las bases para la revisión detallada y la selección de documentos pertinentes, así como para el posterior análisis de contenido. La información recopilada se utilizará para desarrollar un marco teórico sólido y diseñar la metodología de investigación adecuada. El objetivo final es contribuir al conocimiento existente en el ámbito de las redes de distribución y el diseño de la cadena de suministro, especialmente en el contexto específico de la logística de última milla y la logística urbana, En la Tabla 1 se puede identificar las ecuaciones planteadas, escogiendo la ecuación 1 para la revisión de literatura.

**Tabla 1.**

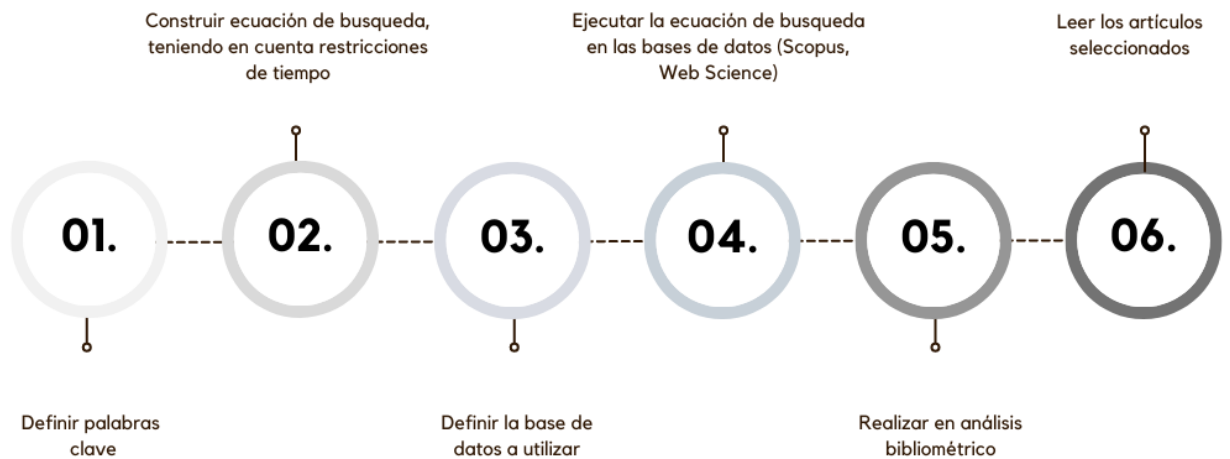
*Ecuaciones de búsqueda teniendo en cuenta desde 2020 a 2024*

Ecuación de Búsqueda	WEB	OF
Teniendo en cuenta desde 2020 a 2024	SCOPUS	SCIENCE
“Supply chain” AND (“inventory” OR “transportation”) AND (“multi-item” OR “multiple periods” OR “a single objective criterion”) AND “Supply Chain Network Design)”	502 documentos	3 documentos
"Supply chain" OR "Network design" AND ("multi-item" OR "multiple periods" OR "a single objective criterion") AND "Supply Chain Network Design" AND "location decisions"	28	38.761
“Supply chain” AND (“location design” OR “city logistics” OR “last mile logistics”) AND (“multi-item” OR “multiple periods” OR “a single	21	0

objective criterion”) AND “Supply Chain Network Design”		
"Supply chain" AND ("inventory" OR "transportation") AND ("multi-item" OR "multiple periods" OR "a single objective criterion") AND "Supply Chain Network Design" AND "location decisions"	27	0

**Figura 1.**

*Fase 1: Revisión de literatura*

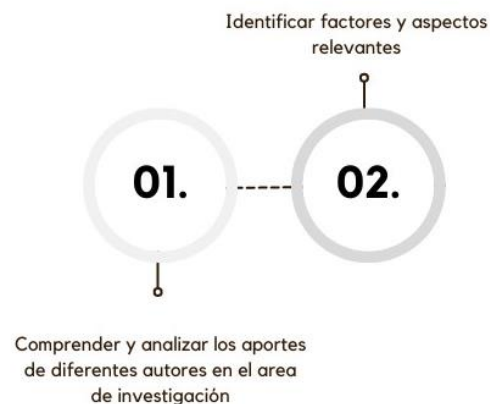


**3.2. Fase 2: Definir escenarios (Cumplimento al objetivo 2)**

El proceso, se inicia con el análisis de la investigación previa llevada a cabo en la fase 1, donde se ha profundizado en la literatura relevante. Tras comprender la base teórica y evaluar las contribuciones de varios autores en el tema, se procede a la identificación de los elementos esenciales para describir los escenarios matemáticos que se van a modelar. Este paso implica establecer la estructura y las condiciones particulares de cada modelo que será desarrollado en el proyecto.

## Figura 2.

### *Fase 2: Definición de escenarios*



Escenarios planteados para el modelo:

Entregas a domicilio por medio de cicla

Entregas a domicilio por medio de moto

Entregas a domicilio por medio de van

Entregas a domicilio donde el modelo escoge que tipo de transporte es más económico.

Entregas a domicilio donde el modelo escoge que tipo de transporte es más económico o recogida en tienda por parte del cliente.

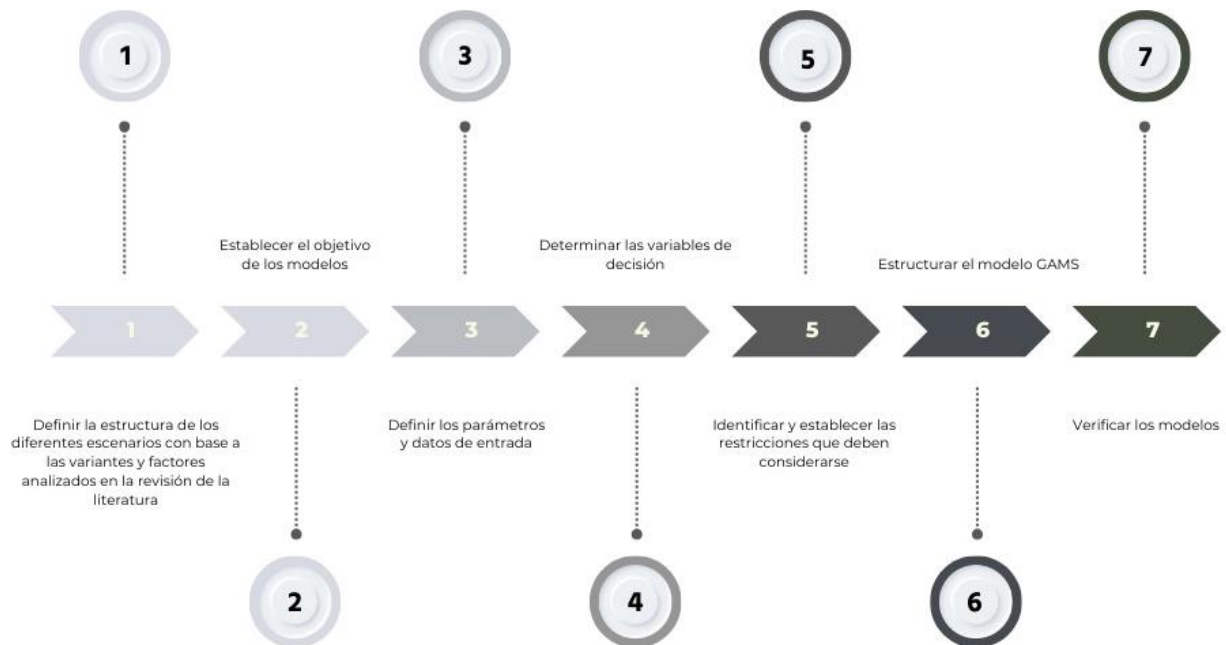
Entregar por medio de Parcel Lockers

Entregas directas desde el centro de distribución al baúl del coche del cliente (Trunk of Car)

### **3.3. Fase 3: Formular modelos (Cumplimento al objetivo 3)**

Una vez que se han identificado los factores a analizar, se comienza por identificar los aspectos que adquirirán importancia en cada escenario a modelar. Esto se realiza considerando el diseño de una red de distribución multi- ítem, multi- escalón y multi- periodo, mediante un modelo determinístico de optimización matemática dentro del contexto de la logística urbana. Se emplearán métodos exactos y se explorarán diferentes escenarios en la modelación. En cada modelo, se identifican aspectos clave como la función objetivo, que se orienta a minimizar costos, las variables a estudiar y las restricciones que afectarán al modelo.

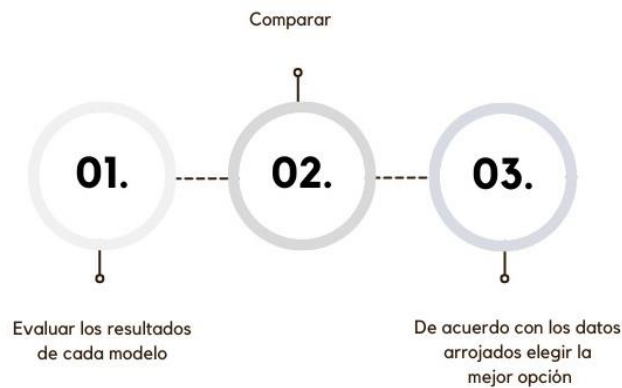
Se abordarán modelos de dos escalones, explorando diversas situaciones como las capacidades distintas, diferentes opciones de entrega al consumidor, y envíos a domicilios. A partir de estos escenarios, se procede a desarrollar un modelo matemático que permita identificar dichos factores y validar cada modelo.

**Figura 3.***Fase 3: Formulación de modelos***3.4. Fase 4: Evaluar escenarios (Cumplimiento al objetivo 4)**

Al comparar los resultados obtenidos en la fase 3, se identificará el modelo que produce la solución óptima. En situaciones en las que la solución óptima no sea alcanzada, se procederá a buscar una solución factible.

**Figura 4.**

*Fase4: Evaluación de escenarios*

**3.5. Fase 5: Artículo publicable (Cumplimento al objetivo 5)**

En esta etapa, se llevará a cabo la recopilación y presentación de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto denominado Análisis del problema de Optimización denominado Diseño de la red de cadena de suministro a través de técnicas exactas, considerando diversas estrategias de entrega al consumidor final.

**4. Revisión de literatura****4.1 Análisis Bibliométrico**

Este estudio detalla la metodología y enfoque empleados en un análisis bibliométrico focalizado en una revisión sistemática, mediante la aplicación de técnicas de análisis basadas en documentos y publicaciones mediante investigaciones y artículos extraídos de las bases de datos científicas reconocidas, Scopus y Web of Science (WoS). Estas plataformas son ampliamente reconocidas por ofrecer contenido confiable y de alta calidad en diversas disciplinas académicas y

científicas respaldando la revisión sistemática mediante la obtención de información sustantiva y confiable proveniente de fuentes académicas reconocidas.

Se desarrolló una ecuación de búsqueda que comprende y categoriza la temática. Esta ecuación se basa en términos clave en inglés relacionados con decisiones de localización de última milla enfocado al consumidor final, como "Supply chain" AND ("inventory" OR "transportation" ) AND ( "multi-item" OR "multiple periods" OR "a single objective criterion" ) AND "Supply Chain Network Design" AND "location decisions". La elección de términos clave en inglés se realizó de acuerdo con las instrucciones específicas de cada repositorio de datos. Se destaca que se siguieron las instrucciones proporcionadas por Scopus y WoS para optimizar la búsqueda. Se aplican restricciones para limitar la información a la temática en estudio, teniendo en cuenta el rango de artículo publicados entre los años 2020 a 2024.

Como consecuencia del análisis llevado a cabo, se logra la identificación de 27 documentos en cada una de las bases de datos consideradas. En el contexto específico de Scopus, se ha observado una presencia sobresaliente en diversas áreas temáticas, distribuidas de la siguiente manera: un 21,9 % en Negocios, Gestión y Contabilidad; un 21,9 % en Ingeniería; un 19,2 % en Ciencias de la Decisión; un 11,0 % en Informática; un 9,6 % en Matemáticas; un 6,8 % en Economía, Econometría y Finanzas; un 4,1 % en Ciencias Ambientales; un 2,7 % en Energía; un 1,4 % en Medicina; y un 1,4 % en Ciencias Sociales.

