

**DESARROLLO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN MULTIPRODUCTO
CONSIDERANDO EL CÁLCULO DE ÁREA**

**LUIS ALEJANDRO BERMUDEZ ARANGO
ANDRÉS FERNANDO GARZÓN RUEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2016

**DESARROLLO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN MULTIPRODUCTO
CONSIDERANDO EL CÁLCULO DE ÁREA**

**LUIS ALEJANDRO BERMUDEZ ARANGO
ANDRÉS FERNANDO GARZÓN RUEDA**

**Proyecto presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO INDUSTRIAL**

**Director:
NÉSTOR RAÚL ORTIZ PIMIENTO
Ingeniero Industrial y Msc. En Ingeniería de sistemas**

**Co-director:
JAVIER EDUARDO ARIAS
Ingeniero de sistemas y Msc. En Ingeniería industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Elizabeth cuyo apoyo incondicional me ha motivado a lo largo de mi formación académica. A Tibusay por su constancia y dedicación. A mis gatos, Aristóteles y Petra por su incansable compañía. Agradezco a mi compañero Alejandro por su perseverancia y dedicación con el proyecto y a las demás personas que me han acompañado durante los años de mi carrera universitaria.

A nuestros director y codirector Msc. Néstor Raúl Ortíz y Msc. Javier Eduardo Arias por su acompañamiento en la realización de este proyecto.

Andrés Fernando Garzón Rueda

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que en el transcurso de este camino me han apoyado, a mis padres que con su esfuerzo y dedicación me inspiraron a continuar, a mi tía Liliana y Jessica porque gracias a su incondicionalidad siempre fueron un apoyo en los momentos más difíciles, a mi hermano quien siempre ha estado a mi lado y a mi compañero Andrés por sus ardua labor y dedicación en este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	19
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.3. OBJETIVOS	21
1.3.1. Objetivo general.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO	22
2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. INTRODUCCIÓN A LOS PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN.....	23
2.1.1. Problemas de Cobertura (set-covering).	26
2.1.2. Problemas de Centro (p-center). ..	27
2.1.3. Problemas de media (p-median).....	28
2.1.4. Problemas de dispersión (p-dispersión).	28
2.2. MODELOS DE LOCALIZACIÓN	29
2.2.1. Modelos de localización continua.	29
2.2.2. Modelos de localización de red.....	29
2.2.3. Modelos de localización discreta.	30
2.2.4. Problema de localización de instalaciones no capacitado. ...	31
2.2.5. Problema de localización de instalaciones capacitado... ..	33
2.2.6. Problemas de localización de instalaciones capacitado en dos etapas..	34
2.3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	39
2.3.1. Almacenamiento en bloque.....	40
2.3.2. Almacenamiento con estanterías.....	41
2.3.3. Pallets.....	49

2.3.4. Cálculo de la necesidad de almacenamiento.	50
2.3.5. Cálculo del factor altura (Fh) y factor pasillo (Fp)..	52
2.3.6. Cálculo del factor estiba (Fe)..	53
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	55
3.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	55
3.1.1. Revisión de literatura científica.....	56
3.1.2. Revisión de literatura técnica.....	62
4. FORMULACIÓN Y DESARROLLO DEL MODELO.....	65
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO	65
4.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO	66
4.2.1. Justificación de la función objetivo y restricciones.....	69
4.3. EJECUCIÓN DEL MODELO	72
4.3.1. Demanda..	72
4.3.2. Productos y factor estiba..	72
4.3.3. Plantas.	74
4.3.4. Clientes.....	74
4.3.5. Posibles ubicaciones de CEDIs.	74
4.3.6. Oferta de productos..	75
4.3.7. Costos de transporte.....	75
4.3.8. Costos de almacenamiento..	76
4.3.9. Capacidad mínima del CEDIs.	77
4.3.10.Sistema de almacenamiento.....	77
4.3.11.Compilación del modelo en GAMS.....	78
4.3.12.Resultados.....	81
4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
4.4.1. Análisis de la localización de los CEDIs..	81
4.4.2. Análisis de demanda.....	83

4.4.3. Análisis de la capacidad.	84
4.4.4. Análisis de capacidad ociosa.	86
4.5. PLANTEAMIENTO DE CASOS.	87
4.5.1. Casos de demanda.	87
4.5.2. Casos de oferta.	90
4.5.3. Casos de variación de costos de arriendo.	93
4.5.4. Casos de variación del sistema de almacenamiento.	96
4.5.5. Casos de variación de costos de transporte.	98
5. CONCLUSIONES.	99
6. RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los problemas de localización.	24
Tabla 2. Factores para la elección de ubicación y emplazamiento.	25
Tabla 3. Tabla de productos	73
Tabla 4. Conjunto plantas o proveedores.	74
Tabla 6. Conjunto clientes.	74
Tabla 5. Posibles ubicaciones de los CEDIs.....	75
Tabla 7. Oferta de productos por el proveedor o planta i.....	75
Tabla 8. Costos de transporte entre las plantas y los CEDIs.....	76
Tabla 9. Costos de transporte entre las CEDIs y los clientes.	76
Tabla 10. Costos de arriendo por metro cuadrado la ubicación j.....	77
Tabla 11. Resultados del modelo matemático en GAMS.....	81
Tabla 12. Análisis de costos CEDIs – Clientes.	82
Tabla 13. Análisis costos de arriendo en la ubicación j.....	82
Tabla 14. Cumplimiento de la demanda por periodo para el producto P1.	84
Tabla 15. Capacidad por periodo CEDI Bucaramanga.	85
Tabla 16. Descripción variaciones de demanda.	87
Tabla 17. Resultados casos de demanda.....	88
Tabla 18. Capacidades totales de los casos A y B de Demanda Concentrada.....	90
Tabla 19. Variaciones de oferta de productos.	91
Tabla 20. Resultados casos de oferta.....	92
Tabla 21. Descripción casos de costos de arriendo.....	94
Tabla 22. Resultados de los de costos de arriendo	94
Tabla 23. Sistemas de almacenamiento	96
Tabla 24. Resultados de la variación de sistemas de almacenamiento.....	97
Tabla 25. Resultados costo de transporte	98

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Interrogantes básicas del problema de localización según Daskin.	23
Ilustración 2. Clasificación de los problemas de localización.	26
Ilustración 3. Clasificación de los modelos de localización.	29
Ilustración 4. Clasificación de los modelos discretos.	30
Ilustración 5. Representación de localización de instalaciones capacitado en dos etapas (TSCFLP)	35
Ilustración 6. Sistema de almacenamiento con estanterías fijas convencionales.	41
Ilustración 7. Ilustración de sistemas de almacenamiento Drive-in.....	43
Ilustración 8. Funcionamiento del sistema de estanterías dinámicas con rodillos.	44
Ilustración 9. Sistema de almacenamiento de estanterías móviles.....	46
Ilustración 10. Sistema de almacenamiento automático, transelevadores para pallets Transportadores para pallets.	48
Ilustración 11. Tipos de pallets más usados.	49
Ilustración 12. Diagrama de dimensiones de estantería	52
Ilustración 13. Sistema de almacenamiento de doble profundidad de estantería convencional.....	53
Ilustración 14. Apilamiento de productos por entrepaños	54
Ilustración 15. Objetivos del modelo de localización.....	65
Ilustración 16. Sistema de Rack Selectivo	77
Ilustración 17. Definición del bloque SET y VARIABLES del modelo matemático en GAMS	79
Ilustración 18. Definición del bloque TABLAS del modelo matemático en GAMS	79
Ilustración 19. Definición del bloque PARAMETERS del modelo matemático en GAMS	80
Ilustración 20. Definición del bloque EQUATIONS del modelo matemático en GAMS	80

Ilustración 21. Definición del bloque SOLVE del modelo matemático en GAMS	81
Ilustración 22. Localización y asignación de clientes a los CEDIs	83
Ilustración 23. Cubrimiento de la demanda, Plantas-CEDIs	84
Ilustración 24. Capacidad utilizada vs capacidad ociosa en el CEDI Bucaramanga	86

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos de entrada para la ejecución del modelo en GAMS.	107
Anexo B. Resultados obtenidos en GAMS	112
Anexo C. Artículo.....	115

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN MULTIPRODUCTO CONSIDERANDO EL CALCULO DE ÁREA.*

AUTORES: LUIS ALEJANDRO BERMÚDEZ ARANGO.
ANDRÉS FERNANDO GARZÓN RUEDA.†

PALABRAS CLAVE: Centros de distribución, localización, área de almacenamiento, capacitado

DESCRIPCIÓN

El problema de localización de centros de distribución se aborda a partir de la necesidad de las organizaciones de controlar eficientemente el flujo de bienes y servicios, representa uno de los mayores problemas de las organizaciones hoy en día, ya que las decisiones relacionadas con la localización de centros de distribución son complejas y difíciles de tomar por los aspectos técnicos y estratégicos a tener en cuenta, además, su impacto se ve reflejado en la eficiencia de la cadena de suministro. Este artículo presenta una revisión de los modelos de localización en la literatura científica y algunos aspectos técnicos de los sistemas de almacenamiento para la generación de un modelo de localización discreto de centros de distribución capacitados (TSCFLP) en una cadena logística de tres eslabones. El objetivo es ubicar los centros de distribución (CEDIs) y calcular el área de almacenaje necesaria para cada uno de acuerdo a una expresión matemática que involucra las demandas por atender asignadas al CEDI y, algunas de las características de los sistemas de almacenamiento paletizados, como el área de los pasillos, la altura de la estantería, entre otras. El modelo planteado fue programado en el Software GAMS y se resolvió mediante el solver CPLEX.

Palabras clave: Localización, Centros de distribución, Área de almacenamiento, Programación entera mixta.

* Proyecto de grado.

† Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director MSc. Néstor Raúl Ortiz Pimiento.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZATION MODEL FOR LOCATING DISTRIBUTION CENTERS MULTIPRODUCT CONSIDERING THE CALCULATION OF AREA.‡

AUTHORS: LUIS ALEJANDRO BERMÚDEZ ARANGO.
ANDRÉS FERNANDO GARZÓN RUEDA.§

DESCRIPTION

The problem of location of distribution centers is addressed from the need of organizations to efficiently control the flow of goods and services, represents one of the major problems of organizations today, since decisions related to the location of Distribution centers are complex and difficult to take due to the technical and strategic aspects to take into account, in addition, their impact is reflected in the efficiency of the supply chain. This article presents a review of localization models in the scientific literature and some technical aspects of storage systems for the generation of a discrete location model of trained distribution centers (TSCFLP) in a three-way logistics chain. The objective is to locate the distribution centers (CEDIs) and calculate the storage area required for each one according to a mathematical expression that involves the demands to be assigned to the CEDI and some of the characteristics of the palletized storage systems, such as the area of the corridors, the height of the shelf, among others. The proposed model was programmed in the GAMS Software and solved by the CPLEX solver.

Keywords: Location, distribution centers, storage area, mixed integer programming.

‡ Degree Project.

§ Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director MSc. Néstor Raúl Ortiz Pimiento.

INTRODUCCIÓN

La localización de Centros de distribución (CEDIs), constituye uno de los factores más importantes en la gestión de la administración de la cadena logística de una empresa ya que es parte del engranaje de cumplimiento y de la promesa de servicio ofrecida a los clientes.

Un centro de distribución es el eje principal de la comercialización en una empresa, es el lugar donde las órdenes de pedido se embalan, procesan y despachan al cliente, funciona como punto estratégico para el transporte y almacenamiento de mercancía desde la fábrica o proveedores hasta los clientes; Una de sus funciones principales es responder a los diversos cambios que puede haber entre la oferta y la demanda para el óptimo cumplimiento del servicio, opera desde la premisa de evitar al máximo el movimiento de productos y, protege los inventarios de robos, pérdidas o daños.

Cuando se aborda el problema de localización de los centros de distribución se enfrentan diversos cuestionamientos como: ¿Dónde ubicarlo?, ¿Dónde se puede obtener el menor costo posible?, ¿Cuál es el tamaño óptimo que debe tener el CEDI para poder satisfacer la demanda sin exceder la capacidad del mismo?, ¿Cuáles son los clientes que debe atender? entre otras. Es así como, solucionar el problema de localización de los centros de distribución implica un estudio detallado que depende en gran medida de las necesidades logísticas que tenga la empresa y de las características propias de esta, sustentada en la obtención del menor costo posible al momento de decidir dónde localizar el CEDI.

De esta manera, se propone plantear un modelo matemático que permita solucionar el problema de localización de los centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones, considerando el cálculo del área de

almacenamiento necesaria para cada CEDI, factor que está directamente relacionado con los costos fijos (arriendo) en el modelo que se desea plantear.

TABLA DE CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

OBJETIVO	DESCRIPCIÓN	CUMPLIMIENTO
1	Revisar literatura científica relacionada con centros de distribución, modelos de ubicación, métodos de programación lineal entera y lenguaje de programación para la compilación del modelo matemático.	Capítulo 3. Revisión de literatura
2	Revisar literatura técnica relacionada con la gestión logística en centros de distribución para el análisis de los sistemas de almacenamiento.	Capítulo 3. Revisión de literatura
3	Formular un modelo matemático que permita determinar la ubicación de los centros de distribución y la capacidad de los mismos.	Capítulo 4. Formulación y desarrollo del modelo matemático
4	Elaborar un artículo publicable en base al trabajo de investigación realizado	Anexo C

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento de la inversión extranjera y la apertura de nuevos negocios han estimulado a las empresas a ser más competitivas, a mejorar sus procesos logísticos y a su vez, mejorar su servicio al cliente; “Las localizaciones de planta, servicios y, en general, el diseño del sistema de distribución y atención al cliente son decisiones de enorme importancia para el éxito o fracaso de un proyecto empresarial, si se tiene en cuenta que una vez localizada la planta o el almacén, la decisión de trasladarse hacia una localización más conveniente es poco factible, ya que implica una inversión considerable, además cambios radicales en la operación del negocio.⁵”

Al momento de localizar un centro de distribución se plantea un modelo matemático que permite la ubicación de este según el enfoque o la necesidad que tenga el autor o la empresa, ya sea mejorar el servicio al cliente, reducir costos, maximizar o minimizar distancias, entre otros, pero al momento de plantear una solución a este problema no se tienen en cuenta gran cantidad de variables como: ¿Cuál es el área de almacenamiento necesaria para el centro de distribución?, ¿Cómo influye esta área en los costos fijos (arriendo), y en el óptimo funcionamiento del CEDI?. Es por esto que, en el presente trabajo además de desarrollar un modelo matemático que permita localizar los CEDIs multi-producto en una cadena logística de tres eslabones, se considerará el cálculo del área de almacenamiento necesaria para la localización del centro de distribución, a través de una expresión matemática la cual involucra algunos de

⁵ NEGRÓN Muñoz David. Localización de plantas, centros de distribución y servicios En: Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios. Ed 1. Cengage Learning Editores. 2009. p. 232

los aspectos más importantes de los sistemas de almacenamiento paletizados como: el área de los pasillos, y la altura, entre otras.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En el mundo de hoy, la apertura económica establecida por el neoliberalismo ha provocado una fuerte competencia en todos los sectores de la economía, por este motivo las empresas se ven obligadas a generar estrategias que aporten valor y fortalezcan sus procesos con el fin de ofrecer calidad en el servicio al cliente y maximizar sus utilidades. La localización de centros de distribución (CEDIs) forma parte vital de la estrategia logística de una empresa y la importancia de esta decisión se debe a las cuantiosas inversiones que se deben realizar con la instalación de un nuevo CEDI y su vida útil proyectada. La ubicación de instalaciones en la cadena logística ha representado un problema de estudio en las últimas décadas, con importantes avances gracias a los softwares computacionales que permiten el modelamiento de dichas situaciones con diversas metodologías y enfoques según el investigador.

