

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



REDISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE
MERCANCÍAS EN TIENDAS DE CONVENIENCIA A
TRAVÉS DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN
LINEAL MIXTA

POR

ANA MARÍA NAVA SALAZAR

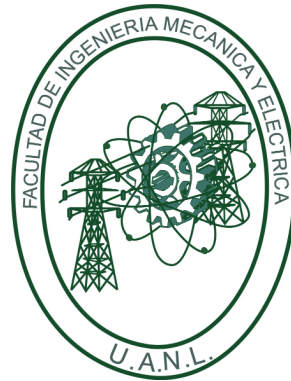
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



REDISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE
MERCANCÍAS EN TIENDAS DE CONVENIENCIA A
TRAVÉS DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN
LINEAL MIXTA

POR

ANA MARÍA NAVA SALAZAR

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Rediseño de una red de distribución de mercancías en tiendas de conveniencia a través de un modelo de optimización lineal mixta", realizada por el estudiante Ana María Nava Salazar, con número de matrícula 2085423, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa
Director

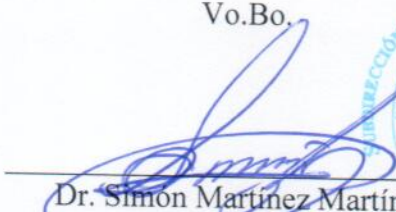
Dr. Luis Alfonso Rivera Infante
Co -Director

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa
Revisor

MLyCS Blanca Idalia Pérez Pérez
Revisor

Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 642597

Acta Núm. 4210

Ciudad Universitaria, a 4 de agosto del 2023.

Esta tesis está dedicada:

A Dios por ser la luz que me guía.

A mis hijos Celeste y Jorge por ser mi motor emocional.

A mi esposo Jorge por ser mi apoyo y compañía.

A mi madre sra. Anselma por ser mi fortaleza.

*En memoria de mi padre, Prof. Simón Nava Valenzuela por ser mi fuente de
inspiración, sé que estarías orgulloso de mí.*

*A mis hermanos Claudia, César, Simón, Ismael, Lucero, Jorge, Josué y Vianey
por ser mi estímulo.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	x
Resumen	xi
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Descripción de proveedores:	4
1.2. Objetivo	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Justificación	6
1.5. Estructura de la tesis	7
2. Antecedentes	8
2.1. Redes de distribución	8
2.1.1. Diseño de una red de distribución	10
2.1.2. Importancia del diseño de una red de distribución	11
2.1.3. Clasificación de diseños de redes de distribución	12

2.2. Red de tiendas	17
2.2.1. Tiendas de conveniencia	18
2.2.2. Redes de tiendas de conveniencia más comunes	18
2.3. Consolidación	20
2.3.1. Almacenes de consolidación	20
2.3.2. Ventajas de almacenes de consolidación	21
2.4. Localización de instalaciones	22
2.4.1. Ventajas de una correcta ubicación de instalaciones	22
2.4.2. Localización de instalaciones en redes de distribución	23
2.4.3. Métodos más usados para la ubicación de instalaciones	23
2.4.4. Problemas de ubicación de instalaciones de varios niveles	26
2.5. Literatura relacionada al problema	26
3. Metodología	32
3.1. Base para solución del problema	32
3.2. Descripción formal del problema	34
3.3. Modelo matemático propuesto	35
3.3.1. Modelo de localización de instalaciones considerando diferen- tes sistemas de aprovisionamiento	35
3.3.2. Supuestos	35
3.3.3. Notación	36

3.3.4. Modelo matemático	38
4. Análisis y resultados	40
4.1. Diseño de la experimentación	40
4.2. Descripción de las instancias	41
4.3. Resultados de la experimentación	42
4.4. Complejidad computacional	45
5. Conclusiones	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Contribuciones	52
5.3. Trabajo a futuro	53
A. Resultados experimentación computacional	54

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Red y distribución del problema original	5
2.1. Flujos típicos en el canal de distribución	10
2.2. Almacenamiento del fabricante con envío directo	13
2.3. Almacenamiento del fabricante con envío directo y fusión en tránsito	14
2.4. Almacenamiento del distribuidor con entrega del transportista	15
2.5. Almacenamiento del distribuidor con entrega de última milla	16
2.6. Almacenamiento del fabricante o distribuidor con recogida por parte del consumidor	17
2.7. Esquema almacén de consolidación o CEDIS	21
2.8. Medidas de rendimiento de la cadena de suministro	25
2.9. Enfoques de solución para problemas de un solo objetivo	25
3.1. Fases de la IO para solucionar problemas	33
4.1. Gráfica en Python de instancia de tamaño 14	48
4.2. Tablas de solución para instancia de tamaño 14	49

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Revisión de literatura	31
4.1. Resultados de instancias de tamaño 14	43
4.2. Resultados de instancias de tamaño 28	43
4.3. Resultados de instancias de tamaño 56	43
4.4. Resultados de instancias de tamaño 112	43
4.5. Resultados de instancias de tamaño 224	44
4.6. Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 14 .	46
4.7. Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 28 .	46
4.8. Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 56 .	46
4.9. Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 112	46
4.10. Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 224	47
A.1. Descripción de cada número (#) de instancia	54
A.2. Resultados de instancias	55

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios por la oportunidad de concluir este sueño y que todo lo aquí obtenido sea para gloria tuya.

A mis hijos, mi esposo, mi madre, a mi querido padre que está en el cielo, a mis hermanos y a toda mi familia por su apoyo y comprensión, que todos mis conocimientos, logros y beneficios sea para el bien de todos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante el periodo de la maestría, así como la Universidad Autónoma de Nuevo León y especialmente a FIME por el apoyo y la oportunidad de cursar mis estudios en ella.

A mis asesores de tesis, el Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa y el Dr. Luis Alfonso Infante Rivera, por todo su apoyo y tiempo durante el desarrollo de este trabajo, ya que con su experiencia y contribuciones me ayudaron a concluir esta tesis.

Al comité de tesis, la Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa, la MLCS Blanca Idalia Pérez Pérez y el Dr. Giovanni Lizarraga Lizarraga, que fungieron como revisores de esta tesis. También a los profesores que tuve durante el posgrado por todas las enseñanzas brindadas. En especial a mi coordinadora, la Dra. Jania Saucedo, por ser guía y apoyo en toda la maestría.

A mis compañeros y amigos de la maestría de quienes recibí mucho apoyo y con los que compartí grandes momentos.

RESUMEN

Ana María Nava Salazar.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: **REDISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS EN TIENDAS DE CONVENIENCIA A TRAVÉS DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN LINEAL MIXTA.**

Número de páginas: 59.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Dentro de los procesos de la cadena de suministro se encuentra el almacenaje, que es una forma de compensar los desequilibrios que existen entre la oferta y la demanda de productos.

El decidir dónde ubicar un almacén es una decisión clave para la empresa, ya que afectará de manera directa los costos generados por la distribución de los productos. De tal manera que al seleccionar la mejor alternativa para localizar los almacenes de consolidación permitirá reducir costos en la red de distribución de productos en una red de tiendas de conveniencia, esto a través de un modelo de programación lineal mixta.

Se diseña un modelo de apoyo a la toma de decisiones que localice dichos almacenes de consolidación para la distribución óptima de productos, considerando diferentes ubicaciones potenciales.

Las herramientas utilizadas para resolver el problema de localización de un almacén fueron la optimización lineal entera mixta y para la codificación del modelo se utilizó el lenguaje de programación Python y el solver CPLEX para la solución final del código.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Las contribuciones de este trabajo son la propuesta de una formulación matemática para resolver el problema de localización de un almacén considerando factores como: diferentes tipos de proveedores y productos, así como diferentes formas de aprovisionamiento y cobertura de proveedores, además de que la propuesta de la metodología se puede replicar para la ubicación de un almacén, en redes con características similares a las del problema planteado.

Como conclusión, el almacenaje es una actividad de suma importancia en la cadena de suministro, impactando directamente en los costos, por lo que una acertada decisión de ubicación de la instalación beneficiará a la compañía, no solo en los costos específicos de distribución sino que también en disminución de tiempos y de utilización de recursos.

La formulación matemática propuesta puede obtener soluciones óptimas en menos de 8 minutos para instancias generadas de hasta 90 clientes, 10 posibles ubicaciones de almacén y 12 tipos de productos y proveedores.

Firma del asesor: _____
Dr. Leonardo Gabriel Hernández Landa

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Dada la necesidad que tienen las empresas de ofrecer una excelente experiencia de servicio a sus clientes, ya sea de un producto o servicio brindado, requieren de una gran coordinación tanto en sus procesos internos como externos, además de recursos e información completa, correcta y oportuna. Todos estos procesos, actividades, recursos e información forman la cadena de suministro.

Según Christopher (2005) la cadena de suministro simboliza el conjunto de partes o sub-partes indispensables para la entrega eficaz de materiales (en calidad, cantidad, lugar y momento adecuado) a un cliente o mercado.

Dentro de la cadena de suministro (CS) podemos encontrar partes como la producción, distribución, manipulación, almacenaje y comercialización de un producto y sus componentes. Escudero (2011) menciona que una de las partes importantes en la CS es el almacenaje, que es necesario para regular el mercado de consumo. Flamarique (2019) también menciona que el almacenaje es una necesidad, esto para gran parte de las compañías industriales, comerciales o de servicios. En su función, estas empresas requieren nivelar los desequilibrios entre la oferta y la demanda de productos.

Al hablar de la palabra almacén, comenta De Koster *et al.* (2007) que normalmente lo utilizamos cuando la tarea primordial es la de almacenar o depositar

materiales. En cambio, cuando la distribución de dichos materiales es la actividad primordial, se aplica la expresión de centro de distribución. Para el segundo caso es factible que la función de almacenamiento o almacenaje tenga menor importancia y los productos incluso se reacondicionen y expidan sin necesidad de almacenar.

Algunos de los usos de los almacenes son:

■ **Para adaptar mejor la oferta a la demanda de los clientes:**

Uno de los mayores desafíos en la gestión de una cadena de suministro es que la demanda puede cambiar rápidamente, pero la oferta tarda más en cambiar. Los aumentos repentinos de la demanda, como las estacionalidades, sobrecargan la capacidad de una CS. Las tiendas minoristas, en particular, enfrentan estacionalidades que son tan severas que sería imposible responder sin tener un producto almacenado.

■ **Consolidar producto para reducir los costos de transporte y brindar servicio al cliente:**

En ocasiones las empresas reciben productos de varios proveedores o por cantidades pequeñas y van consolidando la carga para poder distribuir a sus clientes de manera eficiente y económica, para lograr esto deberán recurrir al almacenamiento.

Derivado de las ventajas del almacenamiento, la decisión sobre la ubicación de sus instalaciones es un elemento crítico en la planificación estratégica para una amplia gama de empresas privadas y públicas. Las ramificaciones de la ubicación de instalaciones son de base amplia y duradera, lo que afecta a numerosas decisiones operativas y logísticas (Hesse y Daskin, 1998).

Siguiendo con las áreas que conforman una CS, también podemos mencionar como parte importante el tema de la distribución del producto, ya que esto genera un alto impacto económico debido a que hay un costo fijo cada vez que este se transporta. Esto es especialmente alto cuando el transportista es un barco, un avión o un

tren; y para amortizar este costo fijo es necesario llenar el portaaviones a capacidad. En consecuencia, un distribuidor puede consolidar los envíos de los proveedores en envíos grandes para los clientes intermedios. Del mismo modo, cuando los envíos se consolidan, es más fácil recibirlos en sentido descendente (Bartholdi y Hackman, 2011).

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se ha mencionado anteriormente la importancia de que las empresas cuenten con almacenes tanto para adaptar mejor la oferta a la demanda de los clientes, como consolidar producto para reducir los costos de transporte y brindar un mejor servicio, pero también es de suma importancia destacar la elección de las ubicaciones de dichos almacenes, porque va de la mano con lo anterior.

En este trabajo se estudia la característica de una red de sucursales que se abastece de manera independiente, lo que puede llegar a generar un uso inadecuado de los recursos y, por lo tanto, elevación de los costos de distribución. La particularidad principal es que los proveedores que abastecen esta cadena tienen diferentes formas de entrega a las sucursales, lo cual puede llegar a generar costos de distribución muy elevados, dependiendo del tipo de entrega.

Basados en el problema original, clasificamos tres tipos de proveedores según su método de entrega, para generar una red logística que considere almacenes de consolidación para aminorar los costos de distribución en las sucursales. Se desea diseñar un modelo de apoyo a la toma de decisiones que localice dichos almacenes de consolidación para la distribución óptima de productos, considerando diferentes ubicaciones potenciales.

Para este problema no manejaremos antecedentes de manejo de almacenes porque se asume que actualmente las sucursales guardan su mercancía en su propia bodega, pero para mejorar la distribución y los costos, se implementará un almacén.