Estos descubrimientos subrayan la relevancia de los aspectos relacionados con las decisiones de localización de última milla orientadas al consumidor final, un tema abordado de manera detallada por los autores. En lugar de simplemente describir estas distribuciones, es fundamental analizar las razones detrás de la prominencia de ciertas áreas temáticas. Por ejemplo, la alta representación en Negocios, Gestión y Contabilidad e Ingeniería puede reflejar la

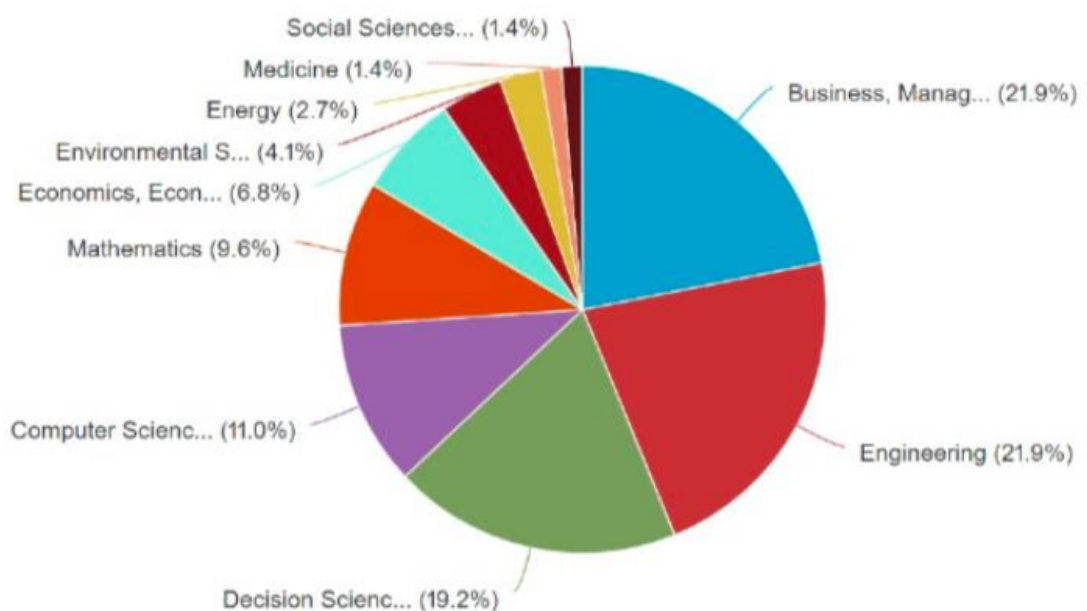
importancia de la optimización logística y la eficiencia operativa en la cadena de suministro. La presencia en Ciencias de la Decisión y Matemáticas destaca el papel de los modelos analíticos y algoritmos en la toma de decisiones para la última milla. Además, las contribuciones desde la Economía y las Ciencias Ambientales sugieren un interés en los impactos económicos y sostenibles de estas estrategias logísticas.

La Figura 5 no solo representa visualmente estas áreas de estudio, sino que también invita a una interpretación más profunda sobre cómo estas disciplinas interactúan y contribuyen al campo de la logística de última milla. Este enfoque analítico revela tendencias y conexiones que podrían pasar desapercibidas en un análisis meramente descriptivo, ofreciendo una comprensión más completa y estratégica de la investigación en este dominio.

### Figura 5.

*Áreas estudiadas por los autores*

Documents by subject area



En la Figura 6, se presenta la búsqueda relacionada mediante la aplicación de la ecuación de búsqueda por autores, destacando la conexión entre dicha búsqueda y las publicaciones respectivas. Este análisis revela tanto la relación conjunta como individual entre las obras de los autores. Ivanov D. destaca como el autor más citado, con 74 citas, seguido por Dolgui A. con 36, Govindan K. con 30, Tavakkoli-Moghaddam R. con 28, y Roy SK con 26. Diabat A. y Wang Y. cuentan con 25 citas cada uno, mientras que Sokolov B., Torabi SA, Jannarzadeh A., Li Y., y Daskin MS tienen 23 citas cada uno. Farahani RA cierra la lista con 21 citas.

Más allá de estas cifras, es crucial analizar la interconexión y el impacto de estos autores en el campo de estudio. Ivanov D., como el autor más citado, posiblemente indica una fuerte influencia en la configuración de las decisiones de localización de última milla y podría estar marcando tendencias en el desarrollo de estrategias logísticas avanzadas. La presencia de múltiples autores con citas características sugiere una red colaborativa robusta en la investigación, lo que facilita la transferencia de conocimientos y la integración de diferentes enfoques metodológicos.

La Figura 6 no solo muestra quiénes son los autores más citados, sino también cómo sus trabajos están interrelacionados. Los enlaces entre los nodos de los grafos representan las colaboraciones y citas cruzadas, reflejando la densidad y cohesión de la investigación en este ámbito. Analizar estos enlaces puede revelar patrones de colaboración y áreas emergentes de investigación, ofreciendo una visión más completa de las dinámicas de conocimiento y la evolución del campo. Este enfoque permite identificar no solo a los autores influyentes, sino también los temas y metodologías que están configurando el futuro de la logística de última milla.

**Figura 6.***Autores más citados*

En la Figura 7, el análisis de Scopus revela que la palabra clave más representativa es "Cadenas de Suministro", con un total de 8 ocurrencias, seguida de cerca por "Toma de decisiones" con 7 apariciones. También destacan otras palabras clave como "Ubicación", "Desarrollo Sostenible" y "Gestión de la Cadena de Suministro", cada una con 6 menciones. Además, términos como "Sistemas estocásticos", "Modelos estocásticos" y "Algoritmos genéticos" aparecen 5 veces cada uno.

Más allá de la simple descripción de frecuencias, estos resultados indican varios puntos clave en la investigación actual. La predominancia de "Cadenas de Suministro" y "Toma de decisiones" sugiere una fuerte atención hacia la optimización de procesos logísticos y la importancia de estrategias eficaces en la gestión de la cadena de suministro. La presencia de

"Desarrollo Sostenible" muestra una creciente preocupación por integrar prácticas ecológicas y sostenibles en la logística, lo cual es vital en un mundo cada vez más consciente del medio ambiente.

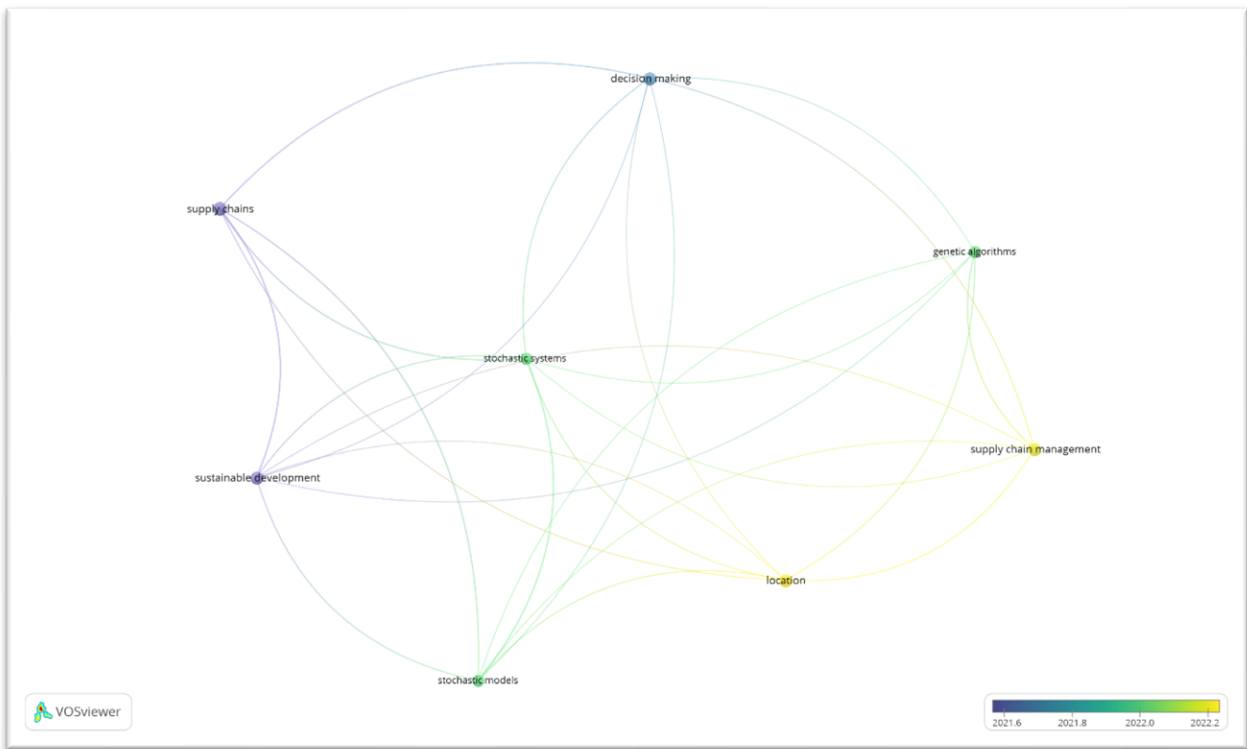
Los términos "Sistemas estocásticos" y "Algoritmos genéticos" revelan la adopción de métodos avanzados y modelos matemáticos para manejar la incertidumbre y la complejidad en la gestión de la cadena de suministro. Estos enfoques avanzados son esenciales para mejorar la precisión en las predicciones y optimizaciones logísticas.

El análisis también debería considerar la interconexión entre estas palabras clave. Por ejemplo, el vínculo entre "Toma de decisiones" y "Sistemas estocásticos" puede indicar una tendencia hacia la utilización de modelos probabilísticos para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Del mismo modo, la relación entre "Desarrollo Sostenible" y "Gestión de la Cadena de Suministro" podría reflejar esfuerzos en la integración de prácticas sostenibles en los procesos logísticos tradicionales.

En resumen, no solo se identifican las palabras clave más frecuentes, sino que también se extraen perspectivas sobre cómo estas áreas se entrelazan y evolucionan, proporcionando una visión más profunda y analítica del panorama actual de la investigación en la cadena de suministro.

**Figura 7.**

*Palabras Clave*



En la figura 8, el análisis de datos de Scopus revela que Turquía se destaca como el país líder en investigación sobre el tema, con un total de 153 citaciones. Le sigue China con 91 citaciones, Estados Unidos con 65, Irán con 53 y Francia con 47. Este ranking no solo muestra la cantidad de investigaciones realizadas en cada país, sino que también destaca la contribución de estas naciones en el ámbito investigativo.

Para un análisis más profundo, es importante considerar el contexto y las posibles razones detrás de estas cifras. La posición de Turquía como líder podría estar relacionada con un enfoque creciente en la logística urbana y la última milla debido a su rápida urbanización y expansión económica. China y Estados Unidos, con sus grandes economías y avances tecnológicos, continúan

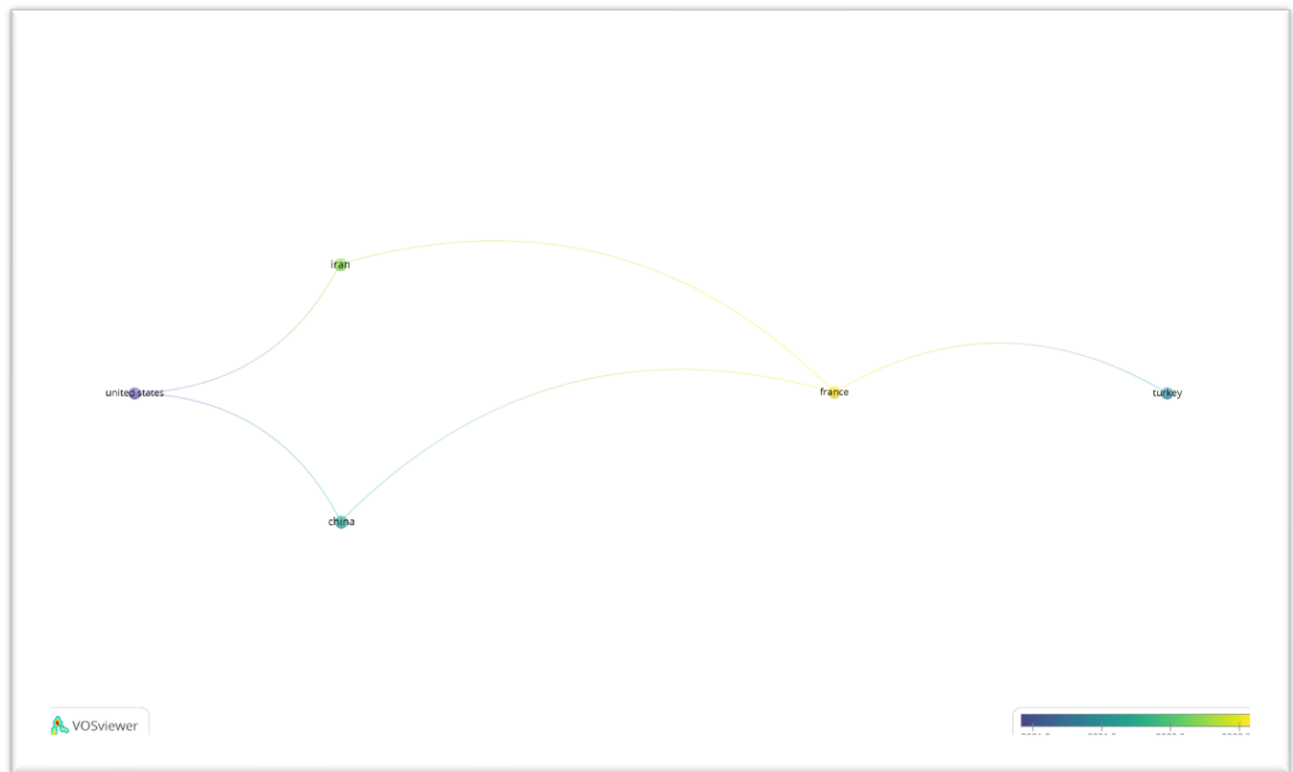
siendo actores clave en la investigación y desarrollo de nuevas estrategias logísticas. La presencia de Irán y Francia en la lista sugiere un interés sustancial y recursos dedicados a mejorar las prácticas de logística y cadena de suministro, posiblemente influenciados por políticas gubernamentales y necesidades comerciales específicas.