Las investigaciones que han abordado el problema de localización de instalaciones tienen en cuenta variables cuantitativas, como los costos fijos y variables, siendo el costo de arriendo una variable asumida como constante en muchos estudios, variable que es inherente a la localización de la instalación. Este costo es causado por el área necesaria de almacenamiento y a su vez esta área depende de factores como el volumen de la demanda, el sistema de almacenamiento, entre otros. Luego el propósito de este proyecto es darle solución al problema de localización de CEDIs teniendo en cuenta variables que aporten avances al mismo, con el fin de robustecer los modelos ya existentes e incidir en el acercamiento a la realidad de las organizaciones.

Según lo mencionado anteriormente es importante plantear un modelo matemático que obtenga un cálculo más preciso de la necesidad de área de almacenaje y analizar las variables que afectan el problema de la ubicación de los CEDIs, como un soporte formal en la toma de decisiones.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general. Plantear un modelo matemático en GAMS basado en programación lineal entera mixta, para resolver el problema de localización de centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones.

1.3.2. Objetivos específicos

- Revisar literatura científica relacionada con centros de distribución, modelos de ubicación, métodos de programación lineal entera y lenguaje de programación para la compilación del modelo matemático.
- Revisar literatura técnica relacionada con la gestión logística en centros de distribución para el análisis de los sistemas de almacenamiento.
- Formular un modelo matemático que permita determinar la ubicación de los centros de distribución y la capacidad de los mismos.
- Elaborar un artículo publicable en base al trabajo de investigación realizado.

1.4. ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto concluye con la validación del modelo de localización de centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones considerando el cálculo del área, a partir del planteamiento y análisis de resultados de diversos casos en los cuales se puede ejecutar el modelo de localización a desarrollar.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN A LOS PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN

El análisis de los problemas de localización ha sido objeto de investigación desde principio de siglo, reconocidos investigadores han dedicado gran parte de su tiempo en solucionar este problema. Uno de los primeros en tomar este tema fue Alfred Weber (1909)⁶ quien expuso varias teorías y modelos sobre cómo solucionar el problema de localización de instalaciones.

El problema de localización, representa un elemento primordial que se debe tener en cuenta al momento de planificar las futuras operaciones de una empresa, parte de la necesidad de encontrar el sitio más adecuado para ubicar instalaciones con el objetivo de atender una demanda latente por un grupo de clientes, bajo la premisa de encontrar la ubicación que involucre el menor tiempo de transporte y costo posible. Según Daskin (1995)⁷ el problema de localización tiene cuatro interrogantes básicas:

Ilustración 1. Interrogantes básicas del problema de localización según Daskin.



⁶ WEBER, Alfred. *Ueber Standort der Industrien*. 1 ed. 1922.

⁷ DASKIN, Mark. *Network and Discrete Location: Model, Algorithms, and Applications*. 2 ed. Sabim S.A. WILEY. 1995. 536 p. ISBN: 978-0-470-90536-4.

Vallhonrat, Joseph M y Corominas Albert. (1991)⁸ exponen en su libro que los criterios para resolver el problema de localización son distintos según el tipo de sistema productivo o actividad económica al que está dirigida la empresa, la localización se puede definir con mayor o menor precisión, puede ser un país, una región, una localidad, entre otras. Entonces la decisión de localizar, es una decisión secuencial y jerarquizada, en el sentido de que se va concretando sucesivamente a una escala cada vez menor.

Exponen también que los problemas de localización pueden clasificarse desde diversos puntos de vista, según el tipo de aplicación o las características técnicas que presentan.

Tabla 1. Clasificación de los problemas de localización.

Clasificación de los problemas de localización
<p>Manufactura / Servicios</p> <p>Espacio continuo / Discreto</p> <p>Uno / Múltiples instalaciones</p>

Fuente: Vallhonrat, Joseph M y Corominas Albert. (1991).

Antes de tomar una decisión de localizar una instalación, es importante conocer los diversos factores que intervienen en ella, Vallhonrat (1991)⁹ proporciona una serie de factores que pueden intervenir en las decisiones de localización de instalaciones, y que deben ser considerados por las organizaciones al momento de emprender un proyecto tal envergadura; los factores que intervienen en la decisión de localización también pueden ser tomados en cuenta para la formulación o asignación de restricciones en el modelo de decisión que se esté

⁸ VALLHONRAT, Joseph M y COROMINAS Albert. Localización de una instalación. En *Localización, distribución en Planta y mantenimiento*. 1 ed. España. Macombo. 1991, p. 11-42. ISBN 84-267-0814-5

⁹ Ibid, p 12.

planteando para la localización de instalaciones, cabe resaltar que al momento de tener en cuenta estos factores de localización, se podrían evitar posibles eventos negativos que podrían afectar a la organización en un futuro a mediano o largo plazo.

Tabla 2. Factores para la elección de ubicación y emplazamiento.

Factores para las decisiones de localización	
<ul style="list-style-type: none"> • Transporte • Oferta de mano de obra • Espacio para expansión • Actitud de la comunidad • Proximidad a fuentes de aprovisionamiento • Medios de transporte y costo de los mismos • Condiciones de vida • Posibilidad de deshacerse de los desechos • Proximidad a los mercados 	<ul style="list-style-type: none"> • Proximidad a centros de enseñanza secundaria y universitaria • Topografía del lugar • Suministro energético • Relaciones entre obreros y empresas • Disponibilidad de combustible • Nivel salarial • Factores religiosos • Comunicaciones • Clima • Coste de arriendo o de terrenos

Fuente: Valhonrat, Joseph M y Corominas Albert. (1991).

A través de los años, diversos autores han estudiado el problema de localización de instalaciones utilizando diferentes variaciones de modelos y algoritmos para su solución, el objetivo principal de todos estos autores ha sido localizar nuevas instalaciones para optimizar algún objetivo en particular, tiempos de viaje, costos de transporte o instalación y, en últimas, la satisfacción al cliente. Current John,

Daskin Mark y Shilling David (2002)¹⁰, clasificaron el problema de localización en ocho modelos básicos según su consideración con la distancia, en este trabajo se hablará sobre cuatro modelos, los cuales se expondrán a continuación (ilustración 2):

Ilustración 2. Clasificación de los problemas de localización.



Fuente: Current John, Daskin Mark and Schillin David (2002).

2.1.1. Problemas de Cobertura (set-covering). En definición, el problema conjunto de cobertura (SCP) pertenece a la rama de problemas de optimización combinatoria, cuya complejidad es exponencial y se establece como un problema NP-Complejo. Según Itaim Pablo “consiste en encontrar un conjunto de soluciones que permitan cubrir un conjunto de necesidades al menor costo

¹⁰ CURRENT J, Min H y SCHILLIN, D. Introduction to location theory and models. En: *Network and Discrete location: Models, algorithms and applications*. 2 ed. Sabim S.A. WILEY. 1995. P 1-37. ISBN: 978-0-470-90536-4

posible”¹¹. En el contexto de esta investigación el propósito de este grupo de problemas, es el de cubrir una demanda de forma total o parcial. En muchos casos, la distancia o tiempo de respuesta entre los clientes y los puntos que prestan los servicios es decisiva para la satisfacción del cliente.

Los problemas de cobertura pueden presentar de dos maneras:

- a) Cobertura total, se obtiene como respuesta el número mínimo de instalaciones para cubrir toda la demanda, garantizando que cada nodo de demanda sea cubierto por al menos una instalación factible.
- b) Máxima cobertura, este modelo restringe el número de instalaciones a localizar y vuelca la función objetivo sobre la cobertura, maximizándose con un número de instalaciones fijas.

2.1.2. Problemas de Centro (p-center). Es un problema de ubicación y asignación Minimax, su parámetro de entrada es el número de instalaciones a ubicar y el objetivo de este modelo es minimizar las máximas distancias que puede haber entre la instalación y el nodo de la demanda más alejado que le sea asignado, Según Hakimi (1964)¹² hay 2 variaciones posibles del modelo básico. El “Vértice”, problema de p-centro que restringe el conjunto de las posibles ubicaciones de instalaciones a los nodos de la red, mientras que el problema del p-centro “Absoluta” permite ubicar en cualquier lugar las instalaciones a lo largo de la red.

¹¹ ITAIM, Ananias Pablo. Resolución del problema de Set-Covering utilizando un algoritmo genético. 2005. Valparaíso, p. 16.

¹² HAKIMI, S, L. Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 1964. Vol.12, p.450-459.

2.1.3. Problemas de medianas (p-median). El objetivo de este modelo es determinar la ubicación de centros de distribución dada una demanda finita conocida, a su vez este modelo minimiza los costos relacionados con los tiempos de viaje y las distancias entre los nodos de la demanda y la instalación a la cual son asignados, según Alarcón Zaida, “se conoce como medianas, donde un conjunto dado de centros de localización cubre a cada centro de demanda en el sistema y un conjunto óptimo minimiza el efecto negativo del viaje”¹³.

2.1.4. Problemas de dispersión (p-dispersión). El objetivo principal de este modelo es maximizar el mínimo de las distancias, se aplica a instancias donde se quiere que la instalación a localizar, esté lo más alejada o en la frontera de cierto límite. Kuby (1987)¹⁴ expone que el problema de p-dispersión (PDP) difiere de dos maneras, en primer lugar, se refiere únicamente a la distancia entre nuevas instalaciones y, en segundo lugar, el objetivo es maximizar la distancia mínima en cualquier instalación. Un ejemplo práctico para entender el concepto, es un vertedero de basuras en el cual se busca que su localización este lo más alejada posible de las zonas residenciales.

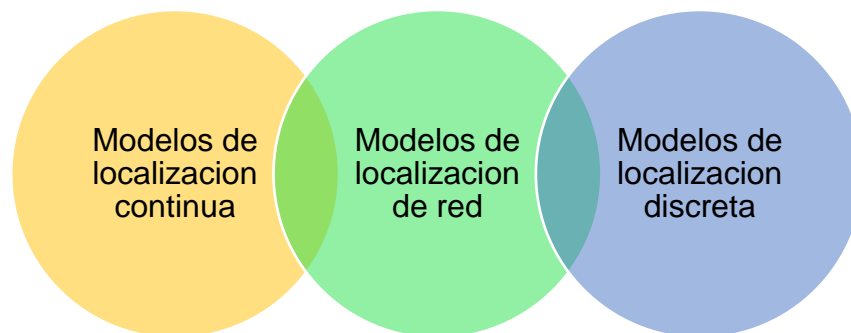
¹³ ALARCON, B, Zaida, Estefanía. Desarrollo de un modelo de localización de servicios bi-nivel y su algoritmo de solución. título: Maestría en ingeniería. México. *Universidad nacional autónoma de México*. 2012.

¹⁴ KUBY, M. Programin Models for Facility Dispersion: The p-dispersion and maximum dispersion problems, *Geographical Analysis*. Vol 19. No. 4, Oct. 1987, p315-329.

2.2. MODELOS DE LOCALIZACIÓN

Klose Andreas, Drexl Andreas (2005)¹⁵ revisan algunas contribuciones que se han realizado al estado del arte en cuanto a los modelos de localización de instalaciones, y en particular se centran en los modelos de localización continuos, localización de red, y modelos de localización discretos.

Ilustración 3. Clasificación de los modelos de localización.



Fuente: Klose Andreas, Drexl Andreas (2005).

2.2.1. Modelos de localización continua. Modelos en el plano, se caracterizan por tener dos atributos esenciales, a). El espacio de soluciones es continuo, es decir, factible para localizar instalaciones en cualquier punto del plano, b). La distancia se mide con una métrica adecuada. Los modelos de localización continua requieren de coordenadas para su cálculo y su objetivo es reducir al mínimo la suma de las distancias entre las instalaciones y puntos dados por la demanda.

2.2.2. Modelos de localización de red. Estos modelos de red consideran explícitamente la estructura del conjunto de instalaciones posibles y la distancia métrica a tomar en cuenta, en estos modelos las distancias se calculan como los

¹⁵ KLOSE, Andreas y Drexl, Andreas. Facility location models for distribution system design. En: *European Journal of Operational Research*. Vol. 162. 2005 p. 4-29.

caminos más cortos en un gráfico, los nodos representan los puntos de la demanda y las posibles ubicaciones de las instalaciones corresponden a un sub conjunto de los nodos y puntos de la red, estos modelos corresponden a los problemas de localización P-median, P-center, entre otras.

2.2.3. Modelos de localización discreta. Estos modelos de localización discreta se caracterizan por que ya están predefinidas las posibles ubicaciones de las instalaciones, el objetivo es encontrar entre todas esas posibles ubicaciones el menor costo. Klose Andreas y Drexl Andreas (2005)¹⁶ clasifican estos modelos discretos en (ilustración 4):

Ilustración 4. Clasificación de los modelos discretos.