1.1.1 DESCRIPCIÓN DE PROVEEDORES:

Proveedor tipo 1: El producto que maneja es de alto movimiento y esto puede resultar que las compras se realicen constantemente y con cantidades grandes.

La manera en la que este proveedor suministra el producto es de manera directa a cada sucursal, de acuerdo con las características del producto esto se desea mantener así.

Proveedor tipo 2: El producto que maneja es de bajo movimiento y esto puede generar que las compras se realicen de manera prolongada y en cantidades pequeñas.

La manera en la que este proveedor suministra el producto es de manera directa a cada sucursal, sin embargo, por las características del producto esto se desea modificar.

Proveedor tipo 3: El producto que maneja es de alto movimiento y esto puede resultar, al igual que el producto del proveedor tipo 1, que las compras se realicen de manera constante y por cantidades grandes.

La manera en la que este proveedor suministra el producto es en sus propias instalaciones, es decir, cada sucursal requiere trasladarse al proveedor a adquirir el producto y regresar, de acuerdo con las características del producto, con las condiciones del proveedor, el uso de recursos y costos de transporte, esto se requiere modificar.

La red y distribución de las sucursales del problema original se encuentran representadas en la figura 1.1.

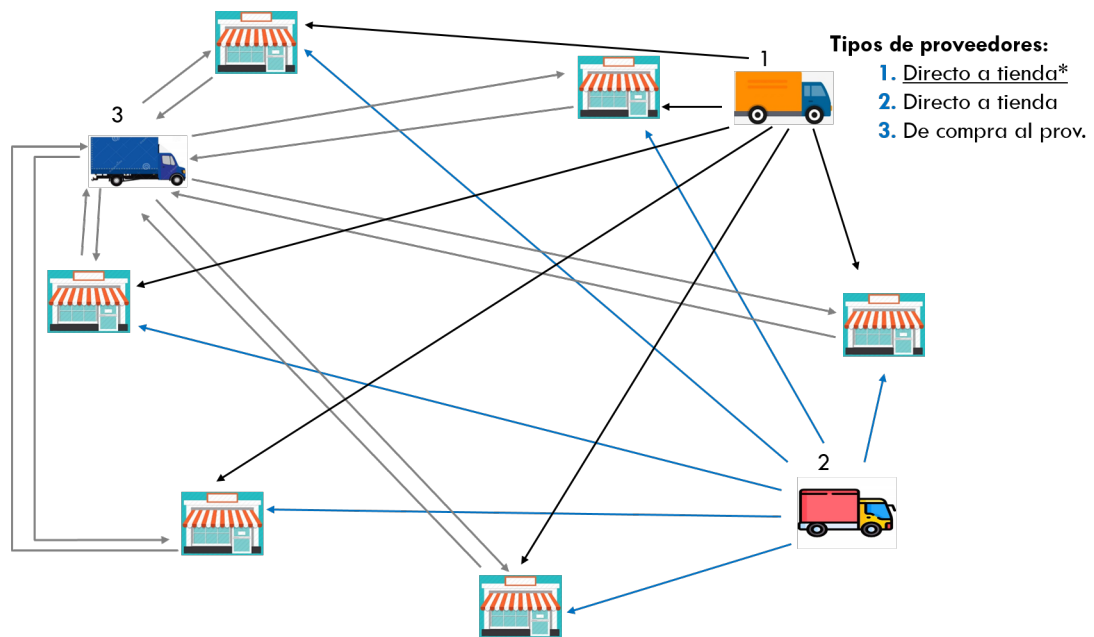


FIGURA 1.1: Red y distribución del problema original

Fuente: Elaboración propia

1.2 OBJETIVO

Reducir costos de distribución a través del rediseño de una red de tiendas de conveniencia, seleccionando la mejor configuración de la red e implementando almacenes de consolidación usando una herramienta de optimización.

1.3 HIPÓTESIS

La creación de una red con almacenes de consolidación reducirá los costos en la distribución para las sucursales y permitirá un mejor flujo de producto.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La ubicación estratégica de un almacén en una red logística es una decisión fundamental, ya que tendrá un impacto significativo en la relación entre costo y calidad del servicio en el sistema logístico global. (Cos y Navascues, 2001).

Según Cos y Navascues (2001), tomar decisiones estratégicas sobre la ubicación de nuevas instalaciones, como minoristas, almacenes o fábricas, es uno de los aspectos fundamentales en el ámbito logístico. Estas decisiones desempeñan un papel crucial en la eficiencia del flujo de materiales a través del sistema de distribución.

También, Anaya (2007) menciona que solo algunos términos han ocasionado habitualmente en logística a planteamientos más refinados para intentar hallar respuestas para optimizar las ubicaciones físicas de almacenes en función de los costos de transporte; partiendo de los modelos completamente matemáticos basados en programación lineal, hasta llegar a los modelos con simulación más o menos heurísticos, para hallar una respuesta razonable al problema.

Bartholdi y Hackman (2011) mencionan que uno de los mayores desafíos en la gestión de una cadena de suministro es que la demanda puede cambiar rápidamente, pero la oferta tarda más en cambiar. Los aumentos repentinos de la demanda, como las estacionalidades, sobrecargan la capacidad de una cadena de suministro. Las tiendas minoristas, en particular, enfrentan estacionalidades que son tan severas que sería imposible responder sin tener un producto almacenado.

Dado que la importancia de los almacenes se encuentra ligado con la determinación de su ubicación, si se desarrolla un método que nos ayude a la toma de decisiones de dónde ubicar un almacén, nos resolverá el problema original de la red de sucursales que es contar con un almacén.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo se encuentra distribuido de la siguiente manera:

En este primer capítulo se presentó la introducción a nuestro trabajo de tesis, donde se hace la descripción del problema y se detalla el objetivo, hipótesis y justificación de esta tesis.

En el capítulo 2, se muestran los temas como redes de distribución, su diseño, importancia y clasificación. También se mencionan las redes de tiendas, almacenes, sus ventajas y los métodos más utilizados para la ubicación de almacenes. Además, se expone una revisión de literatura relacionada con nuestro tema de estudio.

Para el capítulo 3, se muestra la metodología empleada y el modelo matemático propuesto. El capítulo 4 contiene la explicación de la herramienta para dar solución al problema, mientras que en el capítulo 5 se describen los análisis y resultados. Y finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones, contribuciones y posible trabajo futuro de esta investigación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura relacionada con los temas abordados en la tesis. En primer lugar, se examinaron las redes de distribución, incluyendo su diseño, importancia y clasificación. Posteriormente, se analizaron las tiendas de conveniencia, describiendo su estructura y las redes más comunes a nivel nacional. A continuación, se profundizó en los almacenes de consolidación y se destacaron sus ventajas. Además, se realizó una revisión general de la literatura relacionada con el problema de localización de instalaciones. Por último, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de artículos relacionados con dicho problema.

2.1 REDES DE DISTRIBUCIÓN

Una de las principales actividades que une a la cadena de suministro con logística, es la distribución, dado que es la encargada de poner a disposición los productos o servicios de una compañía hasta su cliente final. De acuerdo con García (2020), una red de distribución es un conjunto de establecimientos para almacenar y métodos de transporte que reciben recursos y los colocan a disposición de los compradores, en inglés *distribution network*. Para el concepto *retail network-chain* hace referencia al sistema formado por establecimientos que hacen llegar el producto al cliente final y

la empresa matriz.

Una vez definido el tipo de distribución, el aspecto importante a considerar es el transporte, según Eslava (2017), las redes de transporte de carga se desarrollan como respuesta a la necesidad de establecer conexiones y trasladar los productos de consumo desde el lugar de producción de la empresa hasta el mercado donde se encuentran los clientes. En el contexto de las redes de distribución, resulta crucial proporcionar información precisa sobre la cantidad, la ubicación y la capacidad de cada centro de distribución con el objetivo de garantizar la máxima eficiencia en las operaciones de la empresa.

Es importante recalcar que la distribución comercial se constituye como una probable fuente de ventaja competitiva, en la medida en que beneficia a que las compañías garanticen una superior ubicación en el mercado de manera sostenible. Como aspectos básicos de esta disciplina, hay que destacar que su núcleo, similar que en el marketing, es el intercambio (González y García, 2015).

Según Eslava (2017), la distribución física es una parte de la logística que se encarga de mover, almacenar y procesar pedidos de productos finales o acabados. En la figura 2.1 se muestra de una forma general alternativas básicas en la distribución de productos.

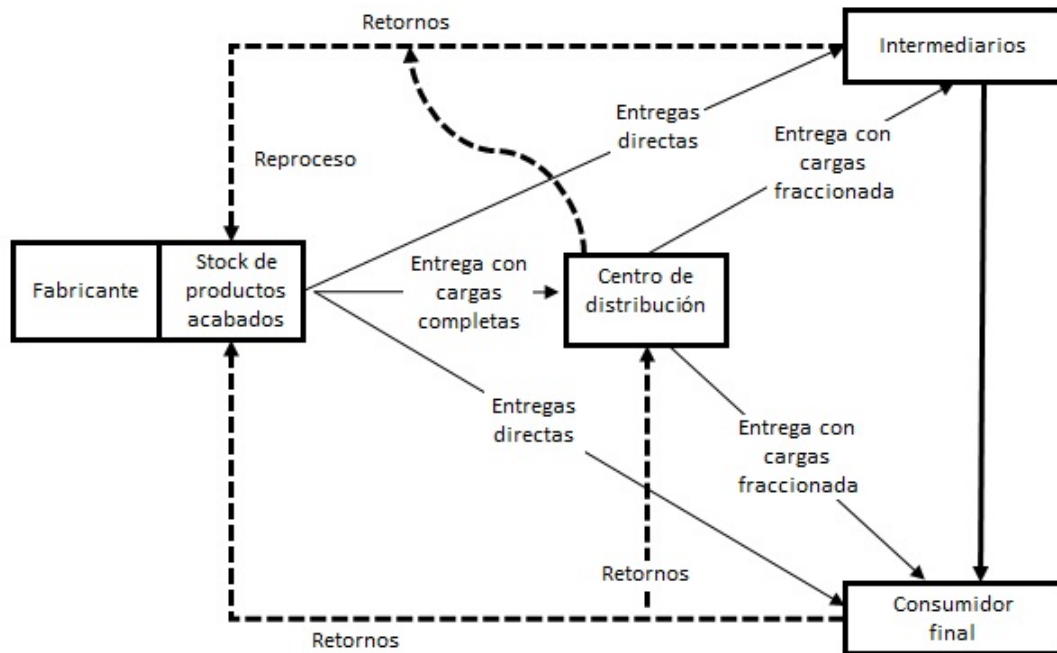


FIGURA 2.1: Flujos típicos en el canal de distribución

Fuente:(Ballou, 1987)

2.1.1 DISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Para poder realizar el movimiento de mercancía desde los proveedores hasta los clientes dentro de una Cadena de Suministro (CS), se requiere de la distribución, esto es fundamental para que de manera general una compañía sea rentable, debido a que la distribución impacta directamente a los costos de la CS, así como en la experiencia del cliente.

El implementar una adecuada distribución se puede utilizar como medio para alcanzar diversos objetivos de la CS, como lo son bajar costos y una adecuada capacidad de respuesta, debido a esto, muy frecuentemente compañías del mismo giro seleccionan redes de distribución muy distintas entre sí (Sainz, 2001).

Existen factores que son influyentes al momento de diseñar una red de distri-

bución, como el identificar la necesidad del cliente que se está satisfaciendo, ya que con esto se influye en el ingreso de la compañía, que a la par del costo determinan si una red es rentable. Así como también en el servicio al cliente, existen medidas que influyen de acuerdo a la estructura de la red de distribución, como los son: el tiempo de respuesta, diversidad y disponibilidad de artículos, la experiencia del cliente, lo visible del pedido y la capacidad de devolución.

Para las compañías en donde sus clientes están dispuestos a esperar por sus productos, necesitan un reducido número de instalaciones y estas pueden localizarse lejos del cliente, el enfoque de estas puede estar en el aumento de la capacidad de las ubicaciones. Por el contrario, cuando los clientes demandan un tiempo de respuesta reducido, las ubicaciones deben colocarse cerca de ellos, el enfoque en este caso debe estar en tener una gran cantidad de instalaciones aunque con poca capacidad (Vázquez *et al.*, 2006).

Cuando se realizan cambios al diseño de la red de distribución, resultan afectados diferentes costos de la CS. Como el tener un aumento en el número de ubicaciones, su inventario y costo de este también aumentan, la parte de economía a escala para el transporte de entrada ayuda en la reducción en el costo total de transportación.