Además, los enlaces entre los nodos de los grafos podrían indicar colaboraciones internacionales y redes de investigación. Entender cómo estos países colaboran y comparten conocimientos podría proporcionar valiosas perspectivas sobre las tendencias globales y las mejores prácticas en logística de última milla.

En resumen, no solo se enumeran los países con más citas, sino que también se exploran las implicaciones de estas estadísticas, ofreciendo una visión más analítica de las contribuciones y tendencias globales en la investigación logística.

**Figura 8.**

*Países con mayor cantidad de publicación de artículos*

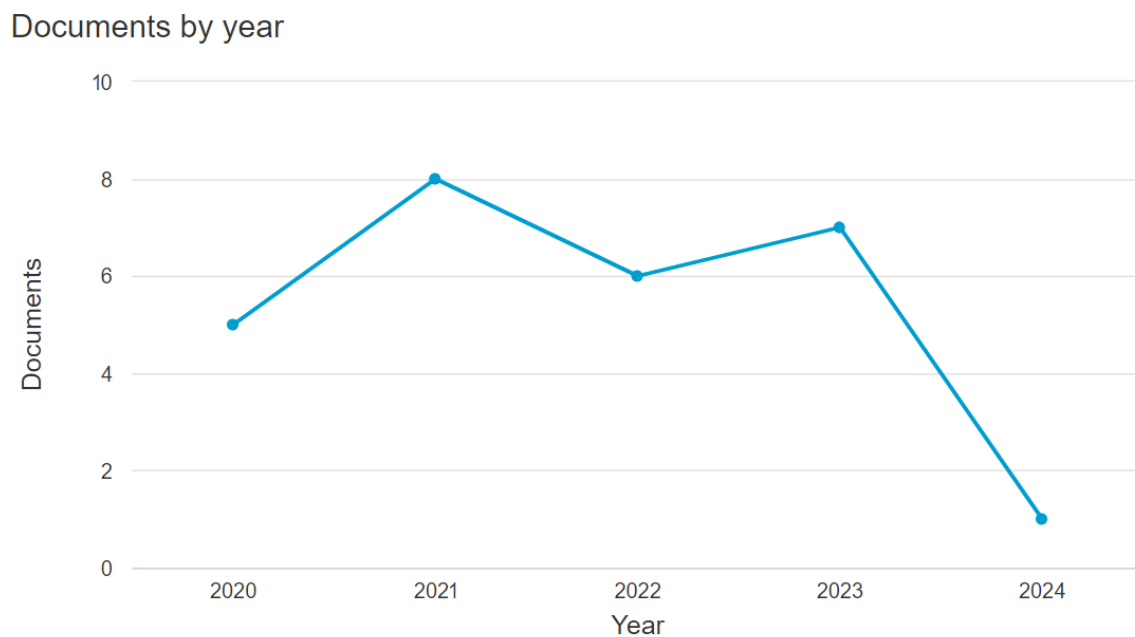


En la Figura 9, se presenta un análisis de las publicaciones realizadas desde el año 2020 hasta el 2024. Este periodo se eligió para captar las tendencias y desarrollos recientes en el campo, considerando que los avances tecnológicos y las prácticas en logística de última milla han evolucionado en estos años. Además, la creciente expansión del comercio electrónico y la necesidad de optimizar la cadena de suministro se intensificaron en gran parte debido a la pandemia de COVID-19, lo que ha impulsado la investigación en esta área.

El año con mayor cantidad de publicaciones fue el 2021, con un total de 8, lo que sugiere un pico de interés e investigación posiblemente motivado por los cambios en las dinámicas de consumo y distribución durante la pandemia. En 2023 se publicaron 7 artículos, lo que indica una continuidad en el interés y la relevancia del tema. En 2022 se registraron 6 publicaciones, mientras que, en 2020, al inicio del período de estudio, se realizaron 5. Cabe mencionar que hasta el año 2024 se ha identificado una única publicación, razón por la cual se extendió la búsqueda hasta dicho año. Este análisis no solo describe la distribución temporal de las publicaciones, sino que también sugiere un patrón de investigación y desarrollo en respuesta a los desafíos y oportunidades emergentes en la logística de última milla durante y después de la pandemia.

### Figura 9

*Publicaciones por año*



## 4.2 Análisis preliminar de literatura

La configuración de la red de la cadena de suministro de una organización reviste gran importancia, ya que constantemente se llevan a cabo suministros para la distribución de productos y bienes a diversos minoristas o clientes. Este diseño abarca la elaboración de un mapa e identificación de las variadas opciones de suministro, donde se evalúan minuciosamente los costos vinculados al transporte, la logística, los inventarios y la producción, es por esto que se analiza literatura enfocada al diseño de red de cadena de suministro y a estrategias de entrega al consumidor final, como se evidencia en (A. Yılmaz & Demirel, 2022) donde plantearon los novedosos modelos sostenibles de entrega de última milla en logística de ciudad basándose principalmente en el comercio electrónico donde se realiza un estudio para evaluar que método (El crowdsourcing delivery, C&C, PP, PUDO, locker, RDB, in-car delivery, cargo bike, drones y AGVs) se acopla a satisfacer las necesidades de los clientes, disminución de tiempos y costos y brindando sostenibilidad para el medio ambiente.

(Das et al., 2023) En su formulación de gestión integrada de la cadena de suministro y decisiones de ubicación, se busca reducir de manera efectiva el costo logístico total, el tiempo de envío, el costo de inventario y las emisiones de carbono en una red de transporte robusta. La investigación aborda la identificación de ubicaciones óptimas para instalaciones y las cantidades de mercancías distribuidas mediante distintos modos de transporte. La validación del modelo y del procedimiento de solución se realiza a través de ejemplos numéricos, incluyendo la discusión de decisiones relacionadas con la reducción de emisiones de dióxido de carbono generadas por los sistemas de transporte. La solución de compromiso óptima se presenta mediante proposiciones, sugiriendo que este enfoque de toma de decisiones puede extenderse a otras áreas, como sistemas de inventario de producción, modelos de cadena de suministro sostenible, aplicaciones financieras

entre otras. En relación con lo anterior, es importante destacar (Ge et al., 2022) en su investigación analizaron el problema de ubicación de instalaciones múltiples para la cadena de suministro de productos frescos, donde presenta un modelo de que incorpora un escenario empírico y donde es relevante señalar que la confiabilidad de la ubicación de las instalaciones puede mejorarse sin un aumento en los costos operativos. Por lo cual proporciona una perspectiva ilustrativa sobre cómo la implementación de enfoques de modelado complementarios puede potenciar la eficacia de las soluciones de localización de instalaciones.

(L. Wang et al., 2023) investigaron un problema de diseño de la red de suministro para el comercio electrónico transfronterizo. La cadena de suministro consta de proveedores, centros de distribución regionales y centros de distribución. Cuyo objetivo consiste en determinar simultáneamente las decisiones de ubicación de los centros de distribución regionales y las decisiones de inventario para el reabastecimiento y la entrega coordinados. Se formuló este problema como un programa no lineal de números enteros mixtos y desarrollaron un algoritmo de optimización de Lipschitz y una heurística iterativa dando como resultado Un hallazgo interesante es que la capacidad de los centros de distribución regional influye en gran medida en la toma de decisiones general, mientras que la de los países en desarrollo tiene un efecto mínimo. (Zennaro et al., 2022) También se basaron en la investigación del comercio electrónico teniendo en cuenta el creciente uso por parte de los consumidores a raíz del COVID-19 su investigación consistió en identificar las principales áreas de investigación logística relacionadas con la implementación del comercio electrónico y los factores e indicadores clave de desempeño que deben tenerse en cuenta para cada área de investigación logística, con especial atención a los aspectos sostenibles. Para ello se lleva a cabo un análisis bibliográfico estructurado y exhaustivo, del cual dio como resultado las principales áreas involucradas Cadena de Suministro (SCND); Logística de Salida (OL); Logística

Inversa (RL); Almacenamiento (WR); y TI y gestión de datos, identificado para cada una, factores clave, estrategias e indicadores de desempeño. De acuerdo con el análisis es importante mencionar los costos y las estrategias proactivas y/o preventivas en SCND. De hecho, las estrategias preventivas y proactivas podrían disminuir el impacto de una interrupción en términos de costos en la cadena de suministro. Así mismo (Cadena & Cadena, 2021) destacaron la importancia de implementar y desarrollar nuevas estrategias innovadoras en la cadena de distribución, acoplándose a las necesidades del cliente e implementando nuevas estrategias de entrega como por ejemplo la ubicación de puntos de recogida en tiendas cercanas al cliente, el despacho desde el almacén más cercano a partir de una adecuada gestión del inventario en red y soportada en una eficiente tecnología de información que permita la trazabilidad del pedido por parte tanto de la empresa como del cliente basándose principalmente en el comercio electrónico.

Por su parte (Shavarani et al., 2021) desarrollo un estudio cuyo propósito es crear un modelo matemático bio-objetivo que tome en cuenta tanto el número óptimo como la ubicación espacial de las instalaciones a partir de un conjunto de ubicaciones candidatas. El objetivo principal es la minimización simultánea de la distancia total de viaje, los costos y las demandas perdidas teniendo en cuenta el uso de drones, donde se resalta la importancia de esta tecnología para que las entregas sean más rápidas y eficientes.

(Mrabti et al., 2022) Aborda los problemas del diseño de redes de distribución y el intercambio de ganancias en un contexto colaborativo. Proponemos modelos matemáticos para comparar el desempeño de tres escenarios con múltiples periodos basados en varios indicadores de sostenibilidad: costos logísticos, emisiones de CO<sub>2</sub>, oportunidades de empleo creadas, nivel de ruido y riesgo de accidentes. Por lo cual se contempla el problema que existe al entregar productos a los minoristas a través de almacenes y centros de distribución conjuntos, los cuales tienen

capacidades limitadas. Considerando la importancia que tiene la entrega de un lugar a otro teniendo en cuenta costos y sostenibilidad, concluyendo así que a medida que aumenta el número de vehículos, los costes y las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen mientras que aumenta el número de oportunidades de empleo creadas.

(Y. Wang et al., 2021) Realizaron estudio de las estrategias RS y TWA en redes logísticas de reciclaje multi depósito. La estrategia RS puede mejorar eficazmente la utilización de recursos y optimizar la configuración de recursos en las redes logísticas tanto en centros de distribución como en rutas. Donde se establece un modelo matemático bi-objetivo para minimizar el costo operativo total y la cantidad de vehículos para resolver el problema de ruta de vehículos de reciclaje de múltiples depósitos, también se diseñó un algoritmo heurístico híbrido, que incluye un algoritmo de agrupamiento de medias  $k$  3D y un algoritmo NSGA-II, para abordar MRVRPRSTWA (Rutas para vehículos de reciclaje en múltiples depósitos). Los resultados indican que las estrategias RS y TWA pueden optimizar los servicios de reciclaje y la asignación y utilización de recursos y mejorar la eficiencia operativa, promoviendo así el desarrollo sostenible de la industria logística.

Asu vez (Ö. F. Yılmaz et al., 2021) en su estudio aborda el problema de diseño de la red RSC a través de un modelo de optimización estocástico de enteros mixtos de dos etapas para hacer frente a la incertidumbre causada por el impacto devastador del efecto dominó, diseño que garantice la sostenibilidad a largo plazo, el modelo propuesto se valida mediante experimentos computacionales basados en datos extraídos de un caso real. Los resultados computacionales muestran que el efecto dominó aumenta el nivel de emisión y costa hasta un 40%.

(Aldrighetti et al., 2021) En su artículo presentó una revisión integral y estructurada de los estudios de SCND bajo riesgos de disrupción en el área de SCM industrial y logística. El objetivo

principal fue analizar los efectos de la disrupción en términos de diferentes factores de costos que se introducen específicamente a través de la planificación de inversiones proactivas en robustez y adaptación paramétrica/estructural debido al riesgo de disrupción.

(BÜYÜKÖZKAN et al., 2019) Destaca la vital importancia de los metadatos y el análisis empresarial, elementos cruciales para el progreso de las tecnologías digitales. En este contexto, la investigación propone una metodología específica con el objetivo de seleccionar la herramienta SCA que mejor se ajuste a las necesidades. Asimismo, resalta que la última milla no solo debe centrarse en la planificación de la gestión del transporte, sino también en aspectos cruciales como la protección del medio ambiente, el ahorro energético, la seguridad y la reducción del tráfico.