Fuente: Klose Andreas, Drexl Andreas (2005).

¹⁶ Ibid. P.8.

Para el desarrollo de esta investigación, se profundizará en los modelos de localización discretos, explícitamente en el problema de localización de CEDIs con capacidad limitada e ilimitada, Enfatizando el problema de localización de instalaciones capacitado, así como el cálculo del área de almacenamiento requerida para estas instalaciones, y entendiendo que el costo de arrendamiento está directamente relacionado con el área del CEDI.

Cabe resaltar que en el presente trabajo para dar solución al problema de localización de instalaciones capacitados se utilizará programación lineal entera mixta la cual es una técnica de solución que permite resolver los modelos de localización discreta, la PLEM hace parte de los métodos exactos de solución de problemas.

2.2.4. Problema de localización de instalaciones no capacitado. El problema de localización de instalaciones no capacitado conocido por sus siglas en ingles UFLP (Uncapacited Facility Location Problems) corresponde a un problema de FLP, el cual tiene como objetivo determinar qué instalaciones se abrirán, teniendo en cuenta los costos fijos de apertura de dichas instalaciones y los costos de asignar una instalación al cliente.

- **Formulación matemática**

De manera general Ardjmand, Ehsan (2014)¹⁷ expone el siguiente modelo de UFLP:

¹⁷ ARDJMAND, Ehsan. PARK, Namkyu. WECKMAN, Gary and REZA, Mohammad. The discrete unconcious search and its application to uncapacitated facility location problem. *En Computers & industrial engineering*. 2014. Vol. 73. p- 32-40.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} X_{ij} + \sum_{j=1}^m f_j y_j \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{ij} \leq y_j \quad i = 1, \dots, n \text{ and } j = 1, \dots, m, \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \text{ and } j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

$$y_j \leq 0 \text{ or } 1 \quad j = 1, \dots, m. \quad (5)$$

Dados los conjuntos $i = 1, \dots, n$ clientes y $j = 1, \dots, m$ instalaciones, existe un costo fijo f_j de abrir una nueva instalación en el sitio j , y un costo de asignación c_{ij} de asignar el cliente i a la instalación j . La variable y_j , es una variable binaria de asignación 1, si la instalación j se abre, 0 de lo contrario. x_{ij} es 1, si el cliente i se asigna a la instalación j , y 0 en caso contrario.

La función objetivo (1) representa la suma de los costos fijos de abrir las instalaciones en el sitio j y los costos de asignar dichas instalaciones a los clientes i . Las restricciones, (2) garantiza que la demanda de un cliente i sea atendida por una sola instalación j . (3) indica que la cantidad de productos enviados a los clientes i sean únicamente desde la instalación j que se le asigno. (4) asegura la función de la variable binaria valores entre 0 o 1.

- **Consideraciones particulares del problema**

Estos problemas de instalaciones no capacitados UFLP se evalúan durante un periodo de tiempo determinado, es decir la producción y distribución de productos se realiza durante un determinado periodo. Es un modelo discreto que contempla ubicar determinados CEDIs o plantas en puntos específicos en la red o plano, bajo las premisas de cubrir las demandas de los diferentes clientes al menor costo posible (instalación y transporte).

2.2.5. Problema de localización de instalaciones capacitado. El problema de localización de instalaciones capacitado CFLP (Capacitated Facility Location Problems), considera los mismos objetivos del UFLP (determinar dónde ubicar instalaciones y la forma de mover mercancías de tal manera, que las demandas de los clientes están satisfechas y el costo total sea el menor posible), difiere en que las instalaciones a localizar (plantas o CEDIs) tienen una capacidad limitada la cual restringe su actividad productiva.

- **Formulación matemática**

Según el modelo planteado por A. Rahmani & SA. Mirhassani (2014)¹⁸ en programación lineal entera mixta

$$\text{Min} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} d_i + \sum_{j=1}^m f_j y_j \quad (1)$$

sujeto a:

¹⁸ A, RAHMANI. SA, Mirhassani. A hybrid Firefly-Genetic Algorithm for the capacited facility location problem En: *Information Sciences: new trend computational intelligence in Human-Robot interaction*. 2014. Vol. 283. p. 70-78.

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i X_{ij} \leq s_j y_j \quad \forall j, \quad (3)$$

$$X_{ij} \leq y_j \quad \forall j \forall i, \quad (4)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \forall j, \quad (5)$$

$$y_j = \{0, 1\} \quad \forall j \quad (6)$$

Dados los conjuntos $i = 1, \dots, n$ clientes y $j = 1, \dots, m$ instalaciones, existe un costo fijo f_j de abrir una nueva instalación en el sitio j , y un costo de asignación c_{ij} de asignar el cliente i a la instalación j , d_i es la demanda del cliente y s_j es la capacidad de producción. La variable binaria y_j es igual a 1 si la instalación está abierta, 0 en caso contrario, La variable x_{ij} denota la fracción de la demanda del cliente i conocido por la instalación j .

La función Objetivo (1) minimiza el costo de instalación del edificio y el costo total causado por el transporte de productos de las instalaciones abiertas j a los clientes i . Las restricciones, (2) asegura que se cubra toda la demanda requerida del cliente i por instalación j , (3) asegura que los flujos totales que se muevan a cada instalación abierta no exceda su capacidad, (4) Asegura que cada cliente i sea atendido por una única instalación j , (5) restricción de no negatividad en la cantidad de productos transportados desde las plantas a los centros de distribución, (6) asegura que las variables solo puedan tomar valores entre 0 y 1.

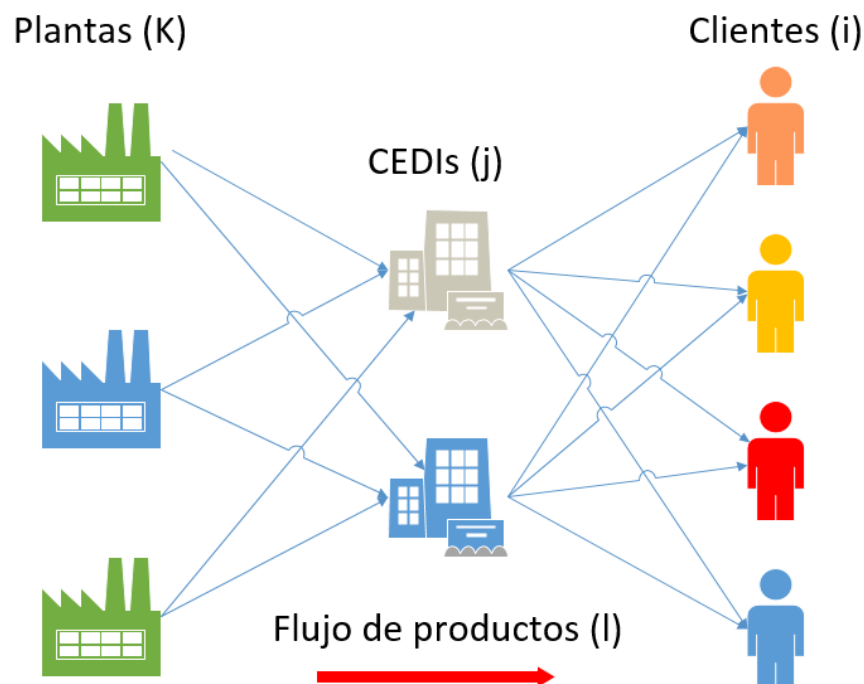
2.2.6. Problemas de localización de instalaciones capacitado en dos etapas. El problema de localización de instalaciones capacitado en dos etapas (TSCFLP, por sus siglas en inglés) es una extensión del problema de localización capacitado CFLP, Su objetivo es encontrar la localización óptima de las

instalaciones que deben satisfacer a un conjunto de clientes dada una demanda específica, asignando un cliente a un único CEDIs y determinado el flujo que deben seguir los productos desde la planta hasta los CEDIs.

“Se considera un problema típico que se plantea en el transporte de carga, donde un solo producto debe ser transportado desde un conjunto de plantas para satisfacer las demandas de los clientes, sin embargo, el transporte no se realiza directamente, las plantas envían el producto a un conjunto de depósitos que realizan la entrega a los clientes”¹⁹.

Entonces se considera que hay dos flujos de transporte: entre las plantas y los CEDIs, y entre los CEDIs y los clientes, este modelo incluye las capacidades de las plantas y los depósitos, además de los costos fijos y variables.

Ilustración 5. Representación de localización de instalaciones capacitado en dos etapas (TSCFLP)



¹⁹ FERNANDES, DIOGO. Rocha, Caroline. Aloise Daniel. A simple and effective genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem. En: Computers & industrial Engineering (2014). Vol. 75. p. 200-202.

- **Formulación matemática**

Según la notación utilizada por Klose, A (1998)²⁰ la formulación del problema de localización de instalaciones capacitado en dos etapas es:

Conjuntos

- i Clientes $i = 1, \dots, n$,
- j CEDIs $j = 1, \dots, m$, sitios potenciales para los CEDIs
- k Plantas $k = 1, \dots, h$,

Parámetros

- p_k : Capacidad de producción de la planta ubicada en el sitio k .
- s_j : Capacidad del centro de distribución en el sitio potencial j .
- d_i : Demanda del cliente i .
- D : Demanda total
- t_{kj} : Costo de enviar una unidad de producto desde la planta k hasta la posible ubicación j .
- c_{ij} : Costo de suplir el cliente i desde el centro de distribución j .
- f_j : Costo fijo de mantener un centro de distribución en la posible ubicación j .

²⁰ KLOSE, Andreas. Obtaining Sharp Lower and Upper Bounds for Two-Stage Capacitated Facility Location Problems. En: *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systemes* 1997. p. 185-214.

Variables de decisión

- x_{kj} : Cantidad de productos a enviar desde la planta k al centro de distribución j .
- $z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente } i \text{ es atendido por el centro de distribución } j \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$ variable binaria, determina que la demanda de un cliente i solo puede ser atendida por un solo centro de distribución j .
- $y_j = \begin{cases} 1, & \text{Si un centro de distribución esta ubicado en el sitio } j \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$, variable binaria, determina que solo un CEDI puede ser ubicado en una posible ubicación j .

Función Objetivo

$$\text{Min} \sum_{k=1}^h \sum_{j=1}^m t_{kj} x_{kj} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} z_{ij} + \sum_{j=1}^m f_j y_j, \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^m z_{ij} = 1, \quad \forall i, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i z_{ij} \leq s_j y_j, \quad \forall j, \quad (3)$$

$$z_{ij} - y_j \leq 0, \quad \forall i, \forall j, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m s_j y_j \geq D, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{kj} \leq p_k \quad \forall k, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^h x_{kj} \geq \sum_{i=1}^n d_i z_{ij} \quad \forall j, \quad (7)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, \forall j, \quad (8)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \quad (9)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j, \quad (10)$$

La función objetivo (1) representa: el costo total de enviar los productos desde las plantas k hasta los centros de distribución j , los costos de suplir al cliente i desde el centro de distribución j y los costos de mantener el centro de distribución en la ubicación j , las restricciones, (2) asegura que cada cliente sea atendido por un solo centro de distribución, (3) garantiza que la demanda del cliente i no exceda la capacidad del CEDI j , (4) y (5) son restricciones que garantiza la conservación de flujo entre los tres eslabones, Plantas-CEDIs-Clientes, (6) asegura que la cantidad de productos que envían las plantas no sobrepasen su capacidad de producción, (7) considera que la cantidad de productos que son enviados desde la planta al CEDI es igual a la demanda solicitada por el cliente i , (8), (9), (10), son restricciones de integridad y no negatividad las cuales aseguran el correcto funcionamiento del modelo matemático.

- **Consideraciones particulares del problema**

El módelo TSCFLP es un problema tipo NP-HARD el cual puede ser modelado en Programación lineal entera mixta, su formulación es sencilla lo cual en su construcción puede modificarse fácilmente para que las restricciones describan las necesidades reales del sistema que se propone.

2.3. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Existen diversas clases de almacén, Mikel Mauleón²¹ propone clasificar los almacenes según el punto de vista adoptado:

- Según la naturaleza del producto.
- Según la función logística.
- Según las manipulaciones.
- Según el tipo de estanterías de pallets.
- Almacenes automáticos.
- Según la naturaleza jurídica: Propios o alquilados.

La localización de un CEDI es una decisión estratégica que requiere la mayor cantidad de información posible debido al número de factores que pueden afectar el óptimo funcionamiento de este; una de los factores que incide significativamente es el sistema de almacenamiento, ya que es determinante en la capacidad del CEDI y en la custodia de la mercancía. Por este motivo, es importante definir la capacidad del centro de distribución a través del sistema de almacenamiento que se esté manejando.

De antemano, es importante aclarar que la variedad de sistemas de almacenamiento es amplia, y que exponer todos los tipos y sub-tipos de sistemas supondría un esfuerzo muy alto para un tema que, a pesar de tener importancia en los objetivos de este proyecto, no es definitivo. Por esto, se han escogido los sistemas más comunes y con menos cantidad de variables para simplificar la solución del modelo matemático.

²¹ MAULEÓN, Mikel. Teoría del almacén En: *Sistemas de almacenaje y picking*. Vol 1. Díaz de Santos S. A. 2003 Madrid p. 4-9.

Para el desarrollo de este proyecto se contemplarán los sistemas de almacenamiento paletizados.

2.3.1. Almacenamiento en bloque. Este almacenamiento se realiza sin ningún tipo de estructura, los pallets son apilados unos encima de otros, la altura de paletización depende de la resistencia de los materiales al apilado. Este tipo de instalaciones se utiliza para el almacenamiento de productos a granel, materias primas, abonos, determinados comestibles, entre otros, que por lo general son guardados en sacos o cajas.

Ventajas:

- Bajo costo ya que requiere muy baja inversión de maquinaria y estructura de almacenamiento.
- Buen uso del espacio disponible.
- Permite un buen control sobre los productos a almacenar gracias a los volúmenes de apilamiento y a la homogeneidad e los bloques.

Desventajas:

- Su inadecuado control puede originar accidentes.
- Dificultad de acceso a determinados productos dependiendo de la distribución.
- No todos los productos pueden ser almacenados mediante este sistema.