2.1.2 IMPORTANCIA DEL DISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN

Dentro de los factores para poder ayudar a desarrollar económicamente regiones enteras está la logística, así como para las personas y negocios; ya que los costos logísticos en promedio representan el 13.8% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial. Para poder manejar eficientemente estos costos se necesita considerablemente de la configuración estratégica de las redes de abastecimiento. Debido a eso, el diseño de una red distribución logística es de gran relevancia e involucra la toma de decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo (Gámez *et al.*, 2017).

Frecuentemente, la actividad de la distribución física, que es la rama de la logística empresarial que se ocupa de mover, almacenar y procesar los pedidos de los productos finales de la empresa, es la más importante en términos de costo, debido a que absorbe cerca de dos tercios de los costos logísticos, es por ello que es de elevada importancia el buen diseño de la red de distribución (Eslava, 2017).

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE DISEÑOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

De acuerdo con Chopra (2003), existen diferentes tipos de redes de distribución, los cuales se clasifican en:

- **Almacenamiento del fabricante con envío directo:**

Los pedidos los toma el minorista e inicia la solicitud de entrega, sin embargo, los productos se almacenan con el fabricante, por lo que éste se encarga de enviar la mercancía directamente al cliente final, pero para la parte de la información, esta fluye del cliente hacia el fabricante a través del minorista, como se muestra en la figura 2.2 Debe existir una buena infraestructura de la información para que el cliente pueda ver la disponibilidad de los productos, así como visibilidad del procesamiento de sus pedidos.

Algunas ventajas es la capacidad de centralizar el inventario con el fabricante, generando disponibilidad de productos, sin costos fijos de instalaciones de almacenamiento, ahorro en costos de manejo. Unas desventajas son que utilizan transporte de paquetería, así que el costo de transporte es alto, también los tiempos de respuesta suelen ser largos, además, si el pedido está conformado por varios productos de distintos fabricantes, el cliente recibirá varios envíos y en caso de existir devoluciones son costosas.

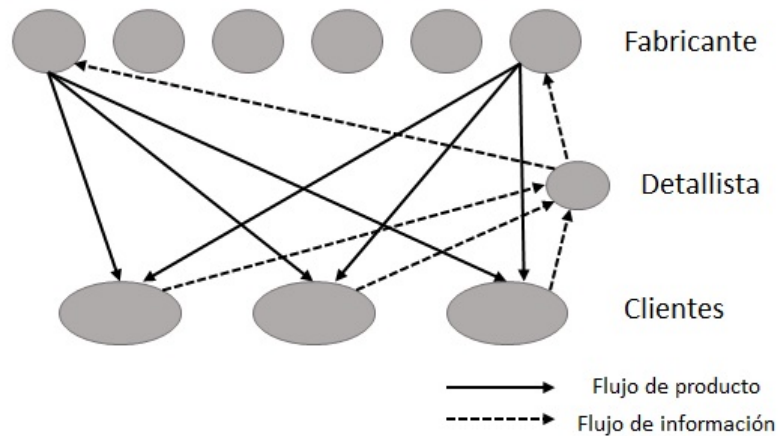


FIGURA 2.2: Almacenamiento del fabricante con envío directo

Fuente: (Chopra, 2003)

- **Almacenamiento del fabricante con envío directo y fusión en tránsito:**

Esta integra las partes de pedido que provienen de diferentes ubicaciones para que el cliente reciba un solo envío, el flujo de la información corre de cliente a fabricante por medio del minorista, como se muestra en la figura 2.3.

Algunas ventajas es que al igual que el anterior centralizar el inventario con el fabricante, generando disponibilidad de productos, al fabricante da la opción de bajar inventario, postergando la personalización hasta que se realice el pedido. En la mayoría de los casos, el costo de transporte es menor y se simplifica la recepción, porque el cliente recibe en una sola entrega su pedido. Los tiempos de respuesta pueden ser un poco más altos al anterior, la visibilidad de los pedidos se vuelve más fácil. La devolución es similar al envío directo. Los costos generales de instalación, manejo de la CS e inversión en infraestructura de información son un poco más elevados que el anterior.

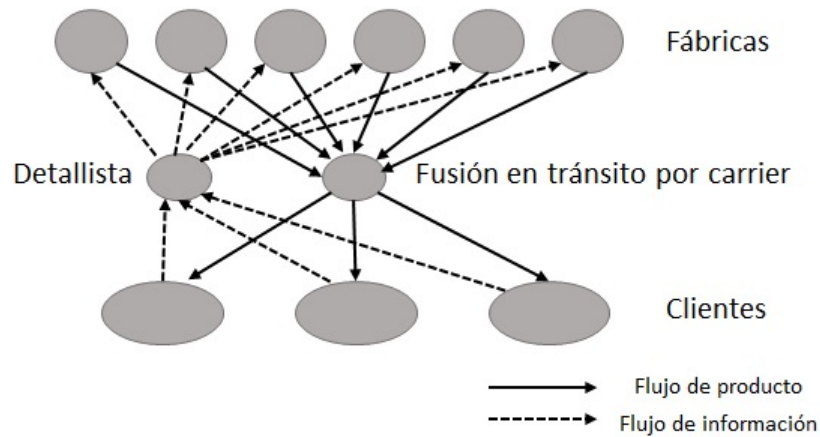


FIGURA 2.3: Almacenamiento del fabricante con envío directo y fusión en tránsito

Fuente: (Chopra, 2003)

- Almacenamiento del distribuidor con entrega del transportista:** En este tipo de distribución, el inventario se mantiene en almacenes de distribuidores o minorista, a partir de aquí se transportan hacia el cliente. El flujo de la información es de clientes a distribuidores / minoristas, como lo muestra la figura 2.4.

Algunas ventajas es que la infraestructura de información necesaria es notablemente menos compleja, el tiempo de respuesta con el almacenamiento del distribuidor es mejor, así como las devoluciones, los costos de transporte son poco más bajos que de almacenamiento en fabricante. Sin embargo, algunas desventajas son que los costos de las instalaciones son un poco más elevados, además requiere visibilidad en tiempo real entre los clientes y el almacén, también se limita la variedad de productos con la que se puede contar.

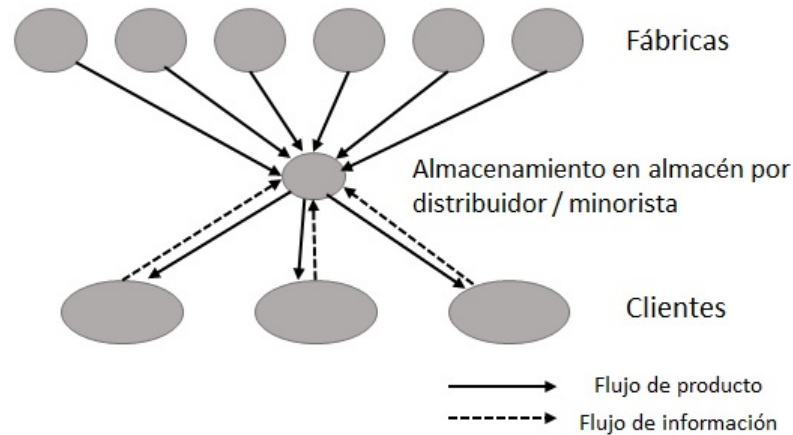


FIGURA 2.4: Almacenamiento del distribuidor con entrega del transportista

Fuente: (Chopra, 2003)

- Almacenamiento del distribuidor con entrega de última milla:** Para esta distribución el distribuidor / minorista realiza la entrega del producto a la casa del cliente en lugar de utilizar un transporte de paquetería, este tipo de almacenamiento se muestra en la figura 2.5.

Los tiempos de respuesta son más rápidos, se tiene visibilidad de los pedidos, las devoluciones son mejores porque los camiones que realizan las entregas también pueden recoger las devoluciones. Sin embargo, requiere que el almacén del distribuidor esté cerca del cliente, lo que aumenta la cantidad de almacenes requeridos, niveles altos de inventario, costos de transporte más altos, estos son justificables en productos voluminosos donde los clientes estén dispuestos a pagar por ese servicio, este tipo de entrega puede ser más económica para lugares muy poblados. La infraestructura de información es similar al anterior, aunque la variedad de productos es menor.

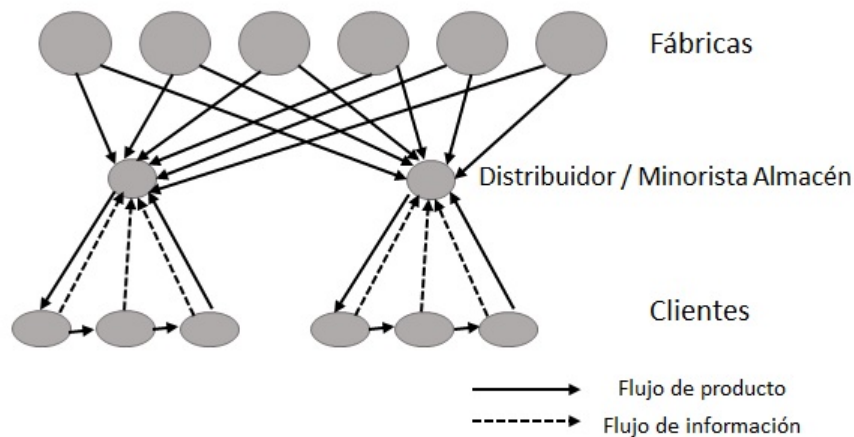


FIGURA 2.5: Almacenamiento del distribuidor con entrega de última milla

Fuente: (Chopra, 2003)

- Almacenamiento del fabricante o distribuidor con recogida por parte del consumidor:** Para este tipo, los productos se almacenan con el fabricante o distribuidor, pero los clientes realizan sus pedidos en línea o por teléfono y luego designan puntos de recogida para sus pedidos. Los flujos de información y productos se muestran en la figura 2.6.

Los costos de inventario y costos de transporte son bajos, con esto aumenta la venta y la cantidad de clientes atendidos en línea, las devoluciones pueden manejarse en el sitio de recogida, se puede pagar en efectivo y no requiere que el cliente esté disponible en su domicilio para la entrega. Por el contrario, el principal obstáculo es el mayor costo de instalación y manejo del sitio de recolección. Se requiere una buena infraestructura de información, visibilidad del pedido y buena coordinación entre las partes. Se compara el tiempo de respuesta con el de transporte de paqueterías y la variedad y disponibilidad de producto con la de fabricante o distribuidor. La experiencia del cliente disminuye porque ellos tienen que acudir a recoger sus pedidos.

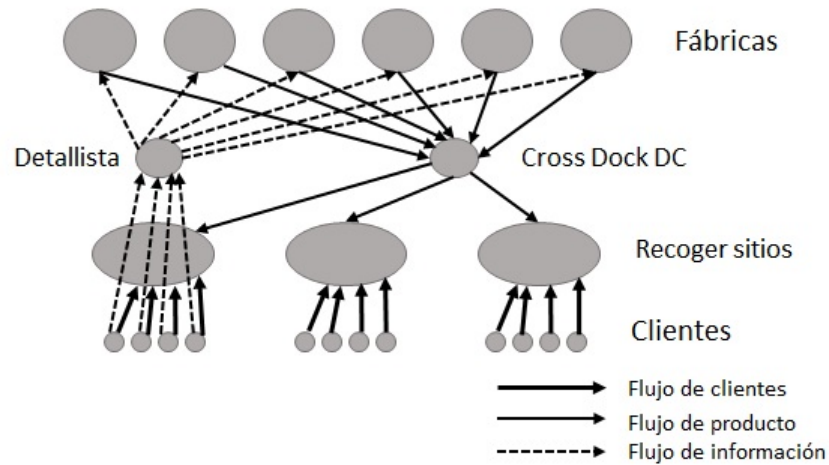


FIGURA 2.6: Almacenamiento del fabricante o distribuidor con recogida por parte del consumidor Fuente: (Chopra, 2003)

- Almacenamiento minorista con retiro del cliente:** Aquí el inventario se almacena directamente en las tiendas minoristas, el cliente acude a la tienda a comprar o a recoger su pedido que realizó por teléfono o en línea.

El costo del transporte es considerablemente más bajo, ya que es posible utilizar transporte económico para el abastecimiento de los minoristas. El tiempo de respuesta es muy bueno, las devoluciones son muy sencillas porque son directo con el minorista. Requieren una infraestructura de información mínima para compras directamente en tienda, pero si la compra fue en línea aquí sí se requiere una gran infraestructura que permita dar visibilidad del pedido. Además, requiere muchas instalaciones por lo que sus costos en este rubro son altos, es muy costoso lograr la disponibilidad del producto.

2.2 RED DE TIENDAS

No existe una narrativa precisa en cuanto a los orígenes de la red de tiendas, ya que generalmente surgen en cualquier lugar donde un grupo de personas se establece

o comienza a vivir. Estas tiendas se originan debido a la necesidad de adquirir productos básicos cuando hay escasez, lo que genera el deseo de satisfacer dicha falta. Así, se crean pequeños establecimientos conocidos como tiendas, donde se venden diversos productos para cubrir las necesidades de los habitantes. Tradicionalmente, estas tiendas son pequeños locales donde los vendedores brindan atención y servicio directo, asesorando a los clientes sobre los productos y servicios disponibles (Chopra, 2003).