## **5. Marco referencial**

### **5.1 Marco de antecedentes**

Para la presente investigación de tienen en cuenta los siguientes trabajos de grado Para la presente investigación de tienen en cuenta los siguientes trabajos de grado realizados por compañeros estudiantes anteriormente los cuales se relacionan con el tema estudiado

#### ***5.1.1 Modelado de la red de distribución multi -ítem, multi- escalón y multi- periodo, a través de un modelo determinístico de optimización matemática, en un contexto de logística de ciudad***

En un primer enfoque, (Isabel et al., 2022) las autoras se dedican a la formulación y evaluación de diversos escenarios a través de la optimización matemática para abordar el problema del diseño de la red de distribución. Este problema se caracteriza por ser multi- ítem, multi-escalón, multi -periodo y determinístico, enmarcado en el contexto logístico urbano y empleando el lenguaje de programación en GAMS.

En la construcción del modelo, el autor propone seis escenarios que comparten una dinámica común, variando en la evaluación de distintas variables en función de la iteración analizada. Como conclusión, destaca la importancia de contar con un sistema de información de inventarios y disponer de inventarios iniciales, ya que su ausencia conlleva un aumento en los costos. Además, señala la viabilidad de mantener inventarios en el tercer nivel de la cadena de suministro. Asimismo, se identifica que el envío directo tiende a ser más costoso y se observa con mayor frecuencia cuando no hay existencias de inventarios disponibles.

### ***5.1.2 Una nueva Metaheurística híbrida para resolver el problema 2eLIRP***

En este estudio, los investigadores (Arias-Osorio & Camacho-Pinto, 2021) se dedican a la formulación de un problema de optimización que integra decisiones logísticas relacionadas con la localización, el transporte y el inventario en un contexto multi- periodo de una red de distribución de dos escalones, denominado 2eLIRP. Para abordar este problema, los autores implementaron una metaheurística híbrida que combina Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos y la heurística del Vecino más Cercano.

Los resultados revelan que esta metaheurística proporciona soluciones con costos inferiores a los enfoques clásicos. Además, destaca las oportunidades generadas por las propiedades de los algoritmos base utilizada, ofreciendo así una sólida perspectiva para explorar métodos de solución con diversas ventajas.

### ***5.1.3 Una nueva metaheurística híbrida para resolver el problema 2eLIRP Solución de 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***

(Córdoba, 2020) En su investigación, se propone un modelo de programación entera mixta con el objetivo de minimizar los costos logísticos asociados al transporte e inventario, al mismo tiempo que aborda restricciones de capacidad. Para llevar a cabo este estudio, el autor ha desarrollado una metaheurística híbrida que combina algoritmos genéticos y búsqueda tabú. Este enfoque ha demostrado una reducción en el tiempo computacional y ha proporcionado dos configuraciones dependiendo del modelo:

- a. En el caso de una población de 100 individuos, se recomienda ejecutar la metaheurística con dos búsquedas tabú, tanto antes como después del algoritmo genético.
- b. Para una orientación hacia la eficiencia computacional, la mejor configuración se logra al mantener los factores estudiados en un nivel bajo.

## **5.2 Marco teórico**

### ***Cadena de suministro***

(Castro, 2015) menciona que La cadena de suministro se orienta completamente hacia la creación de valor mediante la eficiente gestión logística de las funciones empresariales, por tanto, las actividades adquieren valor para la empresa si, y solo si, también generan valor para el cliente. Este principio se sustenta en tres acciones fundamentales: proporcionar al cliente el producto en el momento y lugar precisos, conforme a las especificaciones exactas que ha solicitado. De esta manera, es cómo un producto no solo agrega valor para el cliente, sino también para toda la cadena de suministro y sus diversos integrantes.

Coincidentemente, (Kotler & Keller, 2012) también conceptualizan la cadena de suministro como un extenso canal de marketing. enfatizando que este canal no solo conecta a empresas vendedoras con compradores potenciales, sino que también abarca todo el proceso, desde las materias primas y componentes hasta los productos finales destinados al consumidor final.

En conjunto, estas perspectivas convergen para destacar la naturaleza integrada y completa de la cadena de suministro. Desde la producción inicial hasta la entrega final al consumidor, la cadena de suministro se percibe como una red holística que abarca todas las etapas involucradas en la creación y distribución de un producto.

### ***Gestión de cadena de suministro***

Según (García, 2017) la gestión de cadena de suministro va más allá del simple concepto de "justo a tiempo". Mientras que el enfoque justo a tiempo se centra en abordar los problemas relacionados con los niveles de inventario, la Gestión de Cadenas de Suministro abarca mucho más. No se limita únicamente a examinar la gestión de inventarios y almacenamiento de materias primas entre proveedores y fabricantes, sino que adopta un enfoque integral que considera todos los elementos del proceso de producción, tanto los provenientes de los proveedores de insumos como los de los distribuidores de productos terminados. Es importante mencionar que para lograr esta gestión de cadena de suministro es esencial contar con sistema de información donde sea posible interactuar con los clientes y proveedores, incrementando así los niveles de productividad.

### ***Distribución enfocada a la cadena de suministro***

Según menciona (Castro, 2015), La trazabilidad de la distribución se ha convertido en un aspecto crucial en todos los subsectores, ya que ha ganado relevancia en los últimos años. Su función principal radica en seguir el movimiento de un producto hacia adelante a lo largo de cada

eslabón de la cadena de suministro, proporcionando un historial detallado de su ubicación y los tiempos empleados para llegar a su destino. Además, la trazabilidad desempeña un papel vital al verificar la autenticidad y legitimidad de un producto. Este proceso se lleva a cabo mediante el conocimiento detallado de su cadena de suministro y el riguroso seguimiento de cada paso que ha tomado para llegar al cliente final.

### *Optimización matemática*

(Baquela & Redchuk, 2013) Indica que Las técnicas de optimización tienen como objetivo principal establecer la política que permita maximizar o minimizar la respuesta del sistema. Esta respuesta, por lo general, se manifiesta a través de indicadores como "Costo", "Producción", "Ganancia", entre otros. Este indicador, conocido como objetivo, se convierte en una función específica de la política seleccionada. A su vez, la función asociada recibe el nombre de función objetivo. Como lo menciona (Universidad politecnica de cartagena, 1999) se encuentra fundamentada por 3 elementos esenciales:

- Variables de decisión: En la formulación de problemas de optimización, el punto de partida fundamental es la elección cuidadosa de las variables independientes que mejor describan los posibles diseños candidatos y las condiciones de funcionamiento del sistema. Se opta por variables independientes que ejerzan un impacto considerable en la función objetivo, ya que estas desempeñan un papel esencial en la toma de decisiones. Comúnmente se representan las variables independientes mediante vectores columna de  $\mathbb{R}^n$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

O en vectores fila de la siguiente manera

$$\mathbf{x}^T = (x_1, \dots, x_n)$$

Aunque para los casos  $n = 1, 2$  y  $3$  se emplearán las notaciones usuales de  $x$ ,  $(x; y)$  y  $(x; y; z)$  respectivamente.

- Restricciones: Una vez que se han identificado las variables independientes, el siguiente paso implica establecer, a través de ecuaciones o inecuaciones, las relaciones que existen entre estas variables de decisión. Estas relaciones surgen debido a diversas razones, como restricciones en el sistema, leyes naturales o limitaciones tecnológicas, y se conocen como las restricciones del sistema. En este contexto, podemos clasificar las restricciones en dos tipos distintos:

- Restricción de igualdad

$$h(\mathbf{x}) = h(x_1, \dots, x_n) = 0$$

- Restricción de desigualdad

$$g(\mathbf{x}) = g(x_1, \dots, x_n) \leq 0$$

- Función objetivo: En última instancia, el componente final en un problema de optimización es la función objetivo, también conocida como índice de rendimiento o criterio de elección. Esta función desempeña un papel crucial al determinar los valores óptimos de las variables de decisión que resuelven el problema de optimización. Su propósito es identificar los valores más adecuados para las variables de decisión.

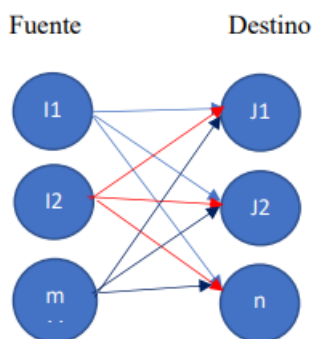
Independientemente del criterio adoptado, en el ámbito de la optimización matemática, el término "mejor" siempre indica los valores de las variables de decisión que generan el mínimo o máximo (según el criterio utilizado) de la función objetivo seleccionada.

### *Modelos de transporte*

La construcción de un modelo de transporte requiere la consideración de parámetros clave, tales como suministros, demandas y costos unitarios. Es crucial tener presente que el propósito fundamental de este modelo es minimizar los costos totales asociados con la distribución de mercancías, al tiempo que se cumplen las restricciones de oferta y demanda. Los modelos de transporte se visualizan de manera efectiva mediante una red, como se ilustra a continuación (Ariza & Llinás, 2019).

#### *Figura 10.*

##### *Red del Modelo de Transporte*



*Fuente:* Tomado de (Ariza & Llinás, 2019)

En esta representación gráfica de la red del modelo de transporte, se observan  $m$  orígenes y  $n$  destinos, cada uno identificado por un nodo. Los arcos simbolizan las rutas que conectan los orígenes con los destinos.

### *Inventario*

(Durán, 2012) Destaca que la administración del inventario es esencial para las funciones del gerente financiero, ya que permite determinar la cantidad de inventario a mantener para evitar faltantes y costos innecesarios de almacenamiento. Además, ayuda a establecer la fecha de colocación de órdenes o producción de inventario, la cantidad de unidades a solicitar en cada orden y el tipo de inventario que requiere mayor atención. Estas decisiones se toman considerando la minimización de la inversión en inventarios para reducir costos y optimizar utilidades, así como enfrentar la demanda para evitar pérdida de clientes. En resumen, la administración del inventario juega un papel crucial en el equilibrio entre eficiencia financiera y satisfacción del cliente. Así mismo (Ponsot B, 2008) Resalta la importancia de los inventarios en la cadena de suministro, es necesario contar con almacenes que actúen como amortiguadores, evitando o retrasando posibles interrupciones en la actividad ante la escasez de insumos. Asimismo, cumplen la función de proteger a la organización frente a incrementos no previstos en la demanda.

### ***Logística de ciudad***

(Rózga, 2021) Indica que la logística urbana se fundamenta en los mismos procesos que constituyen la esencia de la logística en todas sus dimensiones. Entre estos procesos, se encuentran el transporte, el almacenamiento, la configuración espacial de las redes, el suministro de energía y agua, y la gestión de desechos, entre otros. Estos elementos, en conjunto, dan forma a todas las acciones que configuran el ciclo diario de vida en la ciudad. La diferencia clave radica en el receptor de estos procesos y el valor agregado, que se traduce en beneficios no financieros, tales como la satisfacción de los ciudadanos, la cantidad de residentes urbanos, y la percepción positiva de la ciudad, elementos que contribuyen a su potencial económico. Así mismo (Fernando et al., 2013) Resalta que el transporte de carga representa un elemento integral de la

movilidad urbana, siendo tanto un factor de influencia como un componente impactado por otros.

## **6. Formulación del modelo matemático**

A continuación, se desarrollan modelos matemáticos siguiendo la metodología establecida. La formulación de los modelos comienza con la identificación de los supuestos de la red de distribución, seguida por la presentación de cada uno de los modelos.

Estos modelos se centran en la logística urbana, considerando una variedad de medios de transporte y el empleo de tecnologías que mejoran la eficiencia del proceso de entrega.

### **6.1 Supuestos de la red de distribución**

- El objetivo es minimizar los costos de los tres eslabones de la red de cadena de suministro
- El modelo tiene tres niveles donde el primer nivel se encuentra el centro de distribución, el segundo nivel se encuentran los almacenes locales, donde se distribuyen los productos y en el tercer nivel se encuentra el cliente o minorista
- El nivel 3 se encuentra en un entorno urbano
- Demanda conocida y variable por periodo
- En el nivel 3 se puede considerar envíos a empresa B2B o consumidor B2C
- Se tiene en cuenta entrega a domicilio o recogida en tienda
- Horizonte de tiempo discreto y finito
- Capacidad de almacenamiento distinta para cada nivel.
- Cada vehículo puede realizar máximo una ruta por periodo
- La capacidad máxima de cada vehículo no puede ser excedida
- Los clientes (Nivel 3) son atendidos por solo un vehículo

- Cada ruta inicia y termina en el mismo punto
- Se considera inventarios en los tres niveles

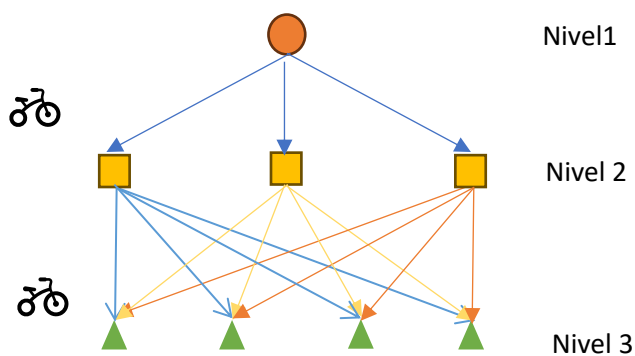
Se plantean siete modelos que abordan la estrategia de entrega al consumidor final, considerando centros de distribución, tiendas y clientes minoristas. A continuación, se describe cada modelo, así como la función objetivo y las restricciones contempladas.