2.3.2. Almacenamiento con estanterías. Este tipo de almacenamiento bajo sus diversas configuraciones supone ciertas ventajas generales frente a otros sistemas de almacenamiento y la más considerable es el costo/beneficio. Algunas de las características, ventajas y desventajas de las estanterías tienen que ver con los materiales y diseño de cada proveedor o fabricante, tema que no será tratado en este documento y se parte del supuesto que los materiales y diseños de las estanterías son homogéneas en su calidad²².

Estanterías convencionales

Estas estanterías son las más comunes, utilizan como unidad de carga los pallets cuyas dimensiones pueden variar. Esta estantería es estática y su altura la determina el tamaño del almacén. La profundidad de paletización es de un pallet (ilustración 6).

Ilustración 6. Sistema de almacenamiento con estanterías fijas convencionales.



Fuente: Catálogo de estanterías convencionales. MECALUX.

²² MECALUX. Catálogo de soluciones MECALUX Almacenes con estanterías. En: www.mecalux.es. 2016 p. 4-18. [Citado el 28 de septiembre del 2016]

Ventajas:

- Permite un acceso directo a cada unidad.
- Se puede adaptar a diferentes tipos de cargas ya que su dimensión solo está restringida por el tamaño del pallet.
- Permite mayor aprovechamiento de la altura y mejor conservación del producto.
- Reduce significativamente los riesgos de accidentes.

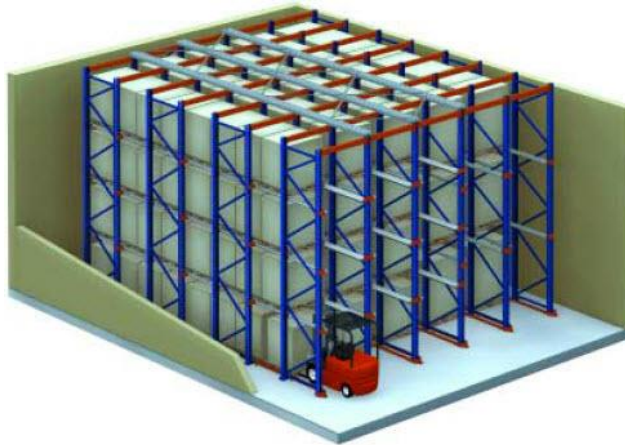
Desventajas:

- Aumenta el área requerida para el almacenamiento.
- Su costo es mayor, además de costos de mantenimiento de la estructura y maquinaria.
- Las distancias aumentan y consigo los tiempos de preparación.
- Gran cantidad de espacio dedicado a pasillos.

Estanterías compactas o drive in

Las estanterías compactas están diseñadas para permitir la máxima utilización del espacio disponible, en términos tanto de área como de altura. Este tipo de instalaciones están conformadas por estanterías en conjunto, que forman calles interiores de carga y en cada nivel de altura poseen carriles de apoyo para los pallets. Los montacargas ingresan a estas calles interiores con la carga por encima del nivel en el que va a ser depositada. Es de suma importancia señalar que esta clase de estanterías están diseñadas para productos homogéneos por calle debido a la distancia que existe entre los soportes laterales (ilustración 7).

Ilustración 7. Ilustración de sistemas de almacenamiento Drive-in.



Fuente: Catálogo de estanterías compactas drive-in/drive-through. MECALUX.

Ventajas:

- Su relación costo/espacio ocupado es bastante bueno.
- Debido a la minimización de pasillos, el área necesaria es relativamente menor en comparación con un sistema de estanterías tradicional.
- Los costos de mantenimiento para este sistema de almacenamiento son muy bajos.
- Debido a las características del sistema, los riesgos de accidentes son bastante bajos.

Desventajas:

- Su diseño permite albergar una sola referencia por pasillo.
- Una vez establecido el sistema, es muy difícil modificarlo.
- Exige medios de transporte especiales que se adapten a las características de los pasillos (en caso de existir pasillos de múltiples dimensiones).
- Existen limitaciones para establecer clasificaciones.

Estanterías dinámicas

Las estanterías dinámicas funcionan con el mismo principio de las estanterías compactas, la diferencia radica en que los montacargas no requieren entrar en las calles interiores, en cada nivel, los pallets se introducen desde un extremo de la estantería y estos se desplazan gracias a la gravedad a una velocidad controlada debido a unos juegos de rodillos que permiten la movilidad de la carga hasta el final de la estantería, quedando la mercancía dispuesta para su extracción en el otro extremo lo cual permite una perfecta rotación del producto aplicando el sistema FIFO²³ (First-in, First-out), (ilustración 8).

Ilustración 8. Funcionamiento del sistema de estanterías dinámicas con rodillos.



Fuente: Catálogo de estanterías dinámicas. MECALUX

Cuando se retira la primera paleta disponible, inmediatamente la anterior pasa a tomar su posición, por este motivo este sistema es muy utilizado para el almacenamiento de productos perecederos.

²³ MECALUX. Catálogo de soluciones MECALUX Almacenes dinámicos p. 3-6. En: www.mecalux.es. 2016 p. 4-18. [Citado el 28 de septiembre del 2016]

Ventajas:

- Permite un óptimo control sobre los inventarios.
- Garantiza un sistema de inventarios FIFO.
- Al igual que en estanterías compactas, permite un buen aprovechamiento del espacio.
- Mejora los tiempos de picking, solo existe área de carga y descarga de producto.

Desventajas:

- Debido al sistema de rodillos, su costo se incrementa significativamente.
- Tiene un mayor costo de mantenimiento.
- Se genera un riesgo de aplastamiento de cargas, pero es algo que se puede evitar con el manejo adecuado de la mercancía y un embalaje idóneo.

Estanterías móviles

El almacenamiento mediante estanterías móviles se debe entender como un sistema de almacenamiento de estanterías tradicionales, cuya diferencia radica en que las estanterías no están ancladas al suelo, sino que se encuentran sobre rieles que permiten el movimiento de la estructura. Con este mecanismo, las estanterías móviles obtienen casi todas las ventajas del almacenamiento compacto, estas estanterías dependiendo de sus dimensiones, son manipuladas de manera mecánica o automáticas (ilustración 9).

Ilustración 9. Sistema de almacenamiento de estanterías móviles.



Fuente: Catálogo de estanterías de racks móviles Movirack. MECALUX.

Ventajas:

- Se tiene acceso a cualquier sección de la estantería a diferencia de sistemas de almacenamiento compactos.
- El aprovechamiento del espacio es alto debido a la capacidad de almacenaje en la estantería, reducción del área a construir y eliminación parcial de pasillos.
- Los gastos de mantenimiento son bajos.

Desventajas:

- Aumenta el tiempo de picking debido a la espera relacionada con el movimiento de la estantería para acceder a determinado pasillo.
- La rotación de inventarios es difícil de controlar.
- Altos costos de instalación.

Almacenes automáticos

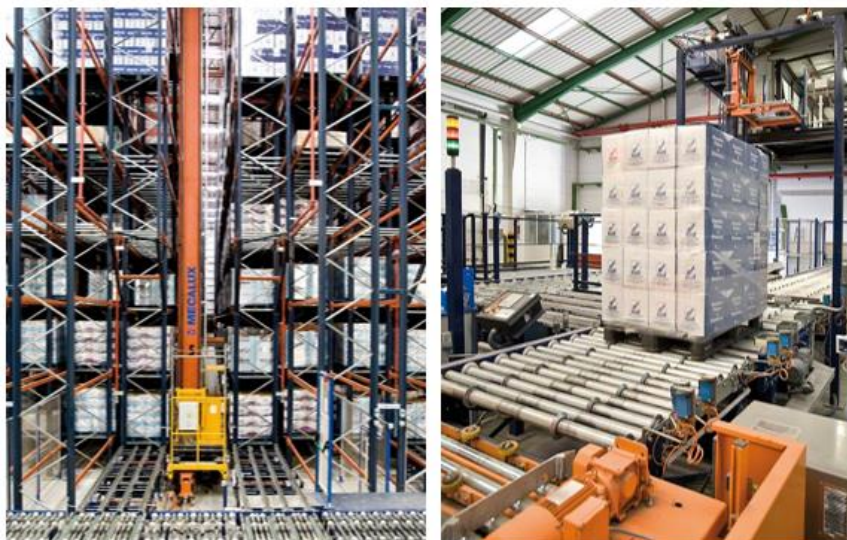
Los sistemas de automatización logística requieren de alta inversión, y para la instalación de este sistema se debe garantizar una alta rotación de productos, una alta variedad de referencias de volumen y especificaciones similares de pallet. Se define como la combinación de estanterías, junto a maquinaria y equipo automático y semiautomático de manejo de materiales, que son controladas por software de gestión que además administra todo el sistema.

Las necesidades de área de los sistemas de almacenaje automáticos son definidas por la maquinaria utilizada principalmente, que a su vez es establecida por los tipos de producto a manejar, por eso la importancia de que los productos sean lo más homogéneos posible²⁴.

Debido a la amplia gama de posibilidades de configuración de almacenes automáticos, se tendrán en cuenta las ventajas y desventajas que tienen en común estos sistemas (ilustración 10).

²⁴ MECALUX. Catálogo de Almacenes automáticos MECALUX. p. 9-111. En: www.mecalux.es. 2016 p. 4-18. [Citado el 28 de septiembre del 2016]

Ilustración 10. Sistema de almacenamiento automático, transelevadores para pallets transportadores para pallets.



Fuente: Catálogo de transelevadores para estibas (izquierda). Catálogo de transportadores para estibas (derecha). MECALUX.

Los almacenes automáticos mencionados anteriormente solo son un par de máquinas de las diversas posibilidades que existen para el manejo de productos, estas se pueden combinar, y manejar productos individuales (cajas), o por pallet.

Ventajas:

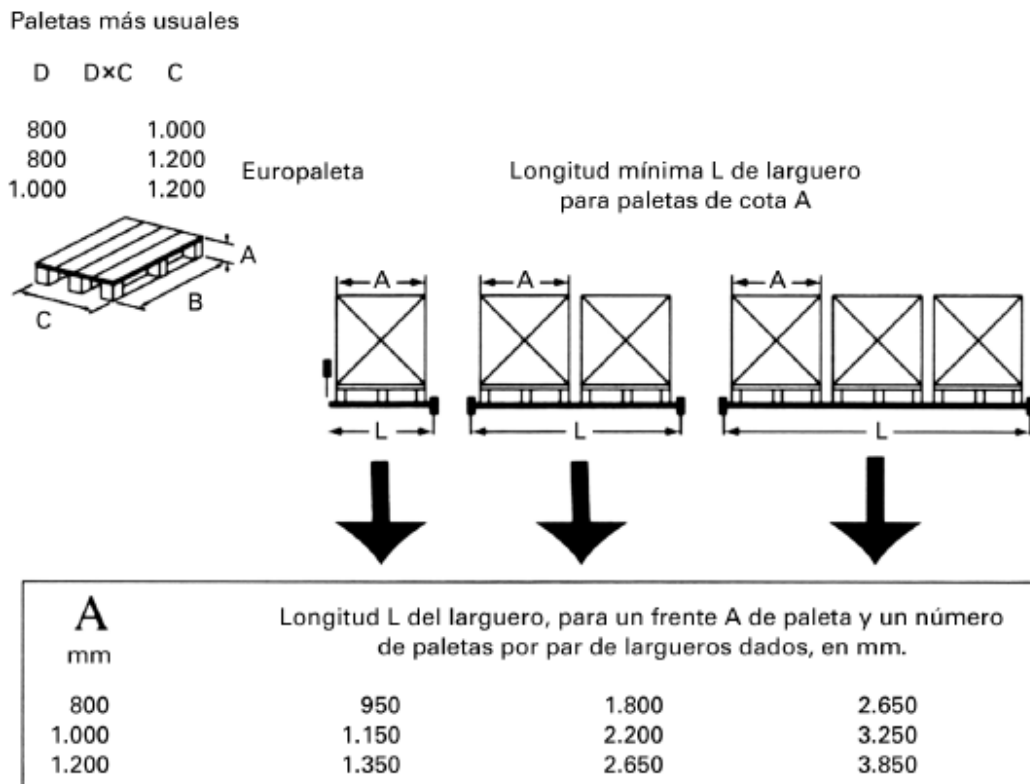
- Requiere poco personal.
- Aumenta el control del material.
- Incrementa la densidad de almacenamiento.
- Incrementa la capacidad de almacenamiento.
- Reduce notablemente los tiempos de preparación.
- Reduce al mínimo los posibles accidentes laborales.
- Debido al software que administra el sistema, se tiene información actualizada y cierta en tiempo real.

Desventajas:

- Altos costos de instalación.
- Elevados gastos de mantenimiento.
- No hay posibilidad de cambiar la configuración del sistema en el corto o mediano plazo.

2.3.3. Pallets. Existe gran variedad de pallets en el mercado, según la región, el sector económico o el tipo de producto, las dimensiones de estas armazones varían, pero se encuentran algunos tipos específicos de pallet que son frecuentemente utilizados ya sea por su diseño o tamaño apropiado. Estos, son los pallets europeos (europalet, 1200 mm x 800 mm), y los pallets universales (pallet americano, 1200 mm x 1000 mm), (ilustración 11).

Ilustración 11. Tipos de pallets más usados.



Fuente: Sistemas de almacenaje y picking. Mikel Mauleón.

2.3.4. Cálculo de la necesidad de almacenamiento. La capacidad de cada centro de distribución está dada por la expresión matemática expuesta por Saldarriaga²⁵, esta se adaptará al modelo de optimización permitiendo encontrar los metros cuadrados necesarios de almacenamiento para cada CEDI que el modelo localice. Esta fórmula involucra algunos de los factores más importantes de los sistemas de almacenamiento como la altura, el tamaño de los pasillos, el tipo o área de estiba y el factor estiba, como se observa a continuación:

Nota: Esta fórmula solo determina el área principal de almacenamiento, es decir, no tiene en cuenta áreas complementarias como zona de picking, recepción, entre otras.