2.2.1 TIENDAS DE CONVENIENCIA

Actualmente, los productos de conveniencia se refieren a los productos de consumo que el usuario normalmente adquiere con constancia, rápidamente y con poco esfuerzo. Además, los nombran “bienes de compra rápida”. La conveniencia o comodidad pudiera ser interpretada como cercana al hogar del cliente, sencillo acceso a medios de transporte, cercanía a lugares donde las personas van durante el día y la noche (Leal, 1995).

Las tiendas de conveniencia se presentan como establecimientos minoristas que siguen un formato de distribución específico. Estos puntos de venta abarcan alrededor de 500 metros cuadrados y ofrecen aproximadamente 1.500 productos distintos, tanto de alimentación como de otros rubros. Además, se caracterizan por contar con un horario de apertura mínimo de 18 horas (Resa, 2005).

2.2.2 REDES DE TIENDAS DE CONVENIENCIA MÁS COMUNES

Existen muchas tiendas de conveniencia en el país, en las cuales se pueden efectuar compras y pagos en un mismo lugar.

TiendasDeConveniencia.org (2020) nos menciona las más importantes:

- Oxxo
- 7 Eleven
- Circle K
- Super Q
- Pits
- GoMart
- Kiosko
- Extra

Sobre la información proporcionada, es importante analizar sobre los factores que han contribuido para hacer posible este increíble crecimiento de tiendas de conveniencia en México. Los motivos de este progreso se sitúan en las propias características del modelo de negocio:

1. Ubicación: Las tiendas de conveniencias están localizadas estratégicamente en zonas de la ciudad o áreas de servicio sobre las que existe tanto un gran tráfico de vehículos como de peatones.
2. Horario: Se mantienen abiertas durante una gran jornada, gran parte de ellas son tiendas de horario ininterrumpido de 24 horas y los 365 días del año. Algunas están abiertas mínimo 18 horas al día.
3. Otros servicios: Adicional de la venta de artículos para consumo básico, el ofrecimiento de las tiendas de conveniencia se incrementa con otros servicios como; pago de servicios, depósitos bancarios, pagos de tarjetas de crédito, envío y recepción de dinero, recargas telefónicas, etc.
4. Rapidez: Hablamos de un servicio inmediato. Normalmente, los consumidores no realizan compras de gran tamaño, tampoco permanecen mucho tiempo en

la tienda, así que al pagar en caja es también (o debería de serlo) de manera fluida.

2.3 CONSOLIDACIÓN

Las tareas de los seres humanos generalmente cuentan con carácter dinámico, debido al cambio constante. Los objetos se alteran, ya sea por mejorar, empeorar o simplemente evolucionar, esto es, que un aspecto está sujeto a cambios, pruebas y tiene un periodo de adaptación. En una forma cotidiana, se puede definir a la consolidación como una manera de afianzar, dar firmeza, seguridad y solidez a algo. Cuando el objeto afectado alcanza un nivel de maduración, se habla de consolidación, mencionándolo como algo positivo. Se puede hablar de consolidación cuando el objeto afectado logra una estabilidad, un nivel razonable de funcionamiento. Así también el adjetivo maduro se puede tener como semejante de consolidación, algo alcanza su madurez cuando ya está disponible para consumirse. Incluso las ideas están maduras si han superado un periodo previo de reflexión.

2.3.1 ALMACENES DE CONSOLIDACIÓN

Referente a los almacenes de consolidación, Escrivá y Savall (2005) mencionan que son aquellos en los que se concentran una gama de pedidos chicos de diversos proveedores, para integrarlos y así realizar un envío de un tamaño más grande. Tiene como ventaja el aminorar los costos de transporte al asociar varios pedidos en uno de mayor volumen; hace posible adaptar la técnica del Just in Time y beneficia el flujo de los productos a los clientes, es lo podemos observar en la figura 2.7.

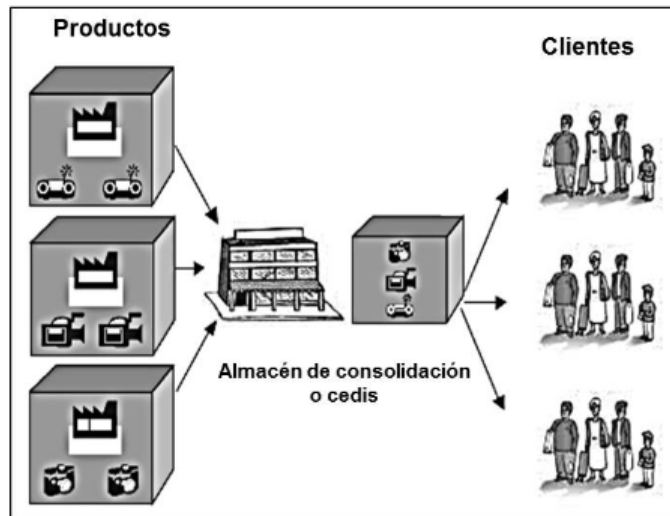


FIGURA 2.7: Esquema almacén de consolidación o CEDIS

Fuente: (Escriva y Savall, 2005)

2.3.2 VENTAJAS DE ALMACENES DE CONSOLIDACIÓN

De acuerdo con Nahmias (2007), existen diferentes ventajas de utilizar almacenes de consolidación, como lo son:

Disminución de costos de transporte: Una de las ventajas principales de los almacenes de consolidación es disminuir los costos de transporte, esto sucede porque las cargas se agrupan al igual que sus costos de envío y almacenamiento, generando que el envío sea más rentable y eficiente.

Aumento en la calidad del servicio: Debido a que las mercancías son agrupadas, los almacenes de consolidación proporcionan una gama de posibilidades para la empresa. Productos similares se envían más frecuentemente, realizando más rutas.

Aprovechamiento mayor del espacio: Otra de las ventajas de los almacenes de consolidación es poder aprovechar al máximo los espacios en los vehículos de transporte.

2.4 LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

El proceso para localizar instalaciones es elegir un lugar geográfico entre diferentes alternativas para ejecutar las operaciones de una compañía. Los gerentes de organizaciones de servicios o de empresas manufactureras tienen que considerar demasiados factores cuando se evalúa la utilidad de un espacio en específico (Carlsson y Rönnqvist, 2005).

2.4.1 VENTAJAS DE UNA CORRECTA UBICACIÓN DE INSTALACIONES

Económicas: Disminución de los costos de abastecimiento o transporte de materias primas. El tener las herramientas para poder determinar una correcta ubicación de las instalaciones nos ayuda a mejorar los costos de operación, así como los costos de instalación.

Ambientales: Disminución de emisiones de carbón, dado que el transporte, en el área de logística, es fundamental para las empresas, debido a que facilita el correcto funcionamiento de la cadena de suministro, principalmente el transporte terrestre, que se encarga de transportar las materias primas o los productos terminados entre diferentes lugares para cumplir con las demandas de los clientes. Al ubicar correctamente las instalaciones se disminuyen las distancias a recorrer y por ende las emisiones de CO_2 .

Sociales: Apoyo al desarrollo de la industria, el beneficio de contar con una correcta ubicación de una instalación ayuda a generar un aumento en la rentabilidad de la empresa y así poder crecer y ayudar al desarrollo social.

2.4.2 LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Las empresas en su cadena de suministro se enfrentan a muchos problemas de planeación estratégica, donde uno de los más importantes es la ubicación de sus instalaciones, debido a que impacta de manera directa en los costos tanto de instalación como de distribución, entre otros.

Adicional, nos ayuda a establecer las características para una correcta y apropiada elección de niveles de inventario que marca en gran medida el nivel de servicio al cliente, así como correcta administración de los servicios de transporte.

De diversas maneras, para las cadenas de suministro el tema de ubicación de instalaciones es su “estructura ósea”, frecuentemente se cuenta con una gran cantidad de posibles instalaciones, además de diversos artículos adicionados a estas, variedad de proveedores para atenderlas, así como los diferentes clientes que estas pueden atender, por todo esto es que a menudo es un tema complicado.

2.4.3 MÉTODOS MÁS USADOS PARA LA UBICACIÓN DE INSTALACIONES

De acuerdo con Melo *et al.* (2009), la mayoría de los artículos presentan un objetivo de minimización de costos. Además, este objetivo suele expresarse como un solo objetivo mediante la suma de varios componentes de costos que dependen del conjunto de decisiones modeladas. Por tanto, el objetivo de la mayoría de los artículos consultados es determinar la configuración de red con el menor costo total.

Por el contrario, como podemos observar en la figura 2.8, la maximización de beneficios ha recibido mucha menos atención, esto es bastante sorprendente porque la mayoría de las actividades comerciales están orientadas a las ganancias.

Existen diferentes tipos de metodologías de solución que se han utilizado para resolver problemas de diseño de la red de la cadena de suministro (SCND) de un solo objetivo y su enfoque se puede ver en la figura 2.9.

Distinguimos entre aquellos problemas resueltos con software de propósito general y aquellos resueltos con un algoritmo especialmente diseñado. Dentro de cada clase, se identifican dos casos más:

1. La categoría solucionador general. Solución exacta que se refiere al uso de software de programación matemática para resolver un problema de forma óptima.
2. Alternativamente, se puede ejecutar un solucionador comercial hasta que se alcance un límite de tiempo determinado. Denotamos este caso por Solucionador general, solución heurística.

La clase dedicada a los algoritmos de solución especialmente diseñados se divide en dos categorías:

- Algoritmo específico, solución exacta
- Algoritmo específico, solución heurística

La primera categoría incluye técnicas de propósito especial tales como branch-and-bound, branch-and-cut, generación de columnas y métodos de descomposición. Entre los enfoques exactos, los algoritmos branch-and-bound han sido un esquema de solución popular, a veces también combinados con relajación lagrangiana o procedimientos heurísticos para obtener cotas.

Los modelos que son comparativamente más complejos y de tamaño realista, solo se pueden resolver con un método heurístico, en algoritmo específico, solución heurística. Relajación lagrangiana, programación lineal basada en las heurísticas y las metaheurísticas se encuentran entre las técnicas más populares.

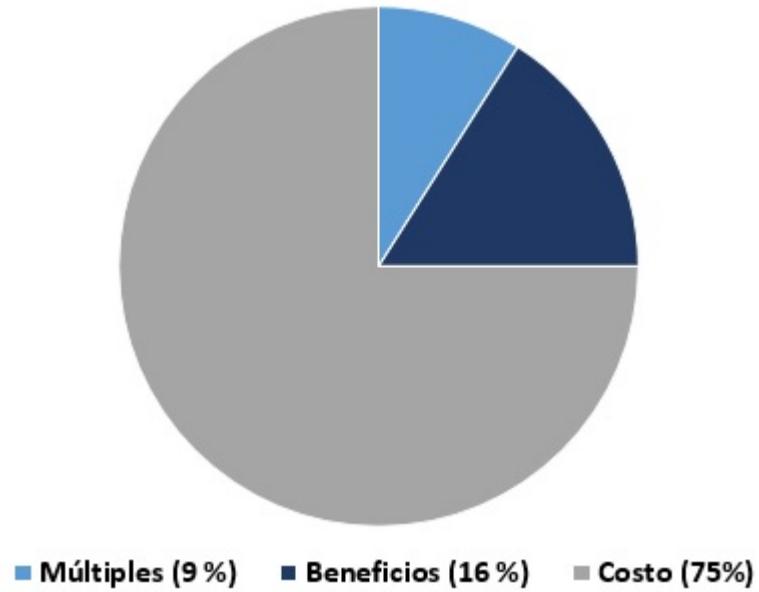


FIGURA 2.8: Medidas de rendimiento de la cadena de suministro

Fuente: (Melo et al.,2009)

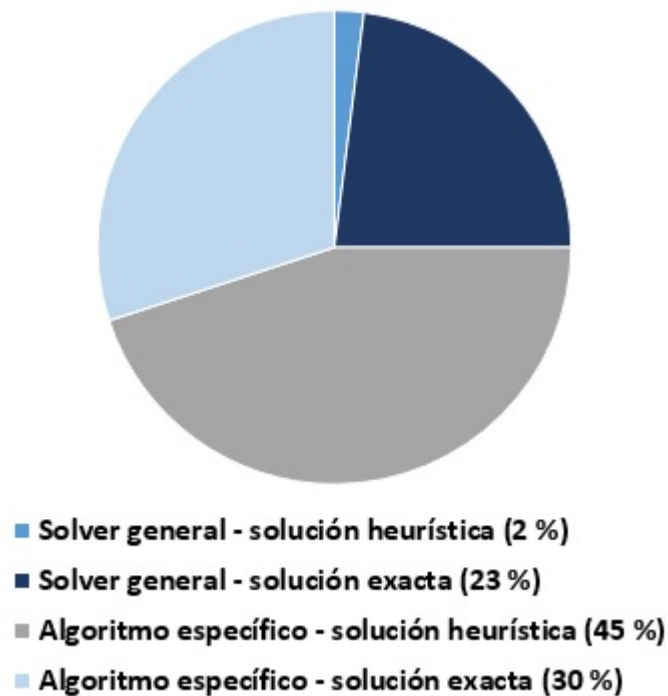


FIGURA 2.9: Enfoques de solución para problemas de un solo objetivo

Fuente: (Melo et al.,2009)

2.4.4 PROBLEMAS DE UBICACIÓN DE INSTALACIONES DE VARIOS NIVELES

De acuerdo con González y García (2015), los problemas de ubicación de instalaciones (FLP) establecen un campo importante de interés para los profesionales e investigadores del área de la investigación de operaciones. En las últimas décadas, ha llamado la atención una derivada de FLP que es el problema de ubicación de instalaciones de niveles múltiples (MLFLP).