## 6.2 Modelo 1

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio por medio de cicla.

**Figura 11.**

*Esquema modelo 1*



### 6.2.1 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]

### 6.2.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CH2_{jkt}$ : 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  $t$ .

$C21_{ijkt}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$C32_{jn}$ : Costo de enviar de  $j$  a  $n$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$D_j$ : Demanda de producto.

$Capacidad1_i$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $i$ .

$Capacidad2_j$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $j$ .

Variables

$Of$ : Función objetivo

$X21_{ijkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$X32_{jnkt}$ : Unidades enviadas por cada  $j$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$S2_{kjt}$ : Unidades a mantener en cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$R1_j$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $j$ , 0 de lo contrario.

$R2_n$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $n$ , 0 de lo contrario.

$$\begin{aligned}
Min\ of = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_j \sum_k \sum_t CH2_{jkt} * S2_{jkt} + \sum_j \sum_t CO2_{jt} * R1_j \\
& + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_n + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21_{ijkt} * X21_{ijkt} * (demand_j/5) \\
& + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32_{njkt} * X32_{jnkt} * (demand_j/5)
\end{aligned}$$

Restricciones

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

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

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21_{ijkt} \geq \sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt}$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt} \geq demand_j$$

El modelo de optimización presentado tiene como objetivo minimizar los costos totales asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro que comprende un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos, con entrega a domicilio mediante bicicleta. La ecuación objetivo minimiza la suma de los costos de almacenamiento en el centro de distribución y los almacenes locales, los costos de pedidos realizados en los almacenes locales y clientes, y los costos de envío desde el centro de

distribución a los almacenes locales y desde los almacenes locales a los clientes, teniendo en cuenta la capacidad de que tiene el vehículo, en este caso la bicicleta cuenta con capacidad de 5 kilogramos. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en cada centro de distribución y almacén local no excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los almacenes locales cubran las unidades enviadas desde los almacenes locales a los minoristas, y que las unidades enviadas a los minoristas cubran la demanda de los productos.

A continuación se presenta el código desarrollado con los datos que se suministraron para el desarrollo del modelo 1, el cual también se encuentra en el anexo A, para los demás modelos se puede evidenciar en los demás anexos relacionados en el documento.

Set	J2.K3 297 302 308 312																																													
i / I1 /	J3.K1 310 311 316 320																																													
j / J1*J3 /	J3.K2 307 312 318 323																																													
n / N1*N4 /	J3.K3 309 313 315 322																																													
k / K1*K3 /	Table C02(j,t) Costo de pedir en cada j en el periodo t																																													
t / T1*T4/;	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>T1</td> <td>T2</td> <td>T3</td> <td>T4</td> </tr> <tr> <td>J1</td> <td>800</td> <td>740</td> <td>700</td> <td>620</td> </tr> <tr> <td>J2</td> <td>760</td> <td>725</td> <td>690</td> <td>615</td> </tr> <tr> <td>J3</td> <td>813</td> <td>798</td> <td>724</td> <td>631;</td> </tr> </table>		T1	T2	T3	T4	J1	800	740	700	620	J2	760	725	690	615	J3	813	798	724	631;																									
	T1	T2	T3	T4																																										
J1	800	740	700	620																																										
J2	760	725	690	615																																										
J3	813	798	724	631;																																										
Table CH1(i,k,t) Costo de almacenamiento en cada i por cada k en cada periodo t	Table C03(n,t) Costo de pedir en cada n en el periodo t																																													
<table border="0"> <tr> <td></td> <td>T1</td> <td>T2</td> <td>T3</td> <td>T4</td> </tr> <tr> <td>I1.K1</td> <td>140</td> <td>155</td> <td>180</td> <td>187</td> </tr> <tr> <td>I1.K2</td> <td>125</td> <td>130</td> <td>143</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>I1.K3</td> <td>132</td> <td>144</td> <td>150</td> <td>159;</td> </tr> </table>		T1	T2	T3	T4	I1.K1	140	155	180	187	I1.K2	125	130	143	150	I1.K3	132	144	150	159;	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>T1</td> <td>T2</td> <td>T3</td> <td>T4</td> </tr> <tr> <td>N1</td> <td>1000</td> <td>950</td> <td>930</td> <td>910</td> </tr> <tr> <td>N2</td> <td>1100</td> <td>1050</td> <td>983</td> <td>970</td> </tr> <tr> <td>N3</td> <td>1040</td> <td>990</td> <td>945</td> <td>914</td> </tr> <tr> <td>N4</td> <td>1230</td> <td>1180</td> <td>1067</td> <td>1000 ;</td> </tr> </table>		T1	T2	T3	T4	N1	1000	950	930	910	N2	1100	1050	983	970	N3	1040	990	945	914	N4	1230	1180	1067	1000 ;
	T1	T2	T3	T4																																										
I1.K1	140	155	180	187																																										
I1.K2	125	130	143	150																																										
I1.K3	132	144	150	159;																																										
	T1	T2	T3	T4																																										
N1	1000	950	930	910																																										
N2	1100	1050	983	970																																										
N3	1040	990	945	914																																										
N4	1230	1180	1067	1000 ;																																										
Table CH2(j,k,t) Costo de almacenamiento en cada j por cada k en cada periodo t	Table C21(i,j,k,t) Costo de enviar de i a j cada k en cada periodo t																																													
<table border="0"> <tr> <td></td> <td>T1</td> <td>T2</td> <td>T3</td> <td>T4</td> </tr> <tr> <td>J1.K1</td> <td>300</td> <td>320</td> <td>333</td> <td>335</td> </tr> <tr> <td>J1.K2</td> <td>290</td> <td>298</td> <td>305</td> <td>310</td> </tr> <tr> <td>J1.K3</td> <td>308</td> <td>314</td> <td>317</td> <td>322</td> </tr> <tr> <td>J2.K1</td> <td>285</td> <td>292</td> <td>298</td> <td>304</td> </tr> <tr> <td>J2.K2</td> <td>270</td> <td>281</td> <td>289</td> <td>295</td> </tr> </table>		T1	T2	T3	T4	J1.K1	300	320	333	335	J1.K2	290	298	305	310	J1.K3	308	314	317	322	J2.K1	285	292	298	304	J2.K2	270	281	289	295	<table border="0"> <tr> <td></td> <td>T1</td> <td>T2</td> <td>T3</td> <td>T4</td> </tr> <tr> <td>I1.J1.K1</td> <td>1450</td> <td>1420</td> <td>1380</td> <td>1340</td> </tr> <tr> <td>I1.J1.K2</td> <td>1500</td> <td>1470</td> <td>1425</td> <td>1400</td> </tr> </table>		T1	T2	T3	T4	I1.J1.K1	1450	1420	1380	1340	I1.J1.K2	1500	1470	1425	1400
	T1	T2	T3	T4																																										
J1.K1	300	320	333	335																																										
J1.K2	290	298	305	310																																										
J1.K3	308	314	317	322																																										
J2.K1	285	292	298	304																																										
J2.K2	270	281	289	295																																										
	T1	T2	T3	T4																																										
I1.J1.K1	1450	1420	1380	1340																																										
I1.J1.K2	1500	1470	1425	1400																																										

I1.J1.K3	1480	1445	1400	1350
I1.J2.K1	1300	1280	1250	1230
I1.J2.K2	1350	1330	1300	1280
I1.J2.K3	1400	1375	1350	1325
I1.J3.K1	1250	1230	1210	1190
I1.J3.K2	1300	1280	1260	1240
I1.J3.K3	1348	1321	1297	1284;

J3.N2.K1	1300	1280	1250	1220
J3.N2.K2	1350	1325	1300	1275
J3.N2.K3	1320	1300	1275	1250
J3.N3.K1	1250	1230	1200	1170
J3.N3.K2	1300	1275	1250	1225
J3.N3.K3	1280	1250	1225	1200
J3.N4.K1	1200	1180	1150	1120
J3.N4.K2	1250	1225	1200	1115
J3.N4.K3	1220	1200	1175	1150;

Table C32(j,n,k,t) Costo de enviar de j a n cada k en cada periodo t

	T1	T2	T3	T4
J1.N1.K1	1200	1180	1150	1120
J1.N1.K2	1250	1225	1200	1175
J1.N1.K3	1220	1200	1175	1150
J1.N2.K1	1100	1080	1050	1020
J1.N2.K2	1150	1125	1100	1075
J1.N2.K3	1120	1100	1075	1050
J1.N3.K1	1050	1030	1000	970
J1.N3.K2	1100	1075	1050	1025
J1.N3.K3	1080	1050	1025	1000
J1.N4.K1	1000	980	950	920
J1.N4.K2	1050	1025	1000	975
J1.N4.K3	1020	1000	975	950
J2.N1.K1	1300	1280	1250	1220
J2.N1.K2	1350	1325	1300	1275
J2.N1.K3	1320	1300	1275	1250
J2.N2.K1	1200	1180	1150	1120
J2.N2.K2	1250	1225	1200	1175
J2.N2.K3	1220	1200	1175	1150
J2.N3.K1	1150	1130	1100	1070
J2.N3.K2	1200	1175	1150	1125
J2.N3.K3	1180	1150	1125	1100
J2.N4.K1	1100	1080	1050	1020
J2.N4.K2	1150	1125	1100	1075
J2.N4.K3	1120	1100	1075	1050
J3.N1.K1	1400	1380	1350	1320
J3.N1.K2	1450	1425	1400	1375
J3.N1.K3	1420	1400	1375	1350

Parameter  
demand(j) / J1 800, J2 120, J3 20 /  
\*\*Demanda de producto  
capacidad2(j) / J1 217, J2 200, J3 150 /  
\*\*capacidad de almacenamiento en j  
capacidad1(i) / I1 1000 /  
\*\*capacidad de almacenamiento en i ;  
Variable  
of funcion objetivo  
S1(i,k,t) Unidades a mantener en cada i por cada k en cada periodo t  
S2(j,k,t) Unidades a mantener en cada j por cada k en cada periodo t  
X21(i,j,k,t) Unidades enviadas por cada i a cada j por cada k en cada periodo t  
X32(j,n,k,t) Unidades enviadas por cada j a cada n por cada k en cada periodo t;  
Binary Variable  
R1(j) Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada j 0 de lo contrario  
R2(n) Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada n 0 de lo contrario;  
Equation ObjectiveFunction, stock1(i), stock2(j),envios1(i), Dema(j);  
ObjectiveFunction.. of =e= sum((i,k,t), CH1(i,k,t))\*sum((i,k,t), S1(i,k,t))+ sum((j,k,t), CH2(j,k,t))\*(S2(j,k,t))+ sum((j,t), C02(j,t)\*R1(j))+sum((n,t), C03(n,t)\*R2(n)) +sum((i,j,k,t), C21(i,j,k,t)\*X21(i,j,k,t)\*demand(j)/5) +sum((j,n,k,t), C32(j,n,k,t)\*X32(j,n,k,t)\*demand(j)/5);  
stock1(i).. sum((k,t), S1(i,k,t)) =g= capacidad1(i);  
stock2(j).. sum((k,t), S2(j,k,t)) =g= capacidad2(j);

```

envios1(i).. sum((j,k,t), X21(i,j,k,t)) =g= sum((j,n,k,t),
X32(j,n,k,t));
Dema(j).. sum((n,k,t), X32(j,n,k,t)) =g= demand(j);
S1.lo(i,k,t) = 100;
S1.up(i,k,t) = 20000;
S2.lo(j,k,t) = 20;
S2.up(j,k,t) = 1000;
X21.lo(i,j,k,t) = 1;
X21.up(i,j,k,t) = 1000;
X32.lo(j,n,k,t) = 1;
X32.up(j,n,k,t) = 2100;
R1.lo (j)=1;
R2.lo (n)=1;

Model minlp1 / all /;
solve minlp1 using rminlp min of;

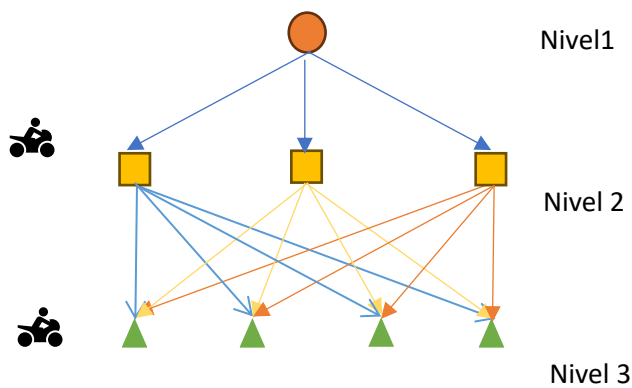
display of,I,X32.I,X21.I,S1.I,S2.I,R1.I,R2.I;
    
```

### 6.3 Modelo 2

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio por medio de moto.

Figura 12.

Esquema modelo 2



#### 6.3.1 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]

### 6.3.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CH2_{jkt}$ : 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  $t$ .