Con la siguiente ecuación, se resuelve la siguiente interrogante, ¿Qué área debe tener el CEDI para almacenar la demanda del producto?

$$\left(\frac{\frac{\textit{Demanda} \left(\frac{\text{und}}{\text{producto}} \right)}{\textit{Factor estiba} \left(\frac{\text{und}}{\text{pallet}} \right)}}{\textit{Factor altura} \text{ (adimensional)}} \right)$$

$$* \textit{Area de la estiba}(\text{m}^2) * \textit{Factor pasillo} (\%) = \textit{m}^2$$

- ***D*** = Demanda
- ***Fe*** = Factor estiba
- ***Fh*** = Factor altura
- ***Ae*** = Área de la estiba
- ***Fp*** = Factor pasillos

²⁵ SALDARRIAGA, R, Luis, Diego. Diseño optimización y gerencia de centros de distribución, almacenar menos distribuir más. Ed. Impresos Begon Ltda. Medellín. Vol. 1. (2012). p. 81-87.

- **El factor estiba f_e :** el factor estiba está dado por las unidades de producto sobre pallet, este se calcula teniendo en cuenta el espacio disponible que hay entre los entrepaños de la estantería, para esto se tiene en cuenta la altura del pallet y la capacidad de arrume del producto a estibar.
- **Factor altura Fh :** es el número de niveles que tiene la estantería, un valor que depende del sistema de almacenamiento o del tipo de equipo de manejo de materiales, un ejemplo que expone el autor para entender este factor es:

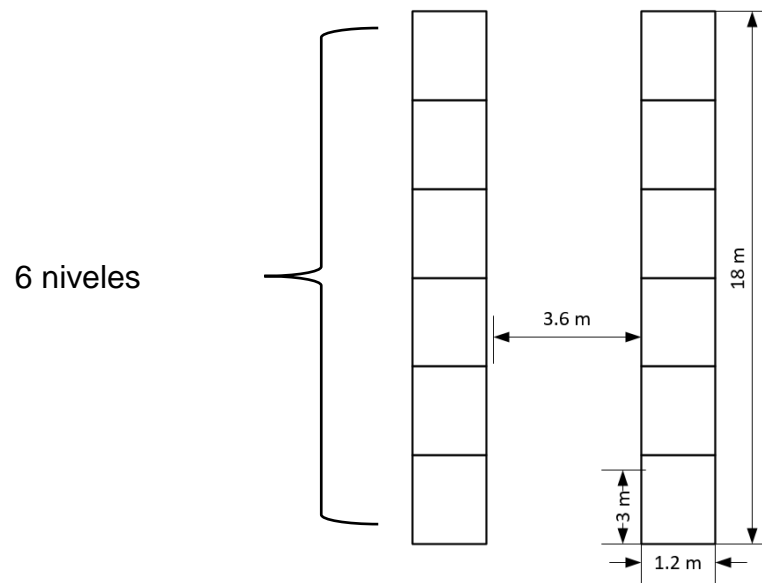
Si el sistema de almacenamiento que se maneja, tiene la posibilidad de apilar cuatro pallets bien sea de forma de bloque o en estantería, este factor altura es igual a cuatro, $Fh = 4$.

- **Área del pallet A_e :** existen gran variedad de pallets su área depende del tipo de pallet que se esté utilizando y su relación con el sistema de almacenamiento o del tipo de mercancía que se esté manejando.
- **Factor pasillos Fp :** este factor se refiere a la cantidad de área adicional que se debe reservar para cubrir las necesidades de pasillo, este dato cambia de acuerdo al sistema de estantería utilizado o al sistema de manejo de mercancía que se esté utilizando (montacargas o elevadores)

Los sistemas de almacenamiento utilizan diferentes sistemas de manejo de materiales que tienen incidencia directa en el consumo de espacios en lo que tiene que ver con los pasillos.

2.3.5. Cálculo del factor altura (F_h) y factor pasillo (F_p). Las dimensiones de las estructuras y tipos de equipo son dependientes del diseño del centro de distribución, el factor pasillo se calcula como un porcentaje de la dimensión total del sistema de almacenamiento como se puede apreciar a continuación.

Ilustración 12. Diagrama de dimensiones de estantería



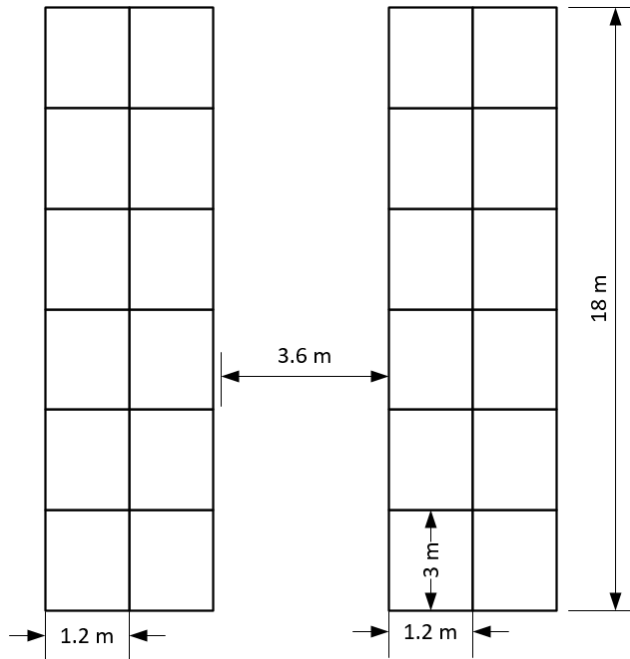
$$F_p = 1 + \left(\frac{\text{ancho del pasillo}}{(\text{Numero de Estanterías} * \text{ancho de la estantería}) + \text{ancho de pasillo}} \right)$$

$$F_p = 1 + \left(\frac{3,6}{(2 * 1,2) + 3,6} \right) = 1.6$$

Esto quiere decir, que se debe reservar el **60%** de área adicional para cubrir las necesidades de pasillos (este dato cambia de acuerdo al sistema de almacenamiento con estanterías utilizado o al sistema de manejo de mercancías).

El factor altura para este caso es **6**, está dado por el número de niveles de la estantería, en cada nivel hay una altura de 3 m.

Ilustración 13. Sistema de almacenamiento de doble profundidad de estantería convencional

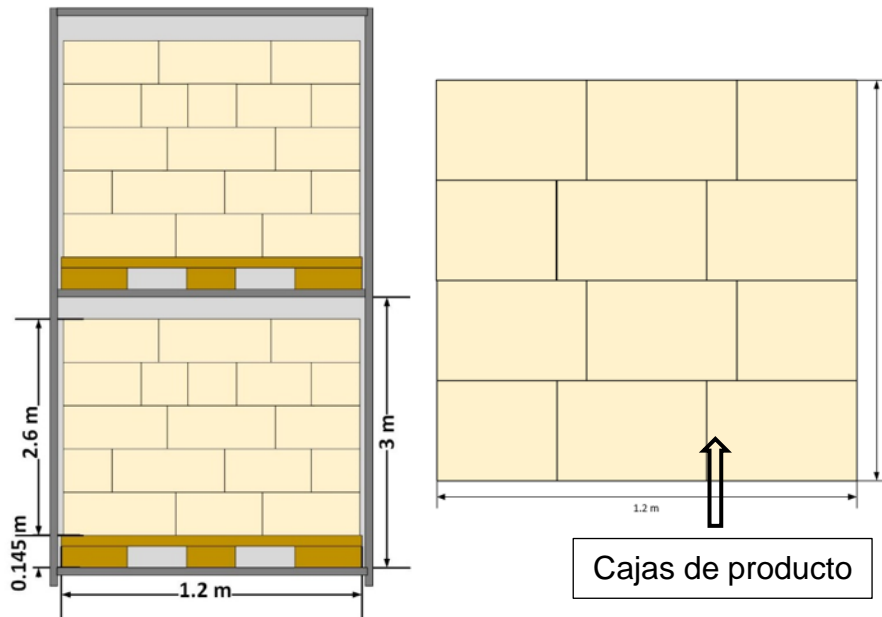


$$Fp = 1 + \left(\frac{3,6}{(4 * 1,2) + 3,6} \right) = 1.4286$$

Para esta estantería de doble profundidad, el factor pasillo es de 1,4286 lo que quiere decir que el **42,86%** corresponde al área necesaria de pasillos, y para este caso el factor altura también es **6**.

2.3.6. Cálculo del factor estiba (Fe). El factor estiba depende de las características del producto a estibar, el tipo de embalaje, el volumen que ocupa, el peso unitario, el material de la estiba y de las dimensiones del estante. Este factor se debe entender como la cantidad de producto que se pueden apilar en una estiba, y su valor corresponde a un número entero mayor o igual a 1.

Ilustración 14. Apilamiento de productos por entrepaños



Para una estiba estándar de 1 m x 1,2 m, se pueden apilar cajas de producto $p1$, cada caja contiene 24 unidades del producto. Supóngase que del producto $p1$ se pueden apilar 36 cajas en un solo pallet, su factor estiba para este caso, es **36**. Ahora bien, si un determinado producto no ocupa toda la estiba y se debe manipular un solo producto o caja por pallet, su factor estiba es **1**. Cabe resaltar que la capacidad de apilamiento depende de las dimensiones del estante o de la resistencia de apilamiento del producto (peso).

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Bajo el enfoque de hacer una revisión literaria científica y técnica sobre los estudios contemporáneos que abordan la temática de este proyecto, se estudiaron inicialmente los antecedentes de proyectos de grado y artículos publicados por el grupo de investigación ÓPALO, perteneciente a la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la Universidad Industrial de Santander, además, se usó la base de datos de la Biblioteca UIS para acceder a información en los diferentes portales y recursos electrónicos que se encuentran allí, esto, con el fin de robustecer y complementar la investigación que se está realizando con respecto al problema de localización de CEDIs.

En la revisión, se encontró diversa terminología con respecto a los CEDIs y las diferentes herramientas de modelado y metodologías que hacen parte de la investigación como: programación lineal entera mixta, programación Simplex, técnicas heurísticas y metaheurísticas, relajación lagrangiana, Branch & Bound, Grasp entre otras. Términos como: problema de localización de instalaciones (FLP), problema de localización de instalaciones capacitado en dos etapas (TSCFLP), problema de localización de instalaciones con capacidad ilimitada de dos eslabones (TUFLP) y el problema de localización de centros de distribución se incluyeron en la investigación.

A continuación, se presenta un resumen de los documentos más significativos encontrados en la investigación.

3.1.1. Revisión de literatura científica. DASKIN, M. y HESSE, S (1998)²⁶ en primera instancia tratan los problemas de localización estáticos y deterministas haciendo un análisis de los modelos más relevantes de la literatura como los problemas de medias, cuyo centro de atención se centra en encontrar los lugares más factibles para la ubicación de los CEDIs y los clientes potenciales que estos podrían atender. Esta clase de modelos son muy sencillos en su formulación y como consecuencia no se capturan varias características de estos problemas en un entorno real. Se revisan *modelos dinámicos* del problema de localización, que incluyen variables de decisión y que además consideran los aspectos de incertidumbre con las demandas en el futuro y las dificultades que esta incertidumbre representa en la toma de decisiones, finalmente son examinados los *modelos estocásticos estáticos* los cuales tratan de localizar instalaciones teniendo información incompleta o poco confiable.

TRAGANTALERNGSAK. Suda, Holt. John, Rönqvist. Mikael (2000)²⁷ consideran el problema de localización de CEDIs en tres eslabones TSCFLP, el cual se caracteriza porque cada centro de distribución tiene una capacidad limitada y solo puede ser suministrado por un solo proveedor, cada cliente es asignado a un solo CEDIs. El objetivo del problema es determinar el número y la ubicación de cada eslabón de forma simultánea, utilizan relajación lagrangiana aplicándola al método Branch & Bound para acotar la solución, implementan el algoritmo propuesto para probar su rendimiento en seis conjuntos de problemas de prueba codificados en FORTRAN, y ejecutados en DEC2000 300AXP, comparan la calidad de las soluciones y tiempos de cálculo en un paquete de programación llamado ZIP, dando como resultado que el primer conjunto de datos consume menos tiempo y producía ramificaciones B&B más pequeños.

²⁶ HESSE, Susan and DASKIN, Mark. Strategic facility location En: *A review. European Journal of Operational Research*. 1998 Vol. 111.3. p. 423-447.

²⁷ TRAGANTALERNGSAK. suda, HOLT. John and Rönqvist, Mikael. Theory and Methodology: An exact method for the two echelon, single-source, capacitated, facility location problem. En: *European journal of operational research* 2000 Vol 123. p. 473-489.

NOZICK, Linda y Turnquist, Mark (2001)²⁸ exponen un ejemplo teórico-práctico del sector automotriz, muestran los efectos en los costos de almacenamiento y los costos asociados de transporte variando la cantidad de centros de distribución a instalar, definen la importancia de los inventarios de seguridad y cómo estos influyen en las características y el cálculo más exacto de la capacidad de los CEDIs. Los procedimientos usados para el cálculo de estos costos son “ideas integradas” (definido así por los autores) de diversas temáticas como la teoría de colas, análisis discreto y análisis multi-objetivo entre otras.

CHOPRA, Sunil (2003)²⁹ enmarcan todas las características a tener en cuenta en el diseño de las redes de distribución en una cadena de suministro Proveedor-CEDIs-Consumidor. En un nivel amplio, las principales propiedades a ser evaluadas en el diseño de CEDIs son: 1. Cumplir las necesidades de los consumidores 2. El costo de satisfacer las necesidades de los consumidores. También nombra los costos principales que se ven directamente afectados en la decisión de la ubicación de los CEDIs como son, los costos de inventarios, transporte, almacenamiento e información. Si bien estas características son determinantes para el problema, Chopra considera de suma importancia los tipos de producto que serán manejados en la cadena logística.

CORREA, Gabriel y Hernández, Díaz (2004)³⁰ trata el problema de ubicación de instalaciones empresariales considerando factores cualitativos, es decir cualidades que pueden tener las nuevas ubicaciones como ubicación geográfica, clima, entre otros, y factores cuantitativos los cuales se expresan como una razón de servicio al cliente en términos monetarios. Analiza el método de centro de gravedad el cual limita como único factor el costo de transporte y se utiliza

²⁸ NOZICK, Linda K y TURNQUIST, M. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. En: *European Journal of Operational Research*. Vol 129.2 2001 p. 362-371.

²⁹ CHOPRA, Sunil. Designing the distribution network in a supply chain. En: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2003. Vol. 39.2 p.123-140.

³⁰ CORREA, Gabriel y HERNÁNDEZ, Díaz. Localización de instalaciones enfoque cuantitativo. En: *Conciencia tecnológica* 2004. Vol. 26.

especialmente en empresas cuyo objetivo primordial es ampliar el servicio al cliente, utilizan una herramienta informática para poner en marcha la simulación del método centro de gravedad con los parámetros característicos de este.