En un MLFLP, se proporciona un grupo de clientes que tienen una demanda, ya sea de servicio o productos y un grupo de ubicaciones potenciales fraccionadas en k niveles. El propósito es definir qué ubicaciones se abren de manera simultánea en cada nivel, de tal manera que los clientes se consignent a una o varias sucesiones de ubicaciones abiertas, buscando la optimización de la función objetivo.

Una amplitud normal de dos o más niveles de ubicaciones corresponde al problema de ubicación de instalaciones no capacitadas de niveles múltiples (MUFLP).

2.5 LITERATURA RELACIONADA AL PROBLEMA

Camm *et al.* (1997) en busca de reestructurar una CS hace una mezcla de OR/MS y tecnología de la información, fusionando programación entera, modelos de optimización de redes y un sistema de información geográfica (SIG). Su estrategia de modelado fue descomponer el problema general de la cadena de suministro en dos subproblemas fáciles de resolver: un problema de ubicación de centros de distribución y un problema de abastecimiento de productos (uno para cada categoría de productos). Utilizó un modelo ordinario de ubicación de instalaciones no capacitadas para encontrar ubicaciones de centros de distribución (CD) óptimas y para asignar clientes a los CD. Y para el problema de abastecimientos de productos utilizó un modelo de transporte simple para cada categoría de producto. Mencionan que el uso

de un SIG como medio para la interacción del usuario, facilita en gran medida su aceptación.

Jayaraman *et al.* (1999) nos muestran un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para resolver la ubicación de instalaciones de remanufactura, además, transbordo, producción y almacenamiento. Su trabajo presenta multiproductos, el modelo plantea diferentes ubicaciones potenciales y para su ejecución utiliza GAMS (Generalised Algebraic Modeling System) que es un paquete de modelado matemático que es compatible con diferentes solver's.

Erlebacher y Meller (2000) analizaron un problema de ubicación-inventario para la instalación de CD, para lo cual desarrollaron un modelo analítico, sin embargo, dado que la versión general del problema es NP-Hard desarrollaron también procedimientos heurísticos. Para tratar de encontrar la cantidad óptima de CD, desarrollaron un modelo de diagnóstico “estilizado” basado en algunas suposiciones simplificadoras, sin embargo, solo era factible en casos limitados, dado lo anterior, desarrollaron heurísticas como enrutamiento de vehículos y búsqueda local para decidir sobre el número de CD a abrir, la asignación de clientes a los CD y también las ubicaciones de los CD.

Vidal y Goetschalckx (2001) trabajan con un problema de optimización para maximizar los beneficios, presentando un modelo de cadena de suministro global que incluye explícitamente la asignación de costos de transporte y precios de transferencia (TP) como variables de decisión. Dado que el problema resultante es NP-difícil, desarrollan un algoritmo de solución heurística que aplica programación lineal sucesiva a partir de la reformulación y relajación del problema original, los cuales han sido implementados usando AMPL conectado con CPLEX.

Wouda *et al.* (2002) estudian la optimización de una red de suministro utilizando un modelo de programación lineal entero mixto para encontrar el número óptimo de plantas, sus ubicaciones y la asignación de la cartera de productos a estas plantas, al minimizar la suma de los costos de producción y transporte. La optimización se

llevó a cabo con el sistema de optimización Xpress - MP de Dash Optimization Ltd. El modelo es evaluado en diferentes escenarios, dado que el modelo hace un balance entre los costos de transporte y las economías de escala en la producción y recepción de los productos.

Carlsson y Rönnqvist (2005) trabajan con un problema de silvicultura, el proyecto ayuda a decidir la ubicación de terminales y hacer que la distribución sea más integrada y eficiente. Desarrollaron un modelo matemático donde una característica novedosa del modelo es que combina un aspecto de ubicación de la instalación con la ruta del barco, para su ejecución utilizaron un solucionador de IP comercial. Para obtener una solución entera factible, usaron una técnica de ramificación y acotación que se basa en resolver relajaciones de programación lineal (LP) donde las variables binarias relajadas se fijan usando estrategias especiales de ramificación. Hay un gran número de posibles flujos de retorno y estos no se pueden representar directamente en el modelo, en su lugar, se utiliza una técnica basada en la generación de columnas, que genera dinámicamente los flujos de retorno durante el proceso de solución.

Chakravarty (2005) desarrollo un modelo que optimiza las decisiones de inversión de una planta, al tiempo que garantiza que los productos producidos en esa planta absorban de manera óptima los gastos generales de inversión de la planta, demostrado claramente cómo la ubicación de una planta, las cantidades de producción y las cantidades de exportación/ importación se pueden determinar simultáneamente con la fijación de precios (incluida la asignación de gastos generales). También han establecido por qué los costos fijos relacionados con la planta no influyen directamente en la relación anterior, el objetivo de este estudio es maximizar sus ganancias.

Eskigun *et al.* (2005) consideran el diseño de una red de CS de salida teniendo en cuenta los plazos de entrega, la ubicación de las instalaciones de distribución y la elección del modo de transporte, esto para una planta automotriz. Su formulación inicial es un modelo de programación entera no lineal, sin embargo, con la introducción de nuevas variables binarias y restricciones, el problema se puede re-

formular como un modelo de programación lineal entera (ILP). Cuando el tamaño de las instancias aumenta, no es práctico obtener soluciones exactas en un tiempo computacional razonable. Por lo tanto, desarrollaron una heurística lagrangiana, algunas de las restricciones complicadas se relajan y el problema se descompone en subproblemas. Se utiliza un algoritmo de subgradiente para resolver el problema dual resultante, además, desarrollan una heurística codiciosa para obtener rápidamente un buen límite superior inicial. Dado que el algoritmo de subgradiente suele dar una solución factible dual que no es factible primal, se desarrolla un algoritmo de viabilidad. La combinación de estos tres algoritmos (es decir, la heurística codiciosa inicial, el algoritmo de subgradiente y el algoritmo de factibilidad) se denomina heurística lagrangiana para NDMC (LHNDMC). Para su ejecución se utilizó IBM WinterHawk-II SP y plataformas AIX.

Keskin y Ülster (2007) consideran un problema de diseño de un sistema de producción/distribución (PDSD) de múltiples productos y dos etapas en el que se debe ubicar un número fijo de CD capacitados con respecto a proveedores capacitados y ubicaciones minoristas mientras se minimizan los costos totales en el sistema. Presentan inicialmente una formulación de problema de enteros mixtos, esto para facilitar el desarrollo de procedimientos heurísticos eficientes, además proporcionan procedimientos metaheurísticos, que incluyen una búsqueda de dispersión basada en la población con vinculación de rutas y búsqueda local y tabú basada en la trayectoria, para la solución del problema. También desarrollan heurísticas de construcción eficiente y heurísticas de transbordo que se incorporan a los procedimientos heurísticos para la solución de subproblemas. Para resolver el problema de transbordo capacitado (Tr-PDSD), emplearon tres métodos alternativos que incluyen un método exacto usando CPLEX y dos enfoques heurísticos.

Aksen y Altinkemer (2008) presentan un problema basado en enrutamiento de ubicación estática, un método de relajación lagrangiana aumentada integrado en un procedimiento de optimización de subgradiente que genera límites inferiores, mientras que un método heurístico encuentra soluciones factibles. El método basado en

LR nos permite descomponer el problema general en dos subproblemas independientes. El primero se resuelve mediante el paquete de optimización GAMS y su MIP solver Cplex, el segundo subproblema mediante un método LR aumentado y ha sido codificado en C y compilado con Microsoft Visual C++. Probaron el rendimiento del método en términos de la brecha de Lagrange y el tiempo de solución en un banco de pruebas de problemas generados aleatoriamente.

Litvinchev *et al.* (2014) muestran en un inicio un problema del tipo no lineal entero mixto, así que realizan una búsqueda unidimensional con la parametrización de una de sus variables y de esta manera el problema pudo ser manejado como lineal entero mixto, realizó dos métodos de solución, uno mediante la introducción del método de ramificación y acotamiento perteneciente al método de la sección dorada utilizando CPLEX y la segunda mediante la programación del método iterativo con descomposición de Benders. El problema es de un solo tipo de producto y su código fue desarrollado en GAMS.

Tadaros *et al.* (2020) trabajan con un problema de logística inversa para baterías de iones de litio, por lo que desarrollan un modelo de programación entera mixta, donde deben ubicarse tanto los sitios de inspección como las instalaciones de reciclaje, así como para calcular el costo de recogida como el costo de transporte. Las distancias reales por carretera entre municipios de la ciudad estudiada se han calculado utilizando la API Openrouteservices utilizando Python.

En la tabla 2.1 se presenta un resumen de la revisión de literatura relacionada con la ubicación de instalaciones, se destaca el objetivo en el que se han enfocado en cada uno de los problemas estudiados, el número de niveles trabajados, si son para uno o múltiples productos y el tipo de solución empleada para su resolución:

TABLA 2.1: Revisión de literatura

Autor	Objetivo	Niveles	Productos	Tipo de solución
Camm <i>et al.</i> (1997)	Costo	2	Múltiples	Exacta
Jayaraman <i>et al.</i> (1999)	Costo	2	Múltiples	Exacta
Erlebacher y Meller (2000)	Costo	2	Uno	Heurística
Vidal y Goetschalckx (2001)	Beneficios	2	Múltiples	Heurística
Wouda <i>et al.</i> (2002)	Costo	2	Múltiples	Exacta
Carlsson y Rönnqvist (2005)	Costo	2	Uno	Exacta
Chakravarty (2005)	Beneficios	1	Múltiples	Exacta
Eskigun <i>et al.</i> (2005)	Costo	2	Uno	Heurística
Keskin y Ülster (2007)	Costo	2	Múltiples	Heurística
Aksen y Altinkemer (2008)	Costo	2	Uno	Exacta
Litvinchev <i>et al.</i> (2014)	Costo	3	Uno	Exacta
Tadaros <i>et al.</i> (2020)	Costo	2	Uno	Exacta

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Basados en la literatura revisada, podemos mencionar que la ubicación de instalaciones es una actividad crítica dentro de la CS, teniendo una importante relación entre el costo y el servicio. Este tipo de problemas, aunque han sido ampliamente estudiados, para situaciones más complejas como múltiples productos y proveedores se encontraron pocos estudios. Y para la característica de que los proveedores manejen diferentes tipos de aprovisionamiento, que es uno de los aspectos que maneja el problema original, no se encontraron estudios.

El desarrollo de modelos matemáticos son de los más constantes métodos utilizados para la resolución de problemas de ubicación de instalaciones. Esta es una herramienta que permite que por medio de la elaboración de formulaciones matemáticas y una serie de restricciones o criterios propios del problema, se analicen todas las posibles soluciones y elegir la mejor de estas.

3.1 BASE PARA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Debido a que los modelos matemáticos son una herramienta de la investigación de operaciones (IO), nos enfocaremos en las fases utilizadas para un estudio de IO que, de acuerdo con Hillier y Lieberman (2010), son las que se muestran en la figura

3.1.