$C21_{ijkt}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$C32_{jn}$ : Costo de enviar de  $j$  a  $n$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$D_j$ : Demanda de producto.

$Capacidad1_i$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $i$ .

$Capacidad2_j$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $j$ .

Variables

$Of$ : Función objetivo

$X21_{ijkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$X32_{jnkt}$ : Unidades enviadas por cada  $j$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$S2_{kjt}$ : Unidades a mantener en cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$R1_j$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $j$ , 0 de lo contrario.

$R2_n$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $n$ , 0 de lo contrario.

$$\begin{aligned}
Min\ of = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_j \sum_n CH2_{ij} * S2_{jn} + \sum_j \sum_t CO2_{jt} * R1_j \\
& + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_n + \sum_i \sum_j C21_{ij} * X21_{ij} * (demand_j/30) \\
& + \sum_j \sum_n C32_{nj} * X32_{jn} * (demand_j/30)
\end{aligned}$$

Restricciones

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

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

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21_{ijkt} \geq \sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt}$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt} \geq demand_j$$

El modelo de optimización presentado tiene como objetivo minimizar los costos totales asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro que comprende un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos, con entrega a domicilio mediante motos, cada una con una capacidad de 30 kilogramos. La ecuación objetivo minimiza la suma de los costos de almacenamiento tanto en el centro de distribución como en los almacenes locales, los costos de pedidos realizados en los almacenes locales y clientes, y los costos de envío desde el centro de distribución a los almacenes locales y desde los almacenes locales a los clientes. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en cada centro de distribución y almacén local no

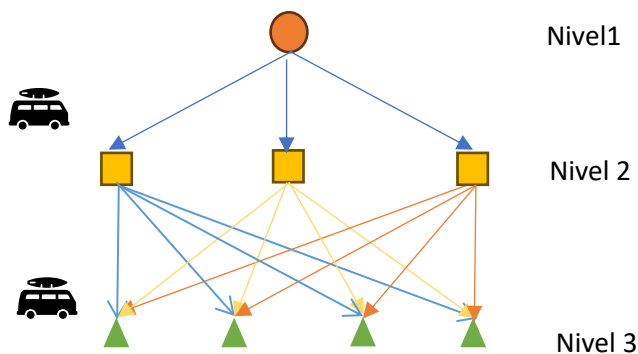
excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los almacenes locales sean suficientes para cubrir las unidades enviadas desde los almacenes locales a los clientes, y que las unidades enviadas a los clientes cubran la demanda de los productos. Este modelo garantiza una operación eficiente y rentable de la cadena de suministro, optimizando los costos y cumpliendo con las restricciones de capacidad y demanda en cada etapa del proceso de distribución.

#### 6.4 Modelo 3

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio por medio de Van.

**Figura 13.**

*Esquema modelo 3*



##### 6.4.1 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]

#### 6.4.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CH2_{jkt}$ : 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  $t$ .

$C21_{ijkt}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$C32_{jn}$ : Costo de enviar de  $j$  a  $n$  cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$D_j$ : Demanda de producto.

$Capacidad1_i$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $i$ .

$Capacidad2_j$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $j$ .

#### Variables

$Of$ : Función objetivo

$X21_{ijkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$X32_{jnkt}$ : Unidades enviadas por cada  $j$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$S2_{kjt}$ : Unidades a mantener en cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$R1_j$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $j$ , 0 de lo contrario.

$R2_n$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza pedido en cada  $n$ , 0 de lo contrario.

$$\begin{aligned}
Min\ of = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_j \sum_n CH2_{ij} * S2_{jn} + \sum_j \sum_t CO2_{jt} * R1_j \\
& + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_n + \sum_i \sum_j C21_{ij} * X21_{ij} * (demand_j/700) \\
& + \sum_j \sum_n C32_{nj} * X32_{jn} * (demand_j/700)
\end{aligned}$$

Restricciones

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

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

$$\sum_j \sum_k \sum_t X21_{ijkt} \geq \sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt}$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X32_{jnkt} \geq demand_j$$

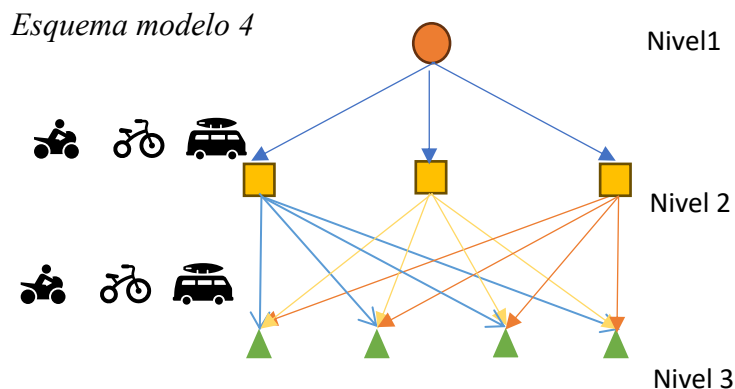
El modelo de optimización presentado tiene como objetivo minimizar los costos totales asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro que comprende un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos, con entrega a domicilio mediante van, cada una con una capacidad de 700 kilogramos. La ecuación objetivo minimiza la suma de los costos de almacenamiento tanto en el centro de distribución como en los almacenes locales, los costos de pedidos realizados en los almacenes locales y clientes, y los costos de envío desde el centro de distribución a los almacenes locales y desde los almacenes locales a los clientes. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en cada centro de distribución y almacén local no

excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los almacenes locales sean suficientes para cubrir las unidades enviadas desde los almacenes locales a los clientes, y que las unidades enviadas a los clientes cubran la demanda de los productos. Este modelo garantiza una operación eficiente y rentable de la cadena de suministro, optimizando los costos y cumpliendo con las restricciones de capacidad y demanda en cada etapa del proceso de distribución.

## 6.5 Modelo 4

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio con tres tipos de transporte.

**Figura 14.**



### 6.5.1 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]

### 6.5.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CH2_{jkt}$ : 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.

$C32C_{jnkt}$ : 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.

$C32M_{jnkt}$ : 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.

$C32V_{jnkt}$ : Costo de enviar de  $j$  a  $n$  cada  $k$  en cada periodo  $t$  en van.

$D_j$ : 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  $t$

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$S2_{kjt}$ : 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

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

Restricciones

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

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

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

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

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

$$\sum_n \sum_k \sum_t X_{32C_{j n k t}} * R_{4_{j k t}} \geq demand_j$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X_{32M_{j n k t}} * R_{6_{j k t}} \geq demand_j$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X_{32V_{j n k t}} * R_{8_{j k t}} \geq demand_j$$

$$R_{3_{i k t}} + R_{5_{i k t}} + R_{7_{i k t}} = 1$$

$$R_{4_{j k t}} + R_{6_{j k t}} + R_{8_{j k t}} = 1$$

El modelo de optimización tiene como objetivo minimizar los costos totales asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro compuesta por un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes, considerando múltiples periodos y productos. La entrega a domicilio se realiza mediante tres tipos de transporte: bicicleta, moto y van. La ecuación objetivo busca minimizar la suma de los costos de almacenamiento en el centro de distribución y en los 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 los almacenes locales a los clientes, diferenciando los costos según el tipo de transporte utilizado. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en el centro de distribución y en los almacenes locales no excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los almacenes locales sean suficientes para cubrir las unidades enviadas desde los almacenes locales a los clientes, y que las unidades enviadas a los clientes cubran la demanda de productos. Además, las restricciones garantizan que cada tipo de transporte se utilice

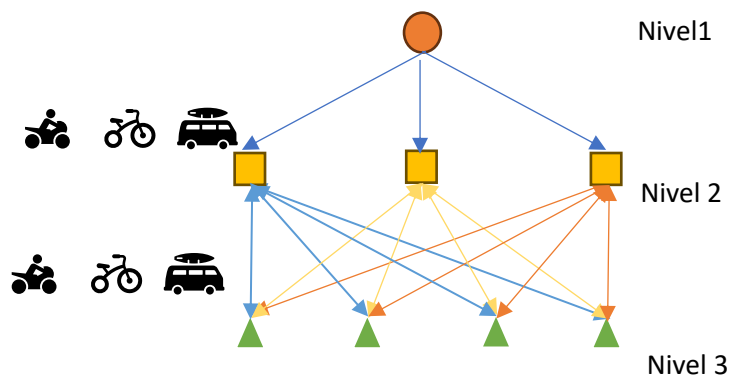
adecuadamente, sumando las unidades enviadas por bicicleta, moto y van, y asegurando que solo un tipo de transporte optimo se use para cada envío en cada periodo.

## 6.6 Modelo 5

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio con tres tipos de transporte o entrega directa en tienda.

**Figura 15.**

*Esquema modelo 5*



### 6.6.1 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]

### 6.6.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CH2_{jkt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $j$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$Descuento_{jt}$ : Descuento por recogida en tienda

$CO2_{jt}$ : 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.

$C32C_{jnkt}$ : 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.

$C32M_{jnkt}$ : 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.

$C32V_{jnkt}$ : Costo de enviar de  $j$  a  $n$  cada  $k$  en cada periodo  $t$  en van.

$D_j$ : 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  $t$

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$S2_{kjt}$ : 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

$Pickup_j$ : variable binaria que toma el valor de 1 si el cliente recoge el pedido en  $j$ , 0 de lo contrario.

$$\begin{aligned}
Min\ of = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_j \sum_k \sum_t CH2_{jkt} * S2_{jkt} + \sum_j \sum_t CO2_{jt} * R1_j \\
& + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_n + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21C_{ijkt} * X21C_{ijkt} * (demand_j/5) \\
& * R3_{ikt} \\
& + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32C_{njkt} * X32C_{jnkt} * (demand_j/5) * R4_{jkt} * (1 - Pickup_j) \\
& + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21M_{ijkt} * X21M_{ijkt} * (demand_j/30) * R5_{ikt} \\
& * + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32M_{njkt} * X32M_{jnkt} * (demand_j/30) * R6_{jkt} * (1 \\
& - Pickup_j) + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C21V_{ijkt} * X21V_{ijkt} * (demand_j/700) * R7_{ikt} \\
& + \sum_j \sum_n \sum_k \sum_t C32V_{njkt} * X32V_{jnkt} * (demand_j/700) * R8_{jkt} \\
& * (1 - Pickup_j) - \sum_j \sum_t Descuento_{jt} * Pickup_j
\end{aligned}$$

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 asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro que comprende un centro de distribución, varios almacenes locales y clientes, considerando múltiples periodos y productos. La entrega se realiza mediante tres tipos de transporte: bicicleta, moto y van, o bien mediante recogida directa en tienda con descuentos aplicables. La ecuación objetivo busca minimizar la suma de los costos de almacenamiento en el centro de distribución y en los 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 los almacenes locales a los clientes, diferenciando los costos según el tipo de transporte utilizado y aplicando descuentos en

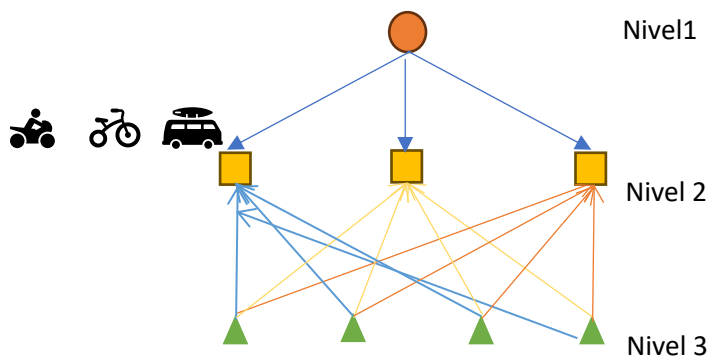
caso de recogida en tienda. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en el centro de distribución y en los almacenes locales no excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los almacenes locales sean suficientes para cubrir las unidades enviadas desde los almacenes locales a los clientes, y que las unidades enviadas a los clientes cubran la demanda de productos. Además, las restricciones garantizan que cada tipo de transporte se utilice adecuadamente, sumando las unidades enviadas por bicicleta, moto y van, y asegurando que solo un tipo de transporte se use para cada envío en cada periodo, y que se considere la opción de recogida en tienda cuando sea aplicable.

## 6.7 Modelo 6

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución, varios lockers y clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio con tres tipos de transporte.

**Figura 16.**

*Esquema modelo 6*



### 6.7.1 Índices

$i$ : Centro de distribución (N1) [1...I]

$n$ : Minoristas (N3) [1...N]

$t$ : Numero de periodos [1...T]

$p$ : Parcellocker

### 6.7.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$ParcelLockerCost_{pkt}$ : Costos de utilizar el Parcel locker por cada  $k$  en cada periodo de  $t$ .

$Pickupcost_{ikt}$ : Costo de recogida del parcel de cada  $k$  en cada 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.

$C21M_{ijkt}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  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.

$Demand_p$ : Demanda de producto para el parcel.

$Capacidad1_i$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $i$ .

$Capacidad_p$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $p$ .