MORENO, José y MLADENOVIC, Nenad (2007)³¹ plasman la cercana relación que tienen los métodos meta-heurísticos en la definición y formulación de un problema de ubicación, menciona además las características y atributos que pueden tener las meta-heurísticas y cómo la definición de estas puede generar un algoritmo que muestra un resultado cercano a la realidad, además de la importancia de este en la toma de decisiones en entornos científicos, académicos, tecnológicos, empresariales entre otros.

AMIRI, Ali (2006)³² busca plantear una posible solución al problema del diseño de una red de distribución desarrollando un modelo de programación entera mixta, proporciona una solución mediante un modelo heurístico; el modelo es justificado mediante la comparación de los resultados arrojados por el software CPLEX, para solucionar el problema planteado se utiliza relajación Lagrangiana, su particularidad es que busca determinar no solamente los mejores sitios para la ubicación de los CEDIs sino también el mejor sitio para la instalación de plantas y la mejor estrategia para distribuir la mercancía de esas plantas a los CEDIs y de estos a los consumidores.

SUN, Huijun. Gao, Ziyou y Jianjun (2008)³³ proponen la ubicación de centros de distribución en un modelo de dos niveles (superior e inferior). La programación del nivel superior tiene el fin de determinar los sitios óptimos para que los costos

³¹ PÉREZ, José y MLADENOVIC, Nenad. Búsqueda por Entornos Variables para Planificación Logística. En: *Procedimientos Metaheurísticos en Economía y Empresa*. E. Crespo, R. Marti y J. Pacheco. Tirant lo Blach Universidad de La Laguna 2007.

³² AMIRI, Ali. Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. En: *European journal of operational research*. 2006 Vol.171.2 p.567-576.

³³ SUN, Huijun. GAO, Ziyou and WU, Jianjun. A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers. En: *Applied mathematical modelling* 2008 Vol. 32.4 p. 610-616.

totales del CEDIs sean mínimos, y la programación del nivel inferior condiciona que la ubicación definida por el nivel superior debe minimizar también el costo de los clientes, que representa la demanda de los consumidores asignados a diferentes centros de distribución. Se utiliza para la programación un modelo (U), de programación lineal no entera que se puede resolver por el método “Branch & Bound”.

APONTE, Montoya y Rosas, Paula (2009)³⁴ consideran el problema de localización de centros de distribución no capacitado en una cadena logística de dos eslabones, (TUFLP) donde se propone la utilización de un procedimiento voraz adaptativo probabilista (GRASP) para la resolución del problema. Este modelo TUFLP considera que tiene una capacidad ilimitada en los CEDIs y, que es un problema tipo NP-Completo en donde no es posible encontrar soluciones óptimas para instancias de gran tamaño en un tiempo de cálculo razonable, para la solución de este problema se realizó el planteamiento del modelo comparando por medio del uso de un algoritmo metaheurístico GRASP y programación lineal SIMPLEX, dando como resultado que el tiempo de solución a través del modelo GRASP es menor (2min Aprox) que al utilizar programación lineal SIMPLEX (16h Aprox).

SUKUN. Park, Tae, Lee y Chang, Sung (2010)³⁵ tratan el problema de diseño de una red de abastecimiento única en una cadena de suministros de tres eslabones, donde el objetivo es determinar el número y la ubicación de los centros de distribución y proveedores, asignando un único proveedor y cliente a un CEDIs, formulan el problema como un modelo de programación no lineal utilizando un algoritmo heurístico y relajación lagrangiana para la solución del

³⁴ APONTE, Andrés y ROSAS, Paula. Propuesta de solución al problema de localización de centros de distribución basándose en la meta heurística GRASP. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingenierías. Departamento de Procesos Productivos. 2009. p. 124.

³⁵ SUKUN. Park, TAE. Lee, Chang. Sung, a three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. En: *Transportation Research Part E: logistics and transportation review*. 2010. Vol 46. p. 563-581.

problema. Para encontrar una solución factible la heurística se compuso de dos fases: la fase de construcción y la fase de mejora. En la fase de construcción, la solución factible se constituye en base de la relajación lagrangiana y en la fase de mejora, la solución factible se basa en una búsqueda tabú que permite obtener la cota más estrecha entre los datos, demostrando así que la heurística propuesta es factible y eficaz en la resolución del problema.

OLIVARES, Benítez. Ríos, Mercado y Gonzales, Velarde (2013)³⁶ trata el problema de localización de centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones que cuenta con varios canales de transporte entre los nodos de cada eslabón con diferentes costos y tiempos de transporte. El objetivo del modelo es minimizar los costos de transporte de la planta a los centros de distribución y minimizar los tiempos entre los centros de distribución y el cliente, implementaron el método épsilon-restricción (ϵ -*constraint*) para la solución del problema en pequeñas y grandes instancias dando resultados favorables en los tiempos computacionales.

DIABETO, Ali. Battaïa, Olga y Nazzal Dima (2015)³⁷ consideran en su trabajo un problema multi-eslabón relacionando los inventarios y la ubicación de los CEDIs, analizan las diversas metodologías para la solución del problema anteriormente mencionado como descomposición Dantzig-Wolfe, modelos analíticos estilizados, heurística iterativa, entre otras, y sus respectivas variables de decisión. En este artículo se utiliza una heurística basada en relajación Lagrangiana; el modelo define inicialmente el número de CEDIs a instalar y después su posible ubicación. Asignan los clientes a un determinado CEDIs y finalmente el tamaño de las órdenes con el fin de minimizar los costos, para comprobar la certeza del modelo fue probada con 1750 problemas de 10

³⁶ OLIVARES, BENÍTEZ, E. RÍOS, MERCADO, R. Z y GONZÁLEZ, Velarde, J. L. A. metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. En: *International Journal of Production Economics*. 2013. p.1-172.

³⁷ DIABAT, Ali. BATTÁIA, Olga y NAZZAL, Dima. An improved Lagrangian relaxation-based heuristic for a joint location-inventory problem. En: *Computers & Operational Research*. 2015. Vol. 61. p. 170-178.

tamaños diferentes, y se logró una diferencia de apenas 1% entre los resultados. La relevancia de este modelo es que permite fácilmente la incorporación de otras variables para conseguir un resultado más preciso y recomiendan incorporar decisiones de enrutamiento para en robustecer el trabajo ya realizado.

KUNG, Jeng. C, -H, Lee (2015)³⁸ estudian el problema de localización y la asignación de tareas a CEDIs capacitado en una cadena logística multi-eslabones bajo demandas de incertidumbre, plantean el problema como un modelo estocástico en programación lineal entera mixta (MILP) junto a un algoritmo metaheurístico Ant Colony Optimization (colonia de hormigas) para encontrar la solución óptima del problema. La investigación propone dos modelos, un modelo de dos eslabones que se compone de CEDIs-Clientes, y un modelo de tres eslabones que está compuesto por los Proveedores-Planta-CEDIs, trabajan los modelos sobre supuestos de la demanda en varios escenarios. Como resultado el algoritmo alcanzó entre el 95 - 99% de la solución óptima dando resultados favorables al planteamiento propuesto.

HAMID, Reza. Seyed, Taghi, Akhavan. Kobra, Asadi (2015)³⁹ tratan el modelo de optimización bi-objetivo en una cadena de suministro de tres eslabones multi-producto, el cual consiste en determinar: el número y la ubicación de los CEDIs, el número óptimo de artículos producidos en las plantas, la cantidad óptima de productos a transportar, el óptimo de inventarios en plantas y CEDIs. El problema tiene dos objetivos, el primero es minimizar el costo total de la cadena de suministro y el segundo es maximizar el número total de productos a transportar a los clientes, utilizaron programación lineal entera mixta en GAMS para la solución del problema en estancias pequeñas, ya que para instancias mayores los tiempos de CPU no son razonables y entran en conflicto con la solución

³⁸ KUNG, Jeng. C, -H, Lee. A revised ant algorithm for solving location-allocation problem with risky demand in a multi-echelon supply chain network. En: *Applied soft computing*. 2015. Vol 32. p. 311-322.

³⁹ HAMID, Reza. SEYED, Taghi, Akhavan. KOBRA, Asadi. Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability. En: *Expert Systems with application*. 2015. Vol 42. p. 2615-2623.

óptima del problema que mencionan, utilizan diferentes modelos de programación multi-objetivo para dar una solución factible al problema, que difieren de las expectativas y de los diferentes puntos de vista que tiene el tomador de decisiones; entre los métodos mencionados nombran las métricas LP las cuales buscan la solución que esté más cerca de los valores óptimos de los objetivos y, el método MAXI-MIN el cual se concentra en el objetivo más débil.

GUTJAHR, Walter y Dzubur, Nada (2016)⁴⁰ enfocan el problema de la ubicación de los CEDIs a la logística humanitaria en respuesta a la gestión de desastres, proponen un modelo en donde la demanda es incompleta y los clientes eligen los centros de distribución que pronto alcanzarán un equilibrio de usuario, este se caracteriza por la relación entre los costos de transporte y las posibles pérdidas de la demanda no cubierta. Consideran diferentes situaciones según el patrón de viaje de los clientes las cuales se aplican a un modelo restringido con características propias de este; utilizan el algoritmo Épsilon-restricción (ϵ -*constraint*) y el método Branch and Bound para la solución del problema bi-objetivo en los diferentes niveles y situaciones propuestas.

3.1.2. Revisión de literatura técnica. La revisión de literatura técnica está relacionada con los diversos sistemas de almacenamiento que utilizan las organizaciones para custodiar sus materiales, también en el manejo de mercancías.

BALLOU, Ronald (2004)⁴¹ aborda importantes temáticas logísticas y expone diversas decisiones que se pueden tomar con respecto a la cadena de suministro, el alcance que tiene está en el servicio al cliente y la influencia de los sistemas del transporte en la cadena logística. Describe las estrategias de

⁴⁰ GUTJAHR, Walter. DZUBUR, Nada. Bi-objective bi-level optimization of distribution center locations considering user equilibria. En: *Transportation Research Part E*. 2016. p.1-22.

⁴¹ BALLOU, Ronald. Logística: administración de la cadena de suministro. 5 Ed, Editorial Pearson 2004.

inventario y los métodos para pronosticar los mismos, que además son de suma importancia como información para el cálculo del área de un centro de almacenamiento. En el capítulo 11 (Sistema de almacenamiento y manejo) de la parte IV nombran los diversos métodos que existen para almacenar, los equipos necesarios para el manejo adecuado del producto y hacen un análisis comparativo de los costos y tarifas de los sistemas de almacenamiento. En el capítulo 12 Ballou trata las temáticas de la planificación para el diseño del almacén. La parte V (Estrategia de ubicación), trata algunos problemas como la ubicación de uno o varios almacenes y muestra algunos casos de estudio que ejemplifican estas situaciones.

MORA, Luis Aníbal (2011)⁴² expone las generalidades de los centros de distribución, sus funciones, objetivos y cómo estos han evolucionado a lo largo de los años, habla de las diferentes áreas, equipos y sistemas de almacenamiento implementados en los CEDIs para su correcto funcionamiento según el tipo de operación al que está enfocado. En el capítulo II, (Sistemas de almacenamiento y reabastecimiento) nombran los principales tipos de sistemas de almacenamiento que se utilizan, su clasificación, características y limitaciones. También proporciona un análisis comparativo de los sistemas de almacenamiento para estibas, y un procedimiento general para la selección de estos sistemas según aspectos generales como: requerimientos de estantería, análisis del tamaño, comportamiento del inventario, volumen, forma y peso de las diferentes referencias de productos entre otras. En el capítulo IV (Sistemas de equipos y manejo de materiales), expone y clasifica los equipos que puede tener un CEDIs, según el proceso específico en el que se esté utilizando, (Recepción, almacenamiento, empaque, etc.), establece un procedimiento general para la selección y clasificación de montacargas, y cómo estos influyen en el cálculo de las dimensiones de los pasillos según las características propias del equipo. En la sección 4.3 (sistemas de embalaje y empaque en la gestión de almacenamiento) expone las características de la paletización ventajas y

⁴² MORA, García, Luis, Aníbal. Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes. Ed 1. 2011 Bogotá. Ecoe ediciones.

desventajas, así como los diferentes tipos de estibas usadas en estos.

DIEGO, Luis, Saldarriaga, R (2012)⁴³ realiza una descripción general de los principales aspectos de los centros de distribución como su clasificación, función y objetivos, presenta los diferentes sistemas de almacenamiento y sus características principales, así como los diferentes equipos de manejo de materiales. En el capítulo III (Diseño óptimo de centros de distribución), presenta conceptos y requerimientos que se deben tener en cuenta para emprender un proyecto de localización y construcción de un centro de distribución, así como un procedimiento para hallar el cálculo de la necesidad de área de almacenamiento principal del CEDIs.

⁴³ SALDARRIAGA, R, Luis, Diego. Diseño optimización y gerencia de centros de distribución, almacenar menos distribuir más. Ed. Impresos Begon Ltda. Medellín. Vol. 1. 2012. p. 81-87.

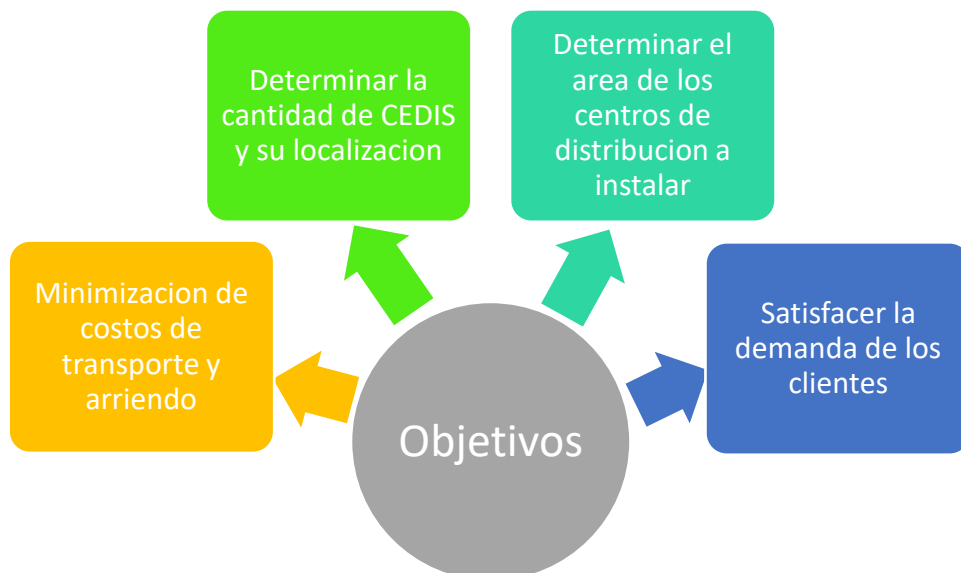
4. FORMULACIÓN Y DESARROLLO DEL MODELO

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

El modelo de localización a desarrollar en este proyecto es discreto, razón por la cual ya se tiene predefinido un conjunto de posibles localizaciones para los CEDIs.