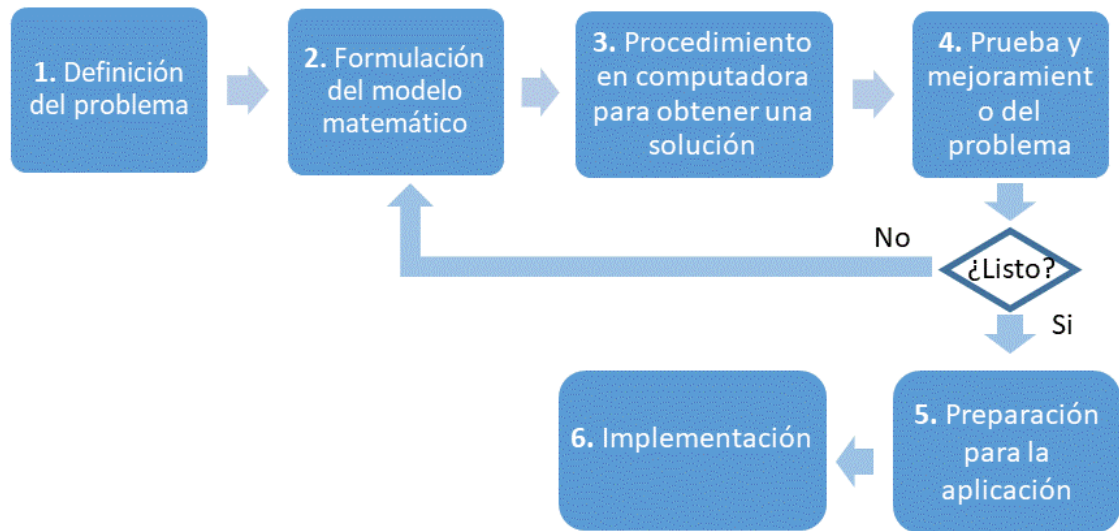


FIGURA 3.1: Fases de la IO para solucionar problemas

Fuente: Elaboración propia basado en Hillier y Lieberman (2010)

Esta metodología describe un proceso de seis fases para abordar un problema a través de la construcción y aplicación de un modelo matemático. La primera fase implica la definición del problema y la recolección de datos relevantes. Luego, se formula un modelo matemático que representa el problema en la segunda fase. En la tercera fase se desarrolla un procedimiento basado en computadora para obtener una solución a partir del modelo. La cuarta fase consiste en la prueba del modelo y su mejora según sea necesario. La quinta fase implica la preparación para la aplicación del modelo en la organización y la documentación de su funcionamiento. Por último, en la sexta fase se lleva a cabo la implementación del modelo y se capacita a las personas involucradas. Se enfatiza que si hay cambios significativos en las características y particularidades del problema, es necesario volver a revisar el modelo para determinar si se necesitan modificaciones.

3.2 DESCRIPCIÓN FORMAL DEL PROBLEMA

De acuerdo con la primera fase de la IO para la solución de problemas, se debe hacer la descripción formal del problema, la cual complementa la descripción de la sección 1.1. En esta sección se presentan las características formales del problema de localización de almacenes de consolidación, describiendo los supuestos considerados en la formulación.

Se tiene un conjunto de clientes $I : \{1, 2, \dots, n\}$ los cuales representan las sucursales que conforman la red de tiendas de conveniencia, estas sucursales manejan diferentes tipos de productos que están representados por el conjunto $T : \{1, 2, \dots, p\}$, para estos productos se requiere satisfacer su demanda D_{it} , cada proveedor $K : \{1, 2, \dots, o\}$ maneja un tipo de producto. Para consolidar algunos productos antes de ser llevados al cliente, se desea implementar almacenes de consolidación para los que se tienen diferentes ubicaciones potenciales denotadas con el conjunto $J : \{1, 2, \dots, m\}$.

Los costos de realizar la instalación de un determinado almacén es f_j , los costos de trasladar la mercancía del proveedor a la posible ubicación de almacén, está denotada por b_{jt} , los costos de trasladar la mercancía de la posible ubicación de almacén a los clientes está denotada por a_{ij} .

También se muestra la cobertura que tiene cada uno de los proveedores, que es PI , donde nos indican si es posible que el proveedor entregue de manera directa al cliente o no, esto de acuerdo si el cliente está dentro del área de cobertura del proveedor.

Lo que se busca es minimizar los costos, tanto de instalar el almacén, como del traslado de la mercancía de proveedor-almacén y almacén-cliente, para esto debemos tomar en cuenta la satisfacción de la demanda, cobertura de proveedores y que se abra al menos un almacén.

Dada la descripción del problema, además de los recursos disponibles y los resultados esperados de una solución exacta, se determinó que la mejor herramienta de solución es la formulación de un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP).

3.3 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO

3.3.1 MODELO DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

CONSIDERANDO DIFERENTES SISTEMAS DE APROVISIONAMIENTO

Se diseña una red de distribución adecuada para el problema que se ha descrito, incluyendo tipos de proveedores y potenciales sitios de localización de almacenes. Atendiendo a la fase 2 de IO para la solución de problemas, esta red se modela matemáticamente sujeta a las restricciones del problema. Se busca minimizar la variable de costos generales de la red aplicando algoritmos de optimización lineal entera mixta.

3.3.2 SUPUESTOS

- La demanda de los productos es conocida y estable, las cantidades a pedir serán enteras.
- Los almacenes de consolidación son no capacitados, por lo tanto, no hay problema de capacidad.
- Los transportes utilizados en la distribución son del mismo tipo.
- Los proveedores tienen capacidad suficiente para satisfacer la demanda del producto que manejan.

3.3.3 NOTACIÓN

Conjuntos:

I conjuntos de clientes	$I : \{1, 2, \dots, n\}$
J conjuntos de almacenes	$J : \{1, 2, \dots, m\}$
K conjuntos de proveedores	$K : \{1, 2, \dots, o\}$
T conjuntos de productos	$T : \{1, 2, \dots, p\}$

Un dato importante es que cada proveedor k , maneja un tipo de producto t , así que $t = k$, por lo tanto, solo manejamos el índice t .

Parámetros:

f_j Costo por abrir el almacén en la ubicación j

a_{ij} Costo por transportar producto del almacén j al cliente i

b_{jt} Costo por transportar producto del proveedor k al almacén j

D_{it} Demanda en el cliente i del producto t

M Un número muy grande

$PI(k)$ Subconjunto de clientes i a los que puede llegar el proveedor k

(cobertura de proveedores).

Variables:

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{En caso de abrir almacén en localización } j \\ 0, & \text{Otra cosa} \end{cases}$$

$$A_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{En caso de viaje con producto } t \text{ a almacén } j \\ 0, & \text{Otra cosa} \end{cases}$$

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{En caso de viaje del almacén } j \text{ al cliente } i \\ 0, & \text{Otra cosa} \end{cases}$$

u_{ij}^t Cantidad del producto t que se envía desde almacén j al cliente i .

v_{jt} Cantidad del producto t (que se diferencia según su proveedor) que se envía desde proveedor k al almacén j .

w_{it} Cantidad del producto t (que se diferencia según su proveedor) que se envía desde proveedor k al cliente i .

3.3.4 MODELO MATEMÁTICO

$$\min Z = \sum_{j \in J} f_j Y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij} B_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} b_{jt} A_{jt} \quad (3.1)$$

El modelo esta sujeto a :

$$V_{jt} \leq M * A_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.2)$$

$$U_{ij}^t \leq M * B_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} U_{ij}^t + W_{it} = D_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (3.4)$$

$$W_{it} = 0 \quad \forall i, t \notin PI \quad (3.5)$$

$$V_{jt} \geq \sum_{i \in I} U_{ij}^t \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in J} Y_j \geq 1 \quad (3.7)$$

$$A_{jt} \leq Y_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.8)$$

$$Y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.9)$$

$$A_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.10)$$

$$B_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.11)$$

$$U_{ij}^t \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.12)$$

$$V_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (3.13)$$

$$W_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (3.14)$$

donde (3.1) es la función objetivo, que busca minimizar el costo total, tanto de instalación de almacenes, como del transporte entre los dos niveles, nos ayudará a definir la mejor ubicación del almacén. Las restricciones (3.2) activa los envíos de mercancía de proveedor a almacén, la (3.3) activa los envíos de mercancía de almacén a cliente, la (3.4) es para garantizar que se satisfaga la demanda de cada producto y para cada uno de los clientes, la (3.5) limita a que cada proveedor solo pueda enviar mercancía directamente a los clientes que se encuentren dentro de su área de cobertura, la (3.6) esta es una restricción de conservación de flujo, la (3.7) indica que al menos un almacén se debe de abrir, la (3.8) indica que los proveedores solo pueden enviar mercancía a los almacenes abiertos y las (3.9 - 3.14) son las restricciones lógicas.

M en (3.2) y (3.3) es un número lo suficientemente grande.

Las fases 3, 4 y 5 de IO aplicable para nuestro trabajo, se describen en el siguiente capítulo, para el trabajo de tesis se consideran las primeras 5 fases de la metodología planteada anteriormente, quedando pendiente la última fase que es la 6 de implementación.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo, se ofrece una detallada exposición del análisis de los resultados numéricos obtenidos mediante la experimentación del modelo matemático propuesto. El objetivo principal es evaluar y comprender a fondo la efectividad y eficiencia del software comercial de optimización empleado para resolver instancias generadas aleatoriamente. Además, se llevó a cabo un estudio exhaustivo sobre los límites de la herramienta utilizada, considerando la variación en el tamaño de las instancias. Esto permitió comprender cómo el software se comporta y se adapta a diferentes niveles de complejidad y escala de los problemas.

4.1 DISEÑO DE LA EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se detalla la experimentación computacional llevada a cabo para validar el modelo matemático presentado en la sección 3.2. Se generaron instancias aleatorias con el fin de analizar el comportamiento del modelo, y se utilizaron un equipo de cómputo con procesador Intel Core i3-7020U de 2.30 Ghz, RAM de 12 Gb y con un tipo de sistema de 64 bits para ejecutar todos los experimentos. El modelo fue desarrollado en el lenguaje de programación Python utilizando el solver Cplex versión 22.1.1. Además, se evalúan los límites de la herramienta y se analiza la eficiencia de un software de optimización para resolver dichas instancias generadas

aleatoriamente.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTANCIAS

Se diseñaron diferentes tipos de instancias, se crearon basadas en datos aleatorios. Los parámetros de entrada del modelo son:

- El número de clientes (I).
- La cantidad de posibles almacenes (J).
- Los diferentes proveedores (K).
- Los diferentes tipos de artículos (Ti).
- Donde cada proveedor maneja un tipo de artículo por lo que $K = Ti$.

Se plantearon 5 tamaños de instancias diferentes, donde el tamaño es determinado por la suma de clientes, posibles almacenes y artículos que intervienen en una instancia.

Se categorizan de la siguiente manera:

- Tamaño 14: para las instancias de hasta 14 elementos, por ejemplo: 6 clientes, 4 posibles almacenes y 4 tipos de artículos.
- Tamaño 28: para las instancias de hasta 28 elementos, por ejemplo: 14 clientes, 10 posibles almacenes y 4 tipos de artículos.
- Tamaño 56: para las instancias de hasta 56 elementos, por ejemplo: 30 clientes, 20 posibles almacenes y 6 tipos de artículos.
- Tamaño 112: para las instancias de hasta 112 elementos, por ejemplo: 60 clientes, 40 posibles almacenes y 12 tipos de artículos.

- Tamaño 224: para las instancias de hasta 224 elementos, por ejemplo: 120 clientes, 80 posibles almacenes y 24 tipos de artículos.

4.3 RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Las instancias de tamaño 14, 28, 56 y 112 fueron ejecutadas bajo el método exacto hasta encontrar la solución óptima, para las instancias de tamaño 224 se determinaron criterios de parada.

- Tiempo límite: 1 hora

En las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan los resultados más relevantes para las instancias de tamaño 14, 28, 56, 112 y 224, respectivamente. Para una consulta más detallada, se pueden revisar los resultados completos en el apéndice A.

En la tabla 4.1 se presenta información detallada acerca de las instancias. En la columna **Tamaño** se indica el número de elementos que conforman la instancia, el cual resulta de sumar la columna **Clientes**, la columna de **Posibles almacenes** y la columna de **Productos**. El valor **Gap**, por su parte, representa la calidad de la solución reportada por el optimizador CPLEX 22.1.1 al finalizar su ejecución. En este sentido, un GAP de 0% indica que se ha encontrado una solución óptima. El **Tiempo de solución** indica el tiempo total de procesamiento en segundos, mientras que el **Objetivo** hace referencia al costo total asociado con la instalación del almacén y el transporte de la mercancía entre los dos niveles (proveedor-almacén y almacén-cliente).