Variables

$Of$ : Función objetivo

$X3C_{ipkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada parcel por cada  $k$  en cada periodo  $t$  en cicla

$X3M_{ipkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada parcel por cada  $k$  en cada periodo  $t$  en moto

$X3V_{ipkt}$ : Unidades enviadas por cada i a cada parcel por cada k en cada periodo t en van

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada i por cada k en cada periodo t.

$S2_{kpt}$ : Unidades a mantener en cada parcel por cada k en cada periodo t.

$R2_{nt}$ : 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

$R5_{ikt}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de desde i, 0 de lo contrario

$R7_{it}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de desde i, 0 de lo contrario

$R9_{ikt}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza recogida en Van de desde i, 0 de lo contrario.

$$\begin{aligned}
 \text{Min of} = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_n \sum_t CO3_{nt} * R2_{nt} \\
 & + \sum_i \sum_p \sum_k \sum_t C21C_{ipkt} * X3C_{ipkt} * (demand_j/5) * R3_{ikt} \\
 & + \sum_i \sum_p \sum_k \sum_t C21M_{ipkt} * X3M_{ipkt} * (demand_j/30) * R5_{ikt} \\
 & + \sum_i \sum_p \sum_k \sum_t C21V_{ipkt} * X3V_{ipkt} * (demand_j/700) * R7_{ikt} \\
 & + \sum_p \sum_k \sum_t ParcelLockerCost_{pkt} * S2_{pkt} + \sum_i \sum_k \sum_t PickupCost_{ikt} * R9_{ikt}
 \end{aligned}$$

Restricciones

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

$$\sum_k \sum_t S2_{pkt} \geq capacidad\_p_p$$

$$\sum_p \sum_k \sum_t X3C_{ipkt} * R3_{ikt} \geq demand\_p_p$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X3M_{ipkt} * R5_{ikt} \geq demand\_p_p$$

$$\sum_n \sum_k \sum_t X3V_{ipkt} * R7_{ikt} \geq demand\_p_p$$

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

$$R9_{ikt} \leq 1$$

El modelo de optimización presentado tiene como objetivo minimizar los costos totales asociados con el almacenamiento, los pedidos y el envío en una red de cadena de suministro que incluye un centro de distribución, varios lockers y clientes, para múltiples periodos y productos, con entrega a domicilio mediante tres tipos de transporte: bicicleta, moto y van hacia el locker. La ecuación objetivo minimiza la suma de los costos de almacenamiento en el centro de distribución, los costos de pedidos realizados por los clientes, los costos de envío desde el centro de distribución a los lockers por cada tipo de transporte, los costos de uso de los lockers y los costos de recogida en el centro de distribución. Las restricciones del modelo aseguran que las unidades almacenadas en el centro de distribución y en los lockers no excedan su capacidad, que las unidades enviadas desde el centro de distribución a los lockers cubran la

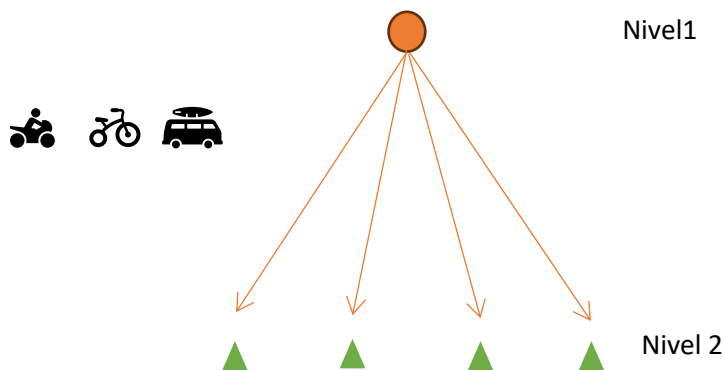
demanda de los productos, y que se respete la capacidad y disponibilidad de cada tipo de transporte utilizado para las entregas. Además, se garantiza que cada unidad de producto tenga asignado un único tipo de transporte para cada envío y que las recogidas en lockers no excedan la capacidad permitida.

## 6.8 Modelo 7

El escenario está conformado por una red de cadena de suministro con un centro de distribución y entrega por medio de baúl del carro de los clientes para múltiples periodos y productos y entrega a domicilio con tres tipos de transporte.

**Figura 17.**

*Esquema modelo 7*



### 6.8.1 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]

### 6.8.2 Parámetros

$CH1_{ikt}$ : Costo de almacenamiento en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$ .

$CO2_{nt}$ : Costo de pedir en cada  $n$  en el periodo  $t$ .

$CDirectC_{ij}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  en cicla.

$CDirectM_{ij}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  en moto.

$CDirectV_{ij}$ : Costo de enviar de  $i$  a  $j$  en van.

$Demand_n$ : Demanda de producto.

$Capacidad_i$ : Capacidad de almacenamiento en cada  $i$ .

#### Variables

$S1_{ikt}$ : Unidades a mantener en cada  $i$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$

$WCicla_{inkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$  en cicla

$WMoto_{inkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$  en moto

$WVan_{inkt}$ : Unidades enviadas por cada  $i$  a cada  $n$  por cada  $k$  en cada periodo  $t$  en van

$YCicla_{inkt}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en cicla de desde  $j$ , 0

de lo contrario

$YMoto_{inkt}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de desde  $i$ , 0

de lo contrario

$YVan_{inkt}$ : Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de desde  $i$ , 0 de

lo contrario

$$\begin{aligned}
Min\ of = & \sum_i \sum_k \sum_t CH1_{ikt} * S1_{ikt} + \sum_n \sum_t CO2_{nt} \\
& + \sum_i \sum_n \sum_k \sum_t CDirectC_{inkt} * WCicla_{inkt} * (demand_n/5) * YCicla_{inkt} \\
& + \sum_i \sum_n \sum_k \sum_t CDirectM_{inkt} * WMoto_{inkt} * (demand_n/30) * YMoto_{inkt} \\
& + \sum_i \sum_n \sum_k \sum_t CDirectV_{inkt} * WVan_{inkt} * (demand_n/700) * YVan_{inkt}
\end{aligned}$$

Restricciones

$$\sum_i \sum_k \sum_n \sum_t WVan_{inkt} + WCicla_{inkt} + WMoto_{inkt} \leq capacidad_i$$

$$\sum_i \sum_k \sum_n \sum_t WVan_{inkt} + WCicla_{inkt} + WMoto_{inkt} \geq demand_n$$

$$YVan_{inkt} + YCicla_{inkt} + YMoto_{inkt} = 1$$

El modelo describe una cadena de suministro que consiste en un centro de distribución y la entrega directa desde este centro hacia los clientes, utilizando el baúl del coche de los clientes como medio de entrega, teniendo en cuenta que el envío al cliente se realiza por medio de los tres tipos de vehículos que se utilizaron en los modelos anteriores. Este escenario opera a lo largo de varios períodos y productos, donde los productos son entregados directamente desde el centro de distribución a los clientes. Las variables del modelo incluyen las unidades a mantener en el centro de distribución para cada producto y período, las unidades enviadas a los clientes utilizando el baúl del coche, y variables binarias que indican si se realiza la entrega en el baúl del coche para cada envío. Las restricciones del modelo aseguran que se respete la capacidad de

almacenamiento en el centro de distribución y que se satisfaga la demanda de los clientes en cada período.

## **6.9 Artículo publicable**

En esta fase se realiza la recopilación y entrega de la información recopilada a lo largo de la investigación realizada titulado: “Análisis del problema de Optimización denominado Diseño de la red de cadena de suministro a través de técnicas exactas, considerando diversas estrategias de entrega al consumidor final”.

## **7. Experimentación**

### **7.1 Variación de parámetros**

Se exploraron un total de siete escenarios variados, cada uno de ellos configurado con un centro de distribución único, tres tiendas minoristas y cuatro clientes. Cada escenario representa una configuración diferente que permite evaluar diversas estrategias y variables dentro del modelo de cadena de suministro propuesto, las cuales se presentan a continuación.

1. Entregas a domicilio por medio de cicla
2. Entregas a domicilio por medio de moto
3. Entregas a domicilio por medio de van
4. Entregas a domicilio donde el modelo escoge que tipo de transporte es más económico.
5. Entregas a domicilio donde el modelo escoge que tipo de transporte es más económico o recogida en tienda por parte del cliente.
6. Entregar por medio de ParcelLockers
7. Entregas directas desde el centro de distribución al baúl del coche del cliente (TrunkCar)

## 7.2 Experimento

Esta sección explica los elementos utilizados en la experimentación de esta investigación, teniendo en cuenta los factores importantes en los diversos escenarios de modelado y las etapas de evaluación, como se detalla a continuación

**Tabla 2.**

*Índices de los modelos*

Nomenclatura	Descripción	Cantidad
I	Centros de distribución	1
J	Tiendas minoristas	3
N	Clientes	4
P	ParcelLockers	3
K	Productos	3
T	Numero de periodos	4

**Tabla 3.**

*Descripción general de los modelos*

<i>Modelo</i>	<i>Descripción del modelo</i>	<i>Resultado función objetivo</i>
<i>I</i>	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen	132289000

<i>Modelo</i>	<i>Descripción del modelo</i>	<i>Resultado función objetivo</i>
	envíos a domicilio por medio de cicla con capacidad de carga de 5 productos, con demanda y capacidad diferente	
<i>Modelo</i>	El modelo contiene un centro de distribución, 3	860366500
1.1	tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio por medio de cicla con capacidad de carga de 5 productos, con demanda y capacidad constante	
<i>Modelo</i>	El modelo contiene un centro de distribución, 3	28358156
2	tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio por medio de moto con capacidad de carga de 30 productos, con demanda y capacidad diferente	
<i>Modelo</i>	El modelo contiene un centro de distribución, 3	174115000
2.1	tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio por medio de moto con capacidad de carga de 30 productos, con demanda y capacidad constante	
<i>Modelo</i>	El modelo contiene un centro de distribución, 3	4045600
3	tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio por medio de van con capacidad de carga de 700 productos, con demanda y capacidad diferente	

<i>Modelo</i>	<i>Descripción del modelo</i>	<i>Resultado función objetivo</i>
3.1	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio por medio de van con capacidad de carga de 700 productos, con demanda y capacidad constante	13436405
4	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio con 3 tipos de transporte para escoger el mejor con demanda y capacidad diferente	1819875
4.1	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio con 3 tipos de transporte para escoger el mejor demanda y capacidad constante	1819875
4.2	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio con 3 tipos de transporte para escoger el mejor, demanda más baja y capacidad más alta	1819875
5	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio con 3 tipos de transporte para escoger el mejor o recogida en tienda.	1792600

<i>Modelo</i>	<i>Descripción del modelo</i>	<i>Resultado función objetivo</i>
5.1	El modelo contiene un centro de distribución, 3 tiendas minoristas y cuatro clientes, donde se hacen envíos a domicilio con 3 tipos de transporte para escoger el mejor o recogida en tienda, con una disminución del costo de descuento del 90% respecto al modelo 5	1794850
6	El modelo contiene un centro de distribución, 3 Parcel lockers y cuatro clientes, donde se hacen envíos por medio tres tipos de transporte al parcel y el cliente lo recoge	1804700
6.1	El modelo contiene un centro de distribución, 3 Parcel lockers y cuatro clientes, donde se hacen envíos por medio tres tipos de transporte al parcel y el cliente lo recoge, con una capacidad 3 veces mayor que el modelo 6	1824100
7	El modelo contiene un centro de distribución y cuatro clientes, donde se hacen envíos por medio de tres tipos de transporte al baúl del auto del cliente	1688632
7.1	El modelo contiene un centro de distribución y cuatro clientes, donde se hacen envíos por medio de tres tipos de transporte al bul del auto del cliente, con aumento de demanda	17286660

El Modelo 1 aborda los envíos domiciliarios mediante bicicletas, presentando un alto valor objetivo de 132.289.000 debido a las limitaciones en capacidad de carga y costos operativos elevados. A pesar de ser una opción más sostenible, los costos asociados a este modelo lo hacen menos rentable en comparación con otros métodos. El Modelo 1.1, con demanda y capacidad constante, muestra un incremento significativo en el costo, alcanzando 860.366.500, indicando que la variabilidad en demanda y capacidad puede ayudar a reducir costos.

### Figura 18

*Datos Capacidad y demanda modelo 1*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 120, J3 20 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 217, J2 200, J3 150 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

### Figura 19

*Datos Capacidad y demanda modelo 1.1*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 800, J3 800 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 200, J2 200, J3 200 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

El Modelo 2 introduce las motocicletas, que demuestran ser una opción más eficiente con un valor objetivo de 28.358.156. La mayor capacidad de carga y eficiencia operativa de las motocicletas las hace más rentables, especialmente en entornos donde la rapidez es crucial. Sin embargo, con demanda y capacidad constante, el Modelo 2.1 muestra un aumento del costo a 174.115.000, lo que resalta la importancia de la flexibilidad en la planificación logística.