Es un problema de optimización combinatoria el cual tiene como objetivo solucionar el problema de localización de centros de distribución y calcular la capacidad de almacenamiento de los mismos, minimizando los costos de transporte y de arriendo de los CEDIs en una cadena logística de tres eslabones (Planta-CEDIs-Clientes).

Ilustración 15. Objetivos del modelo de localización



El modelo parte del problema de localización de instalaciones capacitadas TSCFLP, en el cual la capacidad de los centros de distribución estará dada por una expresión matemática la cual involucra algunas de las características más importantes de los sistemas de almacenamiento paletizados como: el tipo de

pallet, el peso, la capacidad de apilamiento de los productos y el sistema de transferencia de mercancías (cálculo del factor pasillos) entre otros. Así mismo cada CEDI localizado tendrá una capacidad mínima (metros cuadrados) la cual corresponde a la necesidad de espacio que se requiere para la instalación del sistema de almacenamiento que se esté utilizando.

La demanda de los clientes es satisfecha por un único centro de distribución, garantizando una única ruta de transporte desde el centro de distribución al cliente.

Las plantas o proveedores pueden suplir la demanda solicitada de cualquier centro de distribución y, aunque en el modelo no se considera la capacidad de los proveedores o plantas, estos tienen una disponibilidad limitada de referencias a despachar (no todas las plantas producen las mismas referencias de productos).

Solo se puede instalar un CEDIs en nodo del conjunto de posibles ubicaciones.

4.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

Conjunto de índices

- i Plantas $i = 1, \dots, I$
- j CEDIs $j = 1, \dots, J$ sitios potenciales para los CEDIs
- k Clientes $k = 1, \dots, K$
- p Productos $p = 1, \dots, P$
- t Periodos $t = 1, \dots, T$

Parámetros

- $CT(i, j)$: Costos de transporte por peso del producto $\left(\frac{und}{kg}\right)$ desde la planta i hasta el centro de distribución j .
- $CTT(j, k)$: Costos de transporte por peso del $\left(\frac{und}{kg}\right)$ desde el CEDI j hasta el cliente k .
- $Ca(j)$: Costos de arriendo en la ubicación j por metro cuadrado.
- $D(t, k, p)$: Unidades del producto p que demanda el cliente k en el periodo t .
- $O(i, p)$: Disponibilidad del proveedor i para despachar el producto p .
- $Fe(p)$: Factor estiba, cantidad de productos que se apilan sobre el pallet $\left(\frac{und}{pallet}\right)$.
- $K(p)$: Peso del producto p .
- Ae : Área de la estiba.
- Fp : Factor pasillos.
- Fh : Factor altura.
- B : Capacidad mínima de los centros de distribución
- G : Suma de todos los periodos.

Variables

- $X(p, i, j, t)$: Unidades de producto p a transportar desde la planta i hasta el CEDIs j en el periodo de tiempo t .
- $Y(p, j, k, t)$: Unidades de producto p a transportar desde el CEDI j hasta el cliente k en el periodo de tiempo t .
- $W(j)$: Capacidad (m^2) del centro de distribución j .
- $U(j, k)$: $\left\{ \begin{array}{l} 1: \text{si el cliente } k \text{ es atendido por el CEDI } j \\ 0: \text{de lo contrario} \end{array} \right\}$; Variable binaria de asignación.
- Z : Costo mínimo total.

Función objetivo

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_p^P \sum_i^I \sum_j^J \sum_t^T X(p, i, j, t) * CT(i, j) * k(p) \\
 & + \sum_p^P \sum_j^J \sum_k^K \sum_t^T Y(p, j, k, t) * CTT(j, k) * K(p) \\
 & + G * \sum_j^J W(j) * Ca(j)
 \end{aligned}$$

Restricciones:

$$\sum_i^I X(p, i, j, t) * O(i, p) \geq \sum_k^K D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, t$$

$$Y(p, j, k, t) = D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, k, t$$

$$W(j) \geq \sum_p^P \sum_k^K \left[\frac{D(t, k, p) * U(j, k)}{Fe(p)} \right] * Ae * Fp \quad \forall: j, t$$

$$W(j) \geq B * U(j, k) \quad \forall: k, j$$

$$\sum_j^J U(j, k) = 1 \quad \forall: k$$

4.2.1. Justificación de la función objetivo y restricciones.

- **Función objetivo**

$$\begin{aligned} Z = & \sum_p^P \sum_i^I \sum_j^J \sum_t^T X(p, i, j, t) * CT(i, j) * k(p) \\ & + \sum_p^P \sum_j^J \sum_k^K \sum_t^T Y(p, j, k, t) * CTT(j, k) * K(p) \\ & + G * \sum_j^J W(j) * Ca(j) \end{aligned}$$

La Función objetivo del modelo tiene como fin la minimización de costos, los costos de transporte se obtienen multiplicando la cantidad de unidades a transportar en los tres eslabones (Plantas-CEDIS-Clientes), por los costos unitarios asociados al peso de los productos y a las ubicaciones de los diferentes eslabones (distancias).

El costo de almacenamiento, se obtiene al multiplicar la variable $W(j)$ la cual corresponde a la cantidad de metros cuadrados necesarios para localizar el CEDI j , por el costo de arriendo ($\$/m^2$) de la ubicación j previamente definida, el parámetro G hace referencia a la suma total de periodos en que la función objetivo es evaluada (12).

- **Restricciones cumplimiento de la demanda**

$$\sum_i^I X(p, i, j, t) * O(i, p) \geq \sum_k^K D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, t \quad (1)$$

$$Y(p, j, k, t) = D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, k, t \quad (2)$$

Estas restricciones aseguran que siempre se cubra la demanda del producto p que requiere cada cliente k asignado al CEDI j en el periodo de tiempo t indicado, así mismo aseguran que siempre haya un flujo constante de productos entre los tres eslabones de la cadena de suministro (Plantas-CEDIs-Clientes). (1), $O(i, p)$ señala que no todas las plantas manejan las mismas referencias de productos, razón por la cual el modelo debe seleccionar el proveedor o planta que maneje la referencia demandada para despacharla al centro de distribución j que lo requiere. (2) garantiza que cada producto p que el cliente k demande sea cubierto por el CEDI j asignado.

- **Restricciones de capacidad**

$$W(j) \geq \sum_p^P \sum_k^K \left[\frac{D(t, k, p) * U(j, k)}{\frac{Fe(p)}{Fh}} \right] * Ae * Fp \quad \forall: j, t \quad (1)$$

$$W(j) \geq B * U(j, k) \quad \forall: k, j \quad (2)$$

Con estas restricciones, el modelo calcula la capacidad en m^2 requerida por los CEDIs j a ubicar. (1) involucra los siguientes parámetros para determinar el área:

- La demanda de los clientes asignados al CEDI j por medio de la variable binaria $U(j, k)$.
- Fe (factor estiba), la cantidad de productos p que se pueden apilar en un pallet.
- Fh (factor altura), el número de niveles que maneja el sistema de almacenamiento.
- Ae , el área de la estiba.
- Fp (factor pasillo), % de ocupación de pasillos de acuerdo al sistema de almacenamiento, y al sistema de manejo de mercancía de materiales.

(2) Asegura que el modelo no arroje capacidades m^2 atípicas, multiplicando un parámetro B (el cual hace referencia a los metros cuadrados mínimos que puede tener un CEDIs j), por la variable binaria de asignación $U(j, k)$. Así mismo garantiza que la capacidad mínima del CEDI sea la más adecuada para el sistema de almacenamiento que se esté manejando.

- **Restricción de asignación**

$$\sum_j^J U(j, k) = 1 \quad \forall: k$$

Esta restricción garantiza que cada cliente sea atendido por un único centro de distribución, el cual se encargará de suplir la demanda que el cliente requiera.

4.3. EJECUCIÓN DEL MODELO

Para la solución de problema la localización y cálculo del área de centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones, se utilizó el software GAMS y su solver CPLEX.

Los datos propuestos en el modelo se basan en suposiciones determinísticas, y aunque su obtención se realizó a través de una pseudo aleatoriedad en Microsoft Excel, no se analizan ni se toman en cuenta las distribuciones probabilísticas arrojadas por este software.

En primera instancia para la puesta en marcha del modelo se plantearon los siguientes supuestos:

4.3.1. Demanda. La demanda del cliente es pseudo-aleatoria, se genera a través del software Excel 2016, obteniendo datos entre 0 y 1200, utilizando la formula $=(\text{REDONDEAR}(\text{ALEATORIO}();0))*\text{ALEATORIO.ENTRE}(0;1200)$ la cual permite obtener valores de 0.

4.3.2. Productos y factor estiba. Para determinar este conjunto se tuvo en cuenta las características de algunos productos que se pueden manejar en un CEDI, como su volumen, su peso, capacidad de apilamiento, etc.

Para el cálculo del factor estiba Fe , se estableció que la altura máxima de la carga paletizada (total de productos sobre el pallet) para el sistema de almacenamiento que se está manejando es de 2.6 metros, por lo tanto, el Fe varía de acuerdo a las dimensiones de los productos, a su embalaje y capacidad de apilamiento. (Marco teórico cálculo del factor estiba, pág. 48).

Tabla 3. Tabla de productos

Características de los productos			
Producto	Peso unitario(kg)	Und/caja	Cajas/Pallet
P1	0,40	84	21
P2	94,00	1	1
P3	77,66	1	1
P4	23,00	1	8
P5	10,00	16	16
P6	1,09	24	12
P7	6,99	30	36
P8	1,50	24	120
P9	1,80	72	36
P10	2,00	6	36
P11	6	66	24
P12	13,5	1	60
P13	0,8	1	40
P14	0,6	1	36
P15	0,8	1	25
P16	0,1	1	40
P17	0,8	1	50
P18	1,6	1	36
P19	1,9	24	38
P20	3,5	24	36
P21	0,1	36	36
P22	1,2	25	32
P23	1,9	24	30
P24	3,2	12	40
P25	10	24	32

4.3.3. Plantas. El conjunto plantas se obtuvo a través de datos del DANE⁴⁴ el cual proporciona información demográfica de las ciudades colombianas.

Tabla 4. Conjunto plantas o proveedores.

Ubicación de Plantas	
1	Bogotá
2	Cali
3	Medellín
4	Barranquilla
5	Bucaramanga

4.3.4. Clientes. Al igual que el conjunto Plantas, este se tomó de los datos demográficos proporcionados por el DANE.

Tabla 5. Conjunto clientes.

Clientes	
1	Bogotá
2	Cali
3	Medellín
4	Barranquilla
5	Bucaramanga
6	Cúcuta
7	Ibagué
8	Santa Marta
9	Cartagena
10	Pereira

4.3.5. Posibles ubicaciones de CEDIs. Para determinar el conjunto de las posibles ubicaciones para los CEDIs se seleccionaron siete ciudades de Colombia, que guardaran alguna relación de distancia con el conjunto plantas y

⁴⁴ DANE. Proyecciones de población municipales por área. 2005-2020. Disponible en: www.dane.gov.co. Recuperado en 6 de oct. 2016

clientes, esto con el fin de poder realizar un análisis sobre los resultados obtenidos en el modelo.

Tabla 6. Posibles ubicaciones de los CEDIs.

Posibles Ubicaciones de los CEDIs	
1	Bogotá
2	Cali
3	Medellín
4	Barranquilla
5	Bucaramanga
6	Cúcuta
7	Ibagué

4.3.6. Oferta de productos. Se asumió que no todas las plantas manejan las mismas referencias de productos, para esto el parámetro binario $O(i, p)$ toma valores de 0 y 1 de forma pseudo-aleatoria a través del software Microsoft Excel utilizando la formula =REDONDEAR(ALEATORIO();0). Así, asignando solo ciertos productos de terminadas plantas.

Tabla 7. Oferta de productos por el proveedor o planta i.

O(i,p)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25
Plantas	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
Bogotá	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1
Cali	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
Medellín	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
Barranquilla	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Bucaramanga	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0

4.3.7. Costos de transporte. Estos costos corresponden al peso unitario de los productos por la cantidad a transportar entre los tres eslabones de la cadena de suministro. Para la ejecución del modelo, los costos fueron obtenidos de la empresa de mensajería COORDINADORA MERCANTIL S.A⁴⁵ la cual

⁴⁵ COORDINADORA. Tarifas e información general. <http://www.coordinadora.com/tarifas-e-informacion-general/> [Citado el 30 de septiembre del 2016].

proporciona una tabla de costos ($\$/Kg$) de transporte entre los eslabones de la cadena de suministro (Plantas-CEDIs-Clientes).

Tabla 8. Costos de transporte entre las plantas y los CEDIs.

ORIGEN	CT(i,j) (\$/Kg)	DESTINO						
		Bogota	Cali	Medellin	Barranquilla	Bucaramanga	Cucuta	Ibague
Bogota		247	507	507	830	409	681	286
Cali		507	247	507	830	764	911	342
Medellin		507	507	247	477	477	830	342
Barranquilla		830	507	477	247	570	960	1090
Bucaramanga		830	764	477	570	247	374	729

Tabla 9. Costos de transporte entre las CEDIs y los clientes.

ORIGEN	CTT(j,k) (\$/Kg)	DESTINO									
		Bogotá	Cali	Medellín	Barranquilla	Bucaramanga	Cúcuta	Ibagué	Santa Marta	Cartagena	Pereira
Bogotá		247	507	507	830	409	681	286	1160	862	507
Cali		507	247	507	830	764	911	342	1160	862	477
Medellín		507	507	247	477	477	830	342	764	477	507
Barranquilla		830	507	477	247	570	960	1090	620	286	830
Bucaramanga		830	764	477	570	247	374	729	792	729	729
Cúcuta		681	911	830	960	374	247	960	1120	950	950
Ibagué		286	342	342	1090	729	960	247	1160	890	310

4.3.8. Costos de almacenamiento. Estos corresponden al precio de arriendo por metro cuadrado ocupado en la posible ubicación del CEDI j , los costos fueron obtenidos promediando los diferentes precios de arriendo para cada ciudad a través de consultas y cotizaciones telefónicas y vía web.

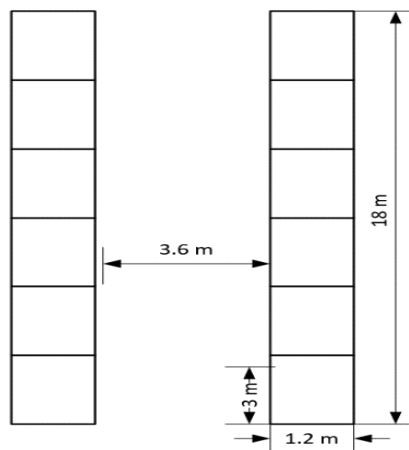
Tabla 10. Costos de arriendo por metro cuadrado la ubicación j .

Costos de arriendo		
CA(j) (\$/m ²)	Ciudad/Municipio	Costo (\$)
1	Bogotá	\$ 19.000
2	Cali	\$ 11.000
3	Medellín	\$ 18.500
4	Barranquilla	\$ 13.500
5	Bucaramanga	\$ 12.000
6	Cúcuta	\$ 7.500
7	Ibagué	\$ 10.000

4.3.9. Capacidad mínima del CEDIs. Para determinar la capacidad mínima del CEDI j , se le asignó al parámetro β un valor de 500 metros cuadrados, este valor cambia de acuerdo al tipo de mercancía que se maneje, al sistema de almacenamiento, o a los requisitos mínimos de espacio para el correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento, entre otros.

4.3.10. Sistema de almacenamiento. En primera instancia para el cálculo del área de almacenamiento, se escogió un sistema de estanterías paletizadas convencionales con las siguientes características:

Ilustración 16. Sistema de Rack Selectivo.



- Estantería: 2.4 m
- Pasillos: 3.6 m
- Total: 6 m
- % Pasillos: 60%
- % Almacenamiento: 40%

El factor pasillo fp corresponde al porcentaje de ocupación que estos tienen de acuerdo al sistema de manejo de mercancías o sistema de almacenamiento, para este ejercicio se necesita una distancia de 3.6 metros entre estanterías ya que se utiliza un montacargas el cual requiere un espacio de 3.6 metros para el óptimo manejo de la mercancía, este espacio requerido representa el 60% del área de almacenaje, por lo tanto, el $fp = 1.6$.

El Factor altura Fh , el cual corresponde al número de niveles que tiene la estantería es de 6. (La altura entre estantes de 3 metros para el almacenamiento de mercancía en carga unitarizada).

Al área de la estiba Ae corresponde a un pallet convencional para cargas multiproducto con unas dimensiones de $1.2m * 1m$.

4.3.11. Compilación del modelo en GAMS. En el software GAMS, se definieron los bloques (conjuntos, parámetros, variables y ecuaciones) y una serie de iteraciones entre los bloques, para la solución del problema lineal entero mixto planteado.

Las imágenes mostradas a continuación corresponden a la compilación del modelo de optimización en GAMS, estas no muestran la totalidad de los datos (anexo A).

Ilustración 17. Definición del bloque SET y VARIABLES del modelo matemático en GAMS.

```

SET
i Plantas /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Bmanga/
j Posibles lugares CEDIS /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Bmanga,Cucuta,Ibague/
k Clientes /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Bmanga,Cucuta,Ibague,Smarta,Cartagena,Pereira/
t Periodos /T1*T12/
p Productos /P1*P25/

VARIABLES
X(p,i,j,t) Unidades de producto P a transportar desde la planta I hasta el CEDIS J en el periodo T
Y(p,j,k,t) Unidades de producto P a transportar desde el CEDIS J hasta el cliente k en el periodo T
U(j,k) Variable binaria para asignar un CEDIS a cliente
W(j) Capacidad requerida del CEDIS J en metros cuadrados
Z Costo minimo total;

POSITIVE VARIABLES X,W,Y;
BINARY VARIABLES U;
    
```

Ilustración 18. Definición del bloque TABLAS del modelo matemático en GAMS.

TABLE O(I,P) OFERTA

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13
Bogota	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
Cali	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
Medellin	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Bquilla	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0
Bmanga	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1

TABLE CT(i,j) COSTOS DE TRANSPORTE DESDE LA PLANTA i A LA POSIBLE UBICACION DEL CEDIS j

	Bogota	Cali	Medellin	Bquilla	Bmanga	Cucuta	Ibague
Bogota	247	507	507	830	409	681	286
Cali	507	247	507	830	764	911	342
Medellin	507	507	247	477	477	830	342
Bquilla	830	507	477	247	570	960	1090
Bmanga	830	764	477	570	247	374	729;

TABLE CIT(j,k) COSTOS DE TRANSPORTE DESDE LA POSIBLE UBICACION DEL CEDIS HASTA EL CLIENTE

	bogota	Cali	Medellin	Bquilla	Bmanga	Cucuta	Ibague	Smarta	Cartagena	Pereira
bogota	247	507	507	830	409	681	286	1160	862	507
cali	507	247	507	830	764	911	345	1160	862	477
medellin	507	507	247	477	477	830	342	764	477	507
bquilla	830	570	477	247	570	960	1090	620	286	830
bmanga	830	764	477	570	247	374	729	792	729	729
cucuta	681	911	830	960	374	247	960	1120	950	950
ibague	286	342	342	1090	729	960	247	1160	890	310 ;

TABLE D(t,k,p) DEMANDA

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12
T1.bogota	120	0	0	908	947	874	0	307	168	0	0	288
T1.cali	150	0	713	0	812	514	316	0	0	0	0	610
T1.medellin	170	0	461	0	373	0	624	0	17	504	0	860
T1.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	308	0	892	0
T1.bmanga	145	0	859	110	492	732	585	954	0	0	0	0
T1.cucuta	150	0	988	0	434	3	0	427	0	879	799	0
T1.ibague	200	110	829	0	468	305	0	486	219	773	768	0
T1.smartha	130	100	0	550	0	345	363	0	0	0	0	750
T1.cartagena	0	0	408	0	0	488	885	0	5	650	0	0
T1.pereira	0	710	0	0	863	692	600	0	0	245	0	916
T2.bogota	860	0	0	660	488	722	0	440	23	0	0	395
T2.cali	794	0	416	0	581	898	53	0	0	0	571	0
T2.medellin	710	0	175	0	258	0	959	0	806	736	0	228
T2.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	442	0	727	0
T2.bmanga	792	0	470	630	490	828	172	453	0	0	0	0
T2.cucuta	598	0	221	0	702	124	0	563	0	732	175	0
T2.ibague	430	380	129	0	506	1000	0	109	4	823	761	0
T2.smartha	659	340	0	655	0	287	65	0	0	0	0	281
T2.cartagena	0	0	828	0	0	103	906	0	3	704	0	0
T2.pereira	0	400	0	0	840	99	535	0	0	859	0	578

Ilustración 19. Definición del bloque PARAMETERS del modelo matemático en GAMS.

```

PARAMETERS
CA(j)      COSTO MENSUAL DE ARRIENDO POR METRO CUBICO EN J      /Bogota      11000
                                                    Cali          12500
                                                    Medellin      13000
                                                    Bquilla      12700
                                                    Bmanga       12800
                                                    Cucuta       7500
                                                    Ibague       10000 /
Fe(p)      CANTIDAD DE PRODUCTOS QUE SE APILAN EN EL PALLET    /p1          21
                                                    p2           1
                                                    p3           1
                                                    p4           8
                                                    p5          16
                                                    p6          12
                                                    p7          36
                                                    p8          120

K1(p)      PESO EN KILOGRAMOS DEL PRODUCTO P                    /p1          0.40
                                                    p2           94
                                                    p3          77.66
                                                    p4           23
                                                    p5           10
                                                    p6           1.09
                                                    p7           6.99
                                                    p8           1.5

FP FACTOR PASILLO (ADIMENCIONAL)/1.6/
FH FACTOR ALTURA (ADIMENCIONAL)/6/
AE AREA DE LA ESTIBA (M^2)/1.2/
B CAPACIDAD MINIMA DEL CEDIS /500/;

```

Ilustración 20. Definición del bloque EQUATIONS del modelo matemático en GAMS.

```

EQUATIONS
Costo Funcion minimizacion de los costos.
Capacidad(j,t) Capacidad de cada centro de distribucion
Asignacion(k) Variable binaria de asignacion
Flujo1(t,p,j) Cumplimiento de la demanda - Planta-CEDIs
Flujo2(j,k,t,p) Cumplimiento de la demanda - CEDIs-Cliente
Centro(j,k) Capacidad minima del centro de distribucion;

costo.. Z=E=SUM((p,i,j,t),X(p,i,j,t)*K1(p)*CT(i,j))+SUM((p,j,k,t),Y(p,j,k,t))
flujo1(t,p,j).. SUM(i,X(p,i,j,t)*O(i,p)) =G= SUM(k,D(t,k,p)*U(j,k));
flujo2(j,k,t,p).. Y(p,j,k,t) =e= D(t,k,p)*U(j,k);
asignacion(k).. SUM(j,U(j,k)) =E= 1;
capacidad(j,t).. W(j) =G= SUM((p,k),(D(t,k,p)*U(j,k)/(Fe(p))/(FH))*AE*FP);
centro(j,k).. W(j) =G= B*U(j,k);

```

Ilustración 21. Definición del bloque SOLVE del modelo matemático en GAMS.

```
MODEL TUFLP /ALL/;  
SOLVE TUFLP USING MIP MINIMIZING Z;
```

4.3.12. Resultados. Una vez ejecutado el modelo matemático en GAMS y por medio de su solver CPLEX fueron obtenidos los siguientes resultados:

Tabla 11. Resultados del modelo matemático en GAMS.

Localización de los CEDIs	Capacidad del CEDIs (Wj)	Clientes asignados a los CEDIs (Ujk)
Medellín	939,382	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena
Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta
Ibagué	1177,989	Bogotá, Cali, Pereira, Ibagué

La ejecución del programa tuvo un tiempo de procesamiento de 0.265 segundos, obteniendo un costo anual de \$ 5.3842 x e⁹ (anexo B).

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1. Análisis de la localización de los CEDIs. Con los datos arrojados por el modelo se puede observar que este eligió localizar los CEDIs en las ciudades de Medellín, Bucaramanga e Ibagué, asignando un respectivo grupo de clientes a cada CEDI para atender la demanda de estos (tabla 11).

Tabla 12. Análisis de costos CEDIs – Clientes.

ORIGEN	CTT(j,k) (\$/Kg)	DESTINO								
		Bogotá	Cali	Medellín	Barranquilla	Bucaramanga	Cúcuta	Ibagué	Santa Marta	Cartagena
Bogotá	247	507	507	830	409	681	286	1160	862	507
Cali	507	247	507	830	764	911	342	1160	862	477
Medellín	507	507	247	477	477	830	342	764	477	507
Barranquilla	830	507	477	247	570	960	1090	620	286	830
Bucaramanga	830	764	477	570	247	374	729	792	729	729
Cúcuta	681	911	830	960	374	247	960	1120	950	950
Ibagué	286	342	342	1090	729	960	247	1160	890	310

Se observó que dos de los CEDIs están ubicados en ciudades donde se encuentra instalada una planta y una demanda por atender (clientes), esto se debe a que el costo de transporte dentro de una misma localización es más bajo que el transportar a otra ciudad. Ibagué, por el contrario, no posee una planta o proveedor, pero los costos de transporte de esta ciudad a sus clientes asignados en Cali, Bogotá y Pereira son los más bajos (tabla 12).

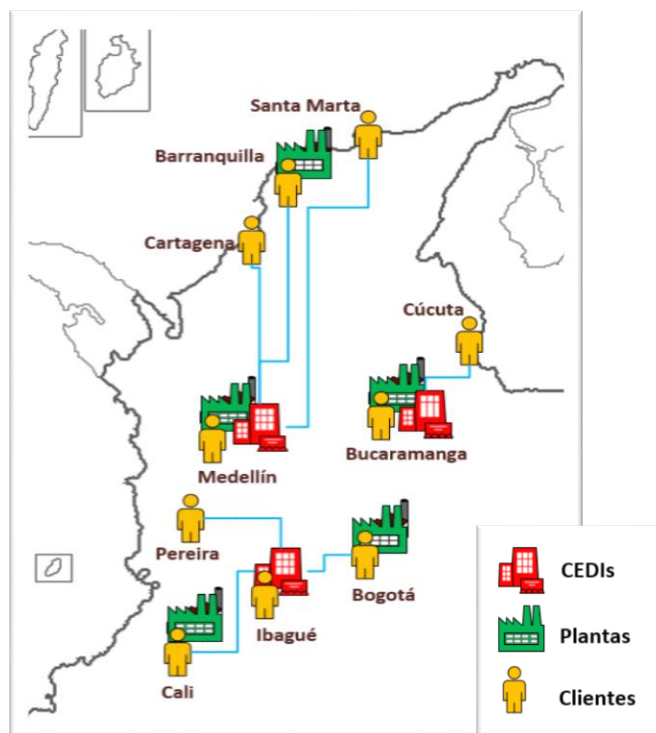
Por otra parte, mediante las tablas 12 y 13, se pudo analizar que el modelo minimiza tanto los costos de transporte como de arriendo, relacionando estos para determinar la ubicación y la capacidad de los CEDIs bajo la premisa de obtener el menor costo posible.

Tabla 13. Análisis costos de arriendo en la ubicación j.

Costos de arriendo		
CA(j) (\$/m ²)	Ciudad/Municipio	Costo (\$)
1	Cúcuta	\$ 7.500
2	Ibagué	\$ 10.000
3	Cali	\$ 11.000
4	Bucaramanga	\$ 12.000
5	Barranquilla