TABLA 4.1: Resultados de instancias de tamaño 14

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Gap (%)	Tiempo de solución	Objetivo
14	6	4	4	0%	0.9451 s.	13,656
	7	3	4	0%	0.8817 s.	14,372
	8	2	4	0%	0.7932 s.	15,294
	9	2	3	0%	0.6639 s.	15,349

TABLA 4.2: Resultados de instancias de tamaño 28

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Gap (%)	Tiempo de solución	Objetivo
28	14	10	4	0%	2.6196 s.	16,939
	16	8	4	0%	2.4956 s.	17,599
	18	6	4	0%	2.3128 s.	18,520
	20	4	4	0%	1.8189 s.	19,829

TABLA 4.3: Resultados de instancias de tamaño 56

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Gap (%)	Tiempo de solución	Objetivo
56	30	20	6	0%	15.9280 s.	23,202
	35	15	6	0%	13.9471 s.	25,286
	40	10	6	0%	10.4943 s.	27,126
	44	6	6	0%	6.9355 s.	30,941

TABLA 4.4: Resultados de instancias de tamaño 112

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Gap (%)	Tiempo de solución	Objetivo
112	60	40	12	0%	439.3810 s.	35,375
	70	30	12	0%	269.6356 s.	39,253
	80	20	12	0%	180.0922 s.	43,423
	90	10	12	0%	57.3041 s.	48,853

TABLA 4.5: Resultados de instancias de tamaño 224

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Gap (%)	Tiempo de solución	Objetivo
224	120	80	24	65.75 %	3,600 s.	79,509
	140	60	24	54.31 %	3,600 s.	68,173
	160	40	24	52.66 %	3,600 s.	99,634
	180	20	24	0 %	1,500 s.	84,947

Según la tabla 4.1, el tiempo de solución para todas las instancias de tamaño 14 es inferior a 1 segundo y se obtienen soluciones óptimas en todos los casos, como lo demuestra un Gap del 0%. Sin embargo, se observa que el valor del objetivo aumenta a medida que se incrementa el número de clientes en la instancia.

En la tabla 4.2, los tiempos de solución varían entre 1.81 segundos y 2.61 segundos, mientras que en la tabla 4.3, oscilan entre 6.93 segundos y 15.92 segundos. En ambos casos, se obtienen soluciones óptimas, y al igual que en la tabla 4.1, se observa que el valor del objetivo aumenta a medida que aumenta el número de clientes en la instancia.

Además, es importante destacar que a partir de la tabla 4.3, se hace más evidente que la disminución en la cantidad de posibles ubicaciones de almacenes conlleva a una disminución en el tiempo de ejecución, incluso cuando el número de clientes aumenta. Esto resalta la importancia de optimizar la selección de ubicaciones de almacenes para reducir el tiempo de resolución del problema.

En la tabla 4.4 los tiempos de solución oscilan entre 57.30 segundos y 7.3 minutos, se obtienen las soluciones óptimas en todos los casos y al igual que en las tablas anteriores, conforme aumenta el número de clientes en la instancia, aumenta el valor del objetivo y conforme la cantidad de posibles ubicaciones de almacenes disminuye también disminuye el tiempo de ejecución.

De acuerdo con la tabla 4.5, únicamente la última instancia logra obtener un

Gap del 0%, mientras que las demás instancias son suspendidas debido al límite de tiempo establecido de 1 hora. En consecuencia, estas instancias quedan con Gap's de hasta 65.75 %.

Este resultado sugiere que, para instancias con mayores niveles de complejidad, es probable que no se obtengan soluciones óptimas dentro de los límites de tiempo establecidos.

4.4 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

De acuerdo con Cortéz (2004), la rama de la teoría de la computación es conocida como teoría de la complejidad computacional, que se enfoca en analizar los recursos que se necesitan para resolver un problema durante el proceso de cálculo. Se considera que un cálculo es complejo si resulta difícil de realizar, y en este contexto, se define la complejidad de cálculo como la cantidad de recursos que se requieren para llevar a cabo dicho cálculo. Para el tipo de problema que estamos trabajando, la cantidad de restricciones y variables que se generan al ejecutar nuestro modelo, determina la complejidad computacional, entre mayor es la cantidad de variables y restricciones, mayor será la complejidad.

Las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 presentan información detallada sobre la cantidad de variables y restricciones generadas para cada instancia de tamaño 14, 28, 56, 112 y 224, respectivamente. Esta información se obtiene a través del software utilizado para ejecutar cada instancia y resulta relevante para analizar la complejidad de cada caso en particular.

TABLA 4.6: Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 14

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Variables	Restricciones
14	6	4	4	181	330
	7	3	4	161	302
	8	2	4	131	258
	9	2	3	114	215

TABLA 4.7: Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 28

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Variables	Restricciones
28	14	10	4	847	1450
	16	8	4	777	1346
	18	6	4	667	1178
	20	4	4	517	946

TABLA 4.8: Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 56

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Variables	Restricciones
56	30	20	6	4,641	8,222
	35	15	6	4,081	7,292
	40	10	6	3,171	5,762
	44	6	6	2,191	4,106

TABLA 4.9: Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 112

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Variables	Restricciones
112	60	40	12	32,921	61,682
	70	30	12	28,891	54,362
	80	20	12	22,261	42,242
	90	10	12	13,031	25,322

TABLA 4.10: Variables y restricciones generadas para las instancias de tamaño 224

Tamaño	Clientes (I)	Posibles almacenes (J)	Productos (Ti)	Variables	Restricciones
224	120	80	24	246,801	477,122
	140	60	24	216,301	419,042
	160	40	24	165,801	322,562
	180	20	24	95,301	187,682

Al analizar las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, se puede observar que el número de posibles almacenes (J) es el factor que más influye en la generación de variables y restricciones del modelo, lo que, a su vez, aumenta la complejidad de la instancia. Esta conclusión se ve respaldada por los resultados de las tablas, que muestran una correlación entre el tiempo de ejecución y el aumento del número de posibles almacenes.

En la figura 4.1 se presenta la gráfica configurada en Python de una instancia de tamaño 14, la cual está compuesta por 6 clientes (I), 4 posibles ubicaciones de almacén (J) y 4 productos (Ti). En la gráfica, se pueden distinguir tres tipos de envíos: las líneas negras representan los envíos directos que se realizaron desde los proveedores a los clientes, las líneas rojas indican los envíos que se efectuaron desde los proveedores al almacén seleccionado por el solver, mientras que las líneas verdes señalan los envíos realizados desde el almacén seleccionado hacia los clientes.

Es relevante destacar que algunos proveedores envían directamente a todos los clientes, mientras que otros no realizan envíos directos, sino que abastecen únicamente al almacén. Asimismo, hay proveedores que envían a algunos clientes de manera directa, siempre y cuando se encuentren dentro de su área de cobertura, y a los clientes restantes por medio del almacén.

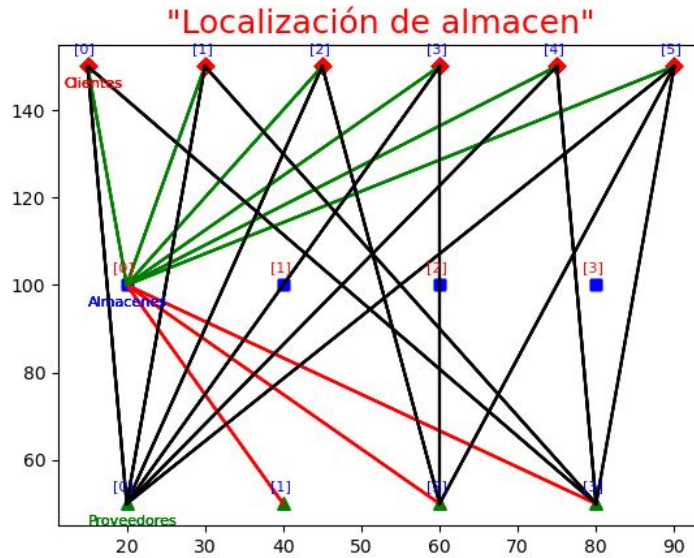


FIGURA 4.1: Gráfica en Python de instancia de tamaño 14

Fuente: Elaboración propia

Es crucial analizar y verificar la gráfica en conjunto con las tablas de datos que nos brinda la solución, para asegurarnos de que se estén cumpliendo tanto el objetivo del modelo como sus restricciones. En la figura 4.2 se muestran las tablas resultantes para la instancia previamente mencionada, las cuales son de gran utilidad para evaluar la calidad de la solución obtenida y garantizar la satisfacción de los requerimientos del problema.

Nivel proveedor-cliente					Nivel proveedor-almacen					Nivel almacen - cliente				
Cliente i) $\bar{u}_i = 0$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 0$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 0$				
0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3	
0	10	0	0	35	0	0	125	60	35	0	0	15	20	0
Cliente i) $\bar{u}_i = 1$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 1$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 1$				
0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3	
1	15	0	0	20	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cliente i) $\bar{u}_i = 2$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 2$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 2$				
0	1	2	3		2	0	0	0	0	0	1	2	3	
2	20	0	10	0	2	0	0	0	0	0	0	25	25	0
Cliente i) $\bar{u}_i = 3$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 3$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 3$				
0	1	2	3		3	0	0	0	0	0	1	2	3	
3	20	0	10	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cliente i) $\bar{u}_i = 4$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 4$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 4$				
0	1	2	3							0	1	2	3	
4	20	0	0	30						0	0	20	15	0
Cliente i) $\bar{u}_i = 5$					Almacen (j) $\bar{u}_j = 5$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 5$				
0	1	2	3							0	1	2	3	
5	20	0	15	25						0	0	15	0	0
Cliente (U) $\bar{u}_U = 3$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 4$					Cliente (U) $\bar{u}_U = 5$				
0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3	
0	0	30	0	20	0	0	15	20	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0
3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0

FIGURA 4.2: Tablas de solución para instancia de tamaño 14

Fuente: Elaboración propia

Al observar tanto la gráfica como las tablas, es posible describir la solución obtenida para esta instancia en particular. En esta solución, el proveedor [0] envía sus productos directamente a todos los clientes, mientras que el proveedor [1] únicamente abastece al almacén [0], que fue seleccionado por el solver. Por su parte, el proveedor [2] efectúa envíos directos a los clientes [2], [3] y [5], mientras que para satisfacer la demanda de los clientes [0], [1] y [4], se utiliza el almacén [0]. Finalmente, el proveedor [3] realiza envíos directos a los clientes [0], [1], [4] y [5], y para atender la demanda de los clientes [2] y [3], se recurre al almacén [0].

En esta solución, el almacén [0] juega un papel importante, ya que recibe los productos de los proveedores y se encarga de distribuirlos a los clientes que no reciben envíos directos. Así, la solución obtenida garantiza tanto la satisfacción de la demanda de los clientes como la cobertura de los proveedores, lo cual es esencial para resolver el problema en cuestión de manera efectiva.

Mediante la experimentación con el software comercial CPLEX 22.1.1, se evaluó su capacidad para hallar soluciones exactas en instancias de prueba similares a la de una red de tiendas de conveniencia. Se encontró que el software demostró una alta eficiencia para resolver instancias de hasta un tamaño de 112 en un tiempo

promedio de 4 minutos. Estos resultados sugieren que el modelo propuesto podría ser una herramienta valiosa para empresas que buscan optimizar sus operaciones logísticas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones encontradas con la implementación de la formulación matemática MILP propuesta para el rediseño de una red de distribución de mercancías en tiendas de conveniencia a través de la ubicación estratégica de almacenes de consolidación. Se ha observado que la aplicación de esta formulación ha logrado optimizar eficientemente la red de distribución, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos logísticos. Además, menciona las contribuciones realizadas y el trabajo a futuro.

5.1 CONCLUSIONES

La cadena de suministro tiene como objetivo principal garantizar que los productos o servicios lleguen al cliente final de manera eficiente, en el momento y lugar adecuados, con la calidad requerida y al menor costo posible. Para lograr esto, es esencial contar con un adecuado almacenamiento de productos, ya que permite compensar los desequilibrios entre la oferta y la demanda.

La ubicación de un almacén es una decisión crucial que impacta significativamente los costos logísticos. En este sentido, se ha propuesto una formulación matemática para el rediseño de la red de distribución, mediante un modelo de progra-

mación lineal entera mixta resuelto por el solver Cplex. Este modelo ha demostrado ser efectivo para obtener soluciones óptimas en menos de 8 minutos en instancias aleatorias de hasta 112 elementos.

La implementación de este algoritmo es un gran aporte, ya que considera simultáneamente la ubicación de almacenes de consolidación, la red de distribución de mercancías, diferentes tipos de aprovisionamiento, la satisfacción de la demanda y la cobertura de proveedores. Esto permite una mejor utilización de los recursos y la minimización de los costos de distribución, lo que se traduce en una mejora de la eficiencia de la cadena de suministro en su conjunto.

5.2 CONTRIBUCIONES

Se desarrolló un modelo de ubicación de almacenes, para rediseñar una red de distribución, teniendo en cuenta diferentes ubicaciones potenciales, diferentes productos y diferentes tipos de aprovisionamiento, este último de acuerdo a la revisión de literatura no se había contemplado anteriormente.

Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta, el cual se resolvió con CPLEX, para facilitar la toma de decisiones al elegir la mejor red de distribución. Para el código desarrollado en Python se trabajó con la librería cvxpy para tener la ventaja de manejar una variedad de solver's tanto comerciales como libres.

Esta herramienta podrá ser utilizada en problemas con características similares al problema original planteado en este trabajo de tesis, esto para la ubicación de almacenes.

5.3 TRABAJO A FUTURO

Un trabajo a futuro es agregar la característica de que los vehículos utilizados para la distribución de la mercancía sean de diferentes capacidades, para determinar la capacidad máxima que puede transportar cada uno sin exceder su capacidad.

Además, sería importante realizar experimentación con instancias de mayor tamaño, para esto sería necesario utilizar un método de solución heurístico.

APÉNDICE A

RESULTADOS EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Las instancias de tamaño 12, 24, 56 y 112 fueron ejecutadas 10 veces cada una con datos aleatorios y se les calculó el promedio del tiempo de solución y objetivo a cada una de ellas.

La tabla A.1 nos describe las instancias que fueron enumeradas del 1 al 16, esta tabla nos indica la cantidad de clientes (I), de posibles almacenes (I) y tipos de productos (Ti) que contiene cada instancia, esto para facilitar la comprensión de la tabla A.2 donde en la columna # nos referimos al número de instancia descrita en la tabla A.1, las siguientes columnas se muestran los resultados de las diferentes instancias, donde el 1° valor nos referimos al tiempo de solución y el 2° valor al objetivo, la última columna nos muestra el promedio mencionado anteriormente.

TABLA A.1: Descripción de cada número (#) de instancia

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Clientes (I)	6	7	8	9	14	16	18	20	30	35	40	44	60	70	80	90
P. almacenes (J)	4	3	2	2	10	8	6	4	20	15	10	6	40	30	20	10
Productos (Ti)	4	4	4	3	4	4	4	4	6	6	6	6	12	12	12	12

TABLA A.2: Resultados de instancias

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Prom
1	0.93 / 12,874	0.82 / 14,578	1.00 / 13,705	1.05 / 13,722	1.01 / 13,248	1.05 / 13,938	0.96 / 13,726	1.02 / 13,500	0.85 / 13,979	0.72 / 13,290	0.94 / 13,656
2	0.99 / 14,852	1.33 / 14,780	0.71 / 13,354	0.75 / 13,610	0.97 / 14,506	0.89 / 14,780	0.81 / 14,288	0.72 / 15,372	0.84 / 13,753	0.76 / 14,433	0.88 / 14,372
3	0.72 / 15,433	0.69 / 15,171	0.68 / 15,737	0.92 / 16,170	0.84 / 15,092	0.74 / 15,425	0.95 / 14,539	0.69 / 14,830	0.86 / 15,809	0.80 / 14,738	0.79 / 15,294
4	0.72 / 14,700	0.65 / 16,771	0.61 / 15,408	0.62 / 16,557	0.60 / 15,177	0.60 / 14,984	0.61 / 14,668	0.79 / 14,632	0.75 / 14,436	0.64 / 16,161	0.66 / 15,349
5	3.73 / 15,915	2.47 / 16,751	2.38 / 17,432	2.37 / 16,669	2.45 / 17,250	2.41 / 17,584	2.76 / 16,129	2.41 / 16,622	2.52 / 17,967	2.64 / 17,072	2.61 / 16,939
6	2.33 / 17,082	2.31 / 17,729	2.46 / 18,522	2.37 / 17,239	2.33 / 17,719	2.26 / 16,688	2.31 / 16,871	3.32 / 17,609	2.33 / 18,573	2.89 / 17,960	2.49 / 17,599
7	2.25 / 18,764	2.02 / 18,590	2.04 / 18,592	2.44 / 17,773	2.55 / 19,499	2.36 / 18,427	3.35 / 19,192	2.09 / 17,817	2.04 / 17,591	1.94 / 18,962	2.31 / 18,520
8	2.09 / 18,854	1.66 / 19,671	1.74 / 21,015	1.59 / 20,077	1.83 / 18,710	1.70 / 19,396	2.05 / 20,843	1.81 / 19,769	1.70 / 19,990	1.97 / 19,974	1.81 / 19,829
9	15.21 / 23,748	15.52 / 23,342	15.97 / 24,144	15.44 / 23,125	15.38 / 23,346	15.72 / 22,047	15.38 / 23,820	16.64 / 22,929	17.78 / 22,986	16.18 / 22,536	15.92 / 23,202
10	13.56 / 25,707	14.88 / 25,816	13.23 / 24,008	13.93 / 24,762	13.73 / 25,799	12.88 / 25,306	14.93 / 25,138	15.08 / 27,163	13.76 / 23,150	13.43 / 26,013	13.94 / 25,286
11	10.39 / 26,254	10.11 / 27,714	9.69 / 27,498	12.04 / 26,013	10.61 / 27,865	10.63 / 28,576	11.19 / 25,994	11.35 / 27,294	9.52 / 26,695	9.36 / 27,364	10.49 / 27,126
12	6.62 / 32,892	7.02 / 33,917	6.71 / 32,298	6.66 / 27,250	8.71 / 27,587	7.39 / 34,552	5.97 / 29,974	7.06 / 32,226	6.76 / 29,055	6.41 / 29,664	6.93 / 30,941
13	487.03 / 35,506	465.82 / 37,320	400.30 / 35,159	436.44 / 35,699	535.20 / 35,828	436.49 / 32,482	388.07 / 36,198	418.88 / 33,679	418.25 / 35,743	407.27 / 36,137	439.38 / 35,375
14	231.99 / 39,162	262.37 / 40,667	251.91 / 39,465	251.02 / 38,216	298.27 / 40,534	297.59 / 39,870	239.67 / 38,018	296.28 / 39,829	296.65 / 36,444	270.56 / 40,333	269.63 / 39,253
15	147.26 / 41,485	190.67 / 42,799	189.24 / 44,473	188.70 / 44,290	164.79 / 43,819	158.44 / 43,732	201.17 / 46,566	186.95 / 42,741	195.14 / 42,927	178.52 / 41,398	180.09 / 43,423
16	65.85 / 50,249	53.97 / 47,161	58.70 / 52,466	57.53 / 50,640	54.44 / 50,009	60.07 / 47,150	56.06 / 45,467	53.36 / 51,356	54.36 / 46,602	58.66 / 47,433	57.30 / 48,853

BIBLIOGRAFÍA

- AKSEN, D. y K. ALTINKEMER (2008), «A location-routing problem for the conversion to the “click-and-mortar” retailing: The static case», *European Journal of Operational Research*, **186**(1), págs. 554—575.
- ANAYA, J. (2007), *Logística integral. La gestión operativa de la empresa. 3era edición.*, tercera edición, Esic Editorial, España.
- BARTHOLDI, J. y S. HACKMAN (2011), *Warehouse distribution science*, primera edición, x, Atlanta.
- CAMM, J., T. CHORMAN, F. DILL, J. EVANS, D. SWEENEY y G. WEGRYN (1997), «Blending OR/MS, judgment, and GIS: Restructuring PG’s supply chain», *Interfaces*, **27**(1), págs. 128—142.
- CARLSSON, D. y M. RÖNNQVIST (2005), «Supply chain management in forestry – Case studies at södra cell AB», *European Journal of Operational Research*, **163**(1), págs. 589—616.
- CHAKRAVARTY, A. (2005), «Global plant capacity and product allocation with pricing decisions», *European Journal of Operational Research*, **165**(1), págs. 157—181.
- CHOPRA, S. (2003), «Designing the distribution network in a supply chain», *Elsevier*, **39**(1), págs. 123—140.
- CHRISTOPHER, M. (2005), *Logistics and supply chain management: creating value-adding networks*, tercera edición, Pearson education, Great Britain.

- CORTÉZ, A. (2004), «Teoría de la complejidad computacional y teoría de la computabilidad», *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, **1**(1), págs. 102–105.
- COS, J. y R. NAVASCUES (2001), *Manual de logística integral*, primera edición, Ediciones Diaz de Santos, Madrid, España.
- DE KOSTER, R., T. LE-DUC y K. ROODBERGEN (2007), «Design and control of warehouse order picking: A literature review», *European Journal of Operational Research*, **1**(182), págs. 481–501.
- ERLEBACHER, S. y R. MELLER (2000), «The interaction of location and inventory in designing distribution systems», *IIE Transactions*, **32**(1), págs. 155—166.
- ESCRIVA, J. y V. SAVALL (2005), *Gestión del transporte*, primera edición, McGraw-Hill/Interamericana, Madrid.
- ESCUDERO, M. J. (2011), *Almacenaje de productos*, segunda edición, Ediciones Paraninfo SA, España.
- ESKIGUN, E., R. UZSOY, P. PRECKEL, G. BEAUJON y J. KRISHNAN, S. TEW (2005), «Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers», *European Journal of Operational Research*, **165**(1), págs. 182—206.
- ESLAVA, L. (2017), *Canales de distribución logístico - comerciales*, primera edición, Ediciones de la U, Bogotá, Colombia.
- FLAMARIQUE, S. (2019), *Manual de gestión de almacenes*, primera edición, Marge books, Barcelona.
- GARCÍA, J. (2020), «Redes de distribución. Nota Técnica», Cadena de Suministro, disponible en <http://hdl.handle.net/10251/137037>.
- GONZÁLEZ, A. y G. GARCÍA (2015), *Manual práctico de investigación de operaciones 1*, cuarta edición, Universidad del Norte, Colombia.

- GÁMEZ, H., C. MEJÍA y R. LEÓN (2017), «Diseño de una red de distribución a través de un modelo de optimización considerando agotados», *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, **25**(4).
- HESSE, S. y M. DASKIN (1998), «Strategic facility location: A review», *European Journal of Operational Research*, **1**(111), págs. 423–447.
- HILLIER, F. y G. LIEBERMAN (2010), *Introducción a la investigación de operaciones*, 9ª edición, The McGraw-Hill, México.
- JAYARAMAN, V., V. GUIDE y R. SRIVASTAVA (1999), «A closed-loop logistics model for remanufacturing», *Journal of the Operational Research Society*, **50**(1), págs. 497—508.
- KESKIN, B. y H. ÜLSTER (2007), «Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem», *European Journal of Operational Research*, **182**(1), págs. 663—682.
- LEAL, M. (1995), «Análisis y diseño de estrategias para una tienda de conveniencia, en base a un estudio de mercado, para optar al título de maestría en Administración de Empresas», Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en <http://eprints.uanl.mx/362/1/1080071234.PDF>.
- LITVINCHEV, I., Y. RIOS, D. ÖZDEMİR y L. HERNÁNDEZ (2014), «Multiperiod and stochastic formulations for a closed loop supply chain with incentives», *Journal of Computer and Systems Sciences International*, **53**(2), págs. 201—211.
- MELO, M., S. NICKEL y S. F. (2009), «Facility location and supply chain management», *Elsevier*, **196**(1), págs. 401—412.
- NAHMIA, S. (2007), *Análisis de la producción y las operaciones*, quinta edición, McGraw-Hill Interamericana, México.
- RESA, S. (2005), «Tiendas de conveniencia, un desarrollo demaciado lentos», *Distribución y consumo*, disponible en https://www.mercasa.es/media/publicaciones/86/1290789923_DY C_2005_83_127_131.pdf.

- SAINZ, M. J. (2001), *La distribución comercial: Opciones estratégicas*, segunda edición, ESIC Editorial, España.
- TADAROS, M., A. MIGDALAS, B. SAMUELSSON y A. SEGERSTEDT (2020), «Location of facilities and network design for reverse logistics of lithium-ion batteries in Sweden», *Operational Research*.
- TIENDASDECONVENIENCIA.ORG (2020), «Tiendas de Conveniencia, todo lo que ocupas en un solo lugar», Tiendas De Conveniencia En México, ¡Siempre Hay Una Cerca De Ti! Tiendas de Conveniencia, disponible en <https://tiendasdeconveniencia.org/>.
- VIDAL, C. y M. GOETSCHALCKX (2001), «A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation», *European Journal of Operational Research*, **129**(1), págs. 134—158.
- VÁZQUEZ, R., B. ÁLVAREZ y J. A. TRESPALACIOS (2006), *Estrategias de distribución comercial*, primera edición, Ediciones Paraninfo SA, España.
- WOUDA, F., P. BEEK, J. VORST y H. TACKE (2002), «An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy Drinks Group in Hungary», *OR Spectrum*, **24**(1), págs. 449—465.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ana María Nava Salazar

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

REDISEÑO DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS EN
TIENDAS DE CONVENIENCIA A TRAVÉS DE UN MODELO DE
OPTIMIZACIÓN LINEAL MIXTA

Nació el 14 de agosto de 1987 en Saltillo, Coahuila, hija de la sra. Anselma Salazar Espericueta y el Prof. Simón Nava Valenzuela †. Es Ingeniero en Sistemas Computacionales egresada del Instituto Tecnológico Superior de San Pedro, Coahuila en 2011. Se ha desempeñado en las áreas de servicio al cliente, control de inventarios y supervisión de sucursales.