### Figura 20

*Datos Capacidad y demanda modelo 2*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 120, J3 20 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 217, J2 200, J3 150 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

### Figura 21

*Datos Capacidad y demanda modelo 2.1*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 800, J3 800 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 200, J2 200, J3 200 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

Por otro lado, usar van en el Modelo 3 muestra una notable reducción en los costos operativos, con un valor objetivo de 4.045.600. Esto se debe a la alta capacidad de carga y

eficiencia de las van, lo que las convierte en una opción preferida para mayores volúmenes de productos. El Modelo 3.1 con demanda y capacidad constante refleja un incremento en el costo a 13.436.405, subrayando nuevamente la ventaja de la variabilidad en la demanda.

### Figura 22

*Datos Capacidad y demanda modelo 3*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 120, J3 20 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 217, J2 200, J3 150 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

### Figura 23

*Datos Capacidad y demanda modelo 3.1*

```
Parameter
demand(j) / J1 800, J2 800, J3 800 /
**Demanda de producto

capacidad2(j) / J1 200, J2 200, J3 200 /
**capacidad de almacenamiento en j
capacidad1(i) / I1 1000 /
**capacidad de almacenamiento en i ;
```

El Modelo 4 combina bicicletas, motocicletas y van para optimizar la operación, resultando en un valor objetivo de 1.819.875. Este enfoque híbrido permite flexibilidad y adaptación a diferentes demandas y capacidades, aunque se observan limitaciones en la demanda de la tienda 3 para bicicletas y van. Tanto el Modelo 4.1, con demanda y capacidad constante, como el Modelo 4.2, con demanda más baja y capacidad más alta, alcanzan el mismo resultado de 1.819.875. Esto indica que la flexibilidad en la selección del transporte puede mantener una eficiencia significativa

en costos independientemente de las variaciones en demanda y capacidad. Resaltando la selección de transporte de cada producto en cada periodo a cada punto en la figura 18

### Figura 24.

*Distribución de transporte de pedidos en cada periodo del modelo 4.1*

```

---- 298 VARIABLE R5.L Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de k en cada i en el periodo t 0 de lo contrario
      T1      T2      T3      T4
K1.I1  1.000  1.000  1.000  1.000
K2.I1  1.000  1.000  1.000  1.000
K3.I1  1.000  1.000  1.000  1.000
K4.I1  1.000  1.000  1.000  1.000

---- 298 VARIABLE R6.L Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en moto de k en cada j en el periodo t 0 de lo contrario
      T1      T2      T3      T4
K1.J1  1.000  1.000  1.000  1.000
K1.J2  1.000  1.000  1.000  1.000
K1.J3  1.000  1.000  1.000  1.000
K2.J1  1.000  1.000  1.000  1.000
K2.J2  1.000  1.000  1.000  1.000
K2.J3  1.000  1.000  1.000  1.000
K3.J1  1.000  1.000  1.000  1.000
K3.J2  1.000  1.000  1.000  1.000
K3.J3  1.000  1.000  1.000  1.000
K4.J1  1.000  1.000  1.000  1.000
K4.J2  1.000  1.000  1.000  1.000
K4.J3  1.000  1.000  1.000  1.000

---- 298 VARIABLE R7.L Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de k en cada i en el periodo t 0 de lo contrario
      ( ALL      0.000 )

---- 298 VARIABLE R8.L Variable binaria toma el valor 1 si se realiza domicilio en Van de k en cada j en el periodo t 0 de lo contrario
      T4
K4.J3  1.000

```

El Modelo 5 sugiere que la opción de entrega óptima es la recogida en tienda, presenta una notable reducción en los costos a 1.792.600, destacándose como una opción altamente rentable. Incluso con una disminución del costo de descuento del 90%, el Modelo 5.1 muestra un costo ligeramente superior de 1.794.850, lo que sigue siendo competitivo.

### Figura 25

*Datos Descuento modelo 5*

```

table Descuento(j,t) Descuento por recogida en tienda
      T1
J1    1000
J2    800
J3    600;

```

**Figura 26***Datos Descuento modelo 5.1*

```

table Descuento(j,t) Descuento por recogida en tienda
      T1
J1     80
J2     40
J3     30;

```

El Modelo 6 analiza la eficiencia de los Parcel Lockers, obteniendo un valor objetivo de 1.804.700. Esta estrategia optimiza la gestión de la demanda y la asignación de recursos. Con una capacidad tres veces mayor, el Modelo 6.1 presenta un costo de 1.824.100, reflejando la eficiencia de esta estrategia en diferentes escenarios de capacidad.

**Figura 27***Datos Capacidad modelo 6*

```

Parameter
capacidad1(i) / I1 1000 /
capacidad_p (p) / P1 30, P2 32, P3 35 /
demand_p (p) / P1 800, P2 120, P3 20 /;

```

**Figura 28***Datos Capacidad modelo 6.1*

```

Parameter
capacidad1(i) / I1 1000 /
capacidad_p (p) / P1 90, P2 96, P3 105 /
demand_p (p) / P1 800, P2 120, P3 20 /;

```

Finalmente, el Modelo 7 se centra en la entrega directa del centro de distribución al cliente, logrando un valor objetivo de 1.688.632, lo que lo convierte en el modelo más eficiente en términos de costos operativos. Sin embargo, al aumentar la demanda, el Modelo 7.1 muestra un aumento considerable en el costo a 17.286.660, subrayando la necesidad de un equilibrio adecuado entre demanda y capacidad.

### Figura 29

*Datos Demanda modelo 7*

```
Parameter capacidad(i) / I1 1000 /  
demand(n) /N1 800, N2 120, N3 20, N4 80 /;
```

### Figura 30

*Datos Demanda modelo 7.1*

```
Parameter capacidad(i) / I1 1000 /  
demand(n) /N1 800, N2 720, N3 320, N4 180 /;
```

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 las 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.

El problema de optimización de una red de cadena de suministro se aborda mediante técnicas exactas de modelado matemático, que incluyen estrategias de entrega al consumidor final. Este enfoque implica la mejora de diversas etapas del proceso logístico. La solución del problema busca minimizar los costos de operación o maximizar la eficiencia, cumpliendo con las demandas del consumidor final y respetando las restricciones de capacidad de transporte según el tipo de vehículo.

Las restricciones consideradas en el modelo abarcan la capacidad de almacenamiento, las limitaciones del transporte, los tiempos de entrega y las demandas de los clientes. Las funciones objetivo se centran en minimizar los costos asociados con el transporte, almacenamiento e inventarios, y maximizar la satisfacción del cliente.

Una característica importante es que se trata de un problema convexo, donde tanto el conjunto de soluciones como la función objetivo son convexos, asegurando que cualquier punto localmente óptimo es también globalmente óptimo. No obstante, muchos problemas de cadena de suministro no son necesariamente convexos debido a la naturaleza discreta de las decisiones. En este trabajo, el problema se resuelve mediante técnicas exactas utilizando GAMS (General Algebraic Modeling System) y el solucionador MINLP, que maneja Programación de Enteros Mixtos No Lineal. Este enfoque combina variables continuas, discretas y binarias, y puede manejar tanto funciones objetivo como restricciones no lineales.

El problema contempla diversas estrategias de entrega (tres tipos de vehículos), diferentes capacidades de almacenamiento, múltiples productos, múltiples periodos que contemplan escenarios de costos y, finalmente, descuentos para recogida en tienda.

Adicionalmente, se tienen en cuenta los temas B2B cuando el cliente solicita un pedido muy grande. En contraste, los asuntos B2C se manejan cuando el pedido es mínimo, aplicando el Modelo de Entrega de Última Milla para garantizar entregas rápidas y eficientes de pedidos pequeños y frecuentes. Para la localización, se considera que el centro de distribución y las tiendas ya están ubicadas; sin embargo, la ubicación de puntos de recogida puede depender del acuerdo con el cliente, requiriendo ajustes en la gestión logística según las especificaciones del acuerdo. Finalmente, en el contexto de multi -ítem, se gestionan distintos tipos de productos, tiendas y clientes mediante modelos que optimizan la disponibilidad y distribución de inventario, adaptándose a las necesidades variadas de los productos y clientes.

## **Conclusiones**

La distribución logística óptima depende de la elección estratégica entre bicicletas, motocicletas y vehículos tipo van, cada una con sus ventajas específicas. Las motocicletas destacan por su rapidez y eficiencia en entornos urbanos, siendo ideales para minimizar costos operativos y maximizar la velocidad de entrega. Según los resultados del Modelo 2, el costo total de los envíos a domicilio con motocicletas es significativamente menor que el costo con bicicletas (Modelo 1), con una reducción del 78%.

En contraste, las bicicletas, aunque ofrecen una alternativa más sostenible, representan costos de entrega más elevados, limitando su viabilidad económica en comparación con las motocicletas. Sin embargo, el uso de bicicletas puede contribuir a la sostenibilidad ambiental, aunque sus costos son más del 300% superiores comparados con los de las motocicletas en condiciones de demanda y capacidad diferentes.

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 motocicletas. Este enfoque es especialmente efectivo para gestionar grandes volúmenes de carga y rutas de entrega que requieren capacidad adicional de almacenamiento. Como se evidencia en el Modelo 3, la utilización de vans puede reducir los costos en un 97% en comparación con los costos del Modelo 1.

La implementación estratégica de los 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. Los resultados del Modelo 6 indican que el uso de Parcel Lockers puede mantener los costos en un nivel 98% menor que el Modelo 1, proporcionando una solución costo-efectiva y mejorando la satisfacción del cliente.

Adicionalmente, la opción de recogida en tienda ha mostrado ser una alternativa altamente rentable, reduciendo significativamente los costos asociados con las entregas a domicilio. El Modelo 5 demuestra que la recogida en tienda puede mantener los costos en un nivel 98% menor que el Modelo 1, siendo la opción más económica comparada con los otros modelos.

Finalmente, la entrega directa desde el centro de distribución al cliente, utilizando una combinación de medios de transporte, emerge como la opción más eficiente en términos de costos operativos en condiciones de demanda variable. Este enfoque, representado en los Modelos 4 y 5, permite mantener los costos en un nivel 99% menor que el Modelo 1, combinando eficiencia y flexibilidad.

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. El modelo matemático utilizado en este análisis demuestra ser una estrategia viable para implementar en una empresa con enfoque en satisfacción del cliente.

### **Recomendaciones**

El código y material de programación desarrollado en GAMS queda a disposición de los estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, investigadores y docentes interesados en profundizar más sobre la logística de última milla en entornos urbanos. Los modelos presentados en este trabajo pueden analizarse, modificarse y compararse para identificar nuevas características y desarrollar estrategias más eficientes que reduzcan los costos de producción, mantenimiento, pedido y transporte dentro de una red de cadena de suministro.

Dado que los modelos desarrollados abordan diferentes tipos de transporte (bicicletas, motocicletas y vans) y opciones de entrega (envíos a domicilio, Parcel Lockers y recogida en tienda), es recomendable que futuros estudios expandan el análisis a cadenas de suministro con más niveles y diferentes escenarios de demanda y capacidad. Esto acercaría el modelo a un entorno más realista y permitiría evaluar la eficiencia de estos métodos en contextos más complejos.

Además, se sugiere que los estudiantes de ingeniería industrial utilicen estos modelos para practicar y mejorar sus habilidades en programación y modelado, utilizando diversos softwares.

Esto fortalecerá sus competencias y demostrará cómo la programación puede mejorar y prototipar situaciones en diversas industrias.

Este trabajo de grado utilizó la programación lineal entera con un enfoque determinístico, futuros trabajos podrían emplear heurísticas y métodos estocásticos para incorporar grados de incertidumbre y modelar situaciones más complejas. Esto podría incluir la variabilidad en la demanda, los tiempos de entrega y los costos, consolidando aspectos de mercado, compras y transporte.

Este trabajo tiene una alta aplicabilidad en la optimización de la logística de última milla en entornos urbanos. Los modelos desarrollados permiten a las empresas de distribución seleccionar estratégicamente el tipo de transporte (bicicletas, motocicletas, vans) y los métodos de entrega (envíos a domicilio, Parcel Lockers, recogida en tienda) más eficientes según las condiciones de demanda y capacidad. Por ejemplo, las motocicletas pueden ser utilizadas para reducir costos en entornos urbanos densos, mientras que las vans son ideales para gestionar grandes volúmenes de carga. Además, los Parcel Lockers ofrecen una solución rentable y flexible para la entrega de paquetes, mejorando la experiencia del cliente. Al implementar estos modelos, las empresas pueden reducir costos operativos hasta en un 99%, optimizar recursos y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones.

Finalmente, los modelos matemáticos empleados en este trabajo presentan consistencia y consideran situaciones reales del problema de optimización. Aunque se trata de una simplificación del problema, estos modelos pueden llevarse a la práctica mediante la consideración de costos reales, análisis de mercado, ubicación de puntos de recogida, y capacidades reales de almacenamiento y transporte. Se recomienda realizar estudios de caso con datos reales para validar y ajustar los modelos, asegurando su aplicabilidad en entornos empresariales.

### 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>
- 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>
- 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.
- Garcia, 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>

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>

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, I*, 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/FundamentosdeOptimizacionMatematica>

enEconomia.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  $\epsilon$ -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>

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](https://doi.org/10.2307/1251563)

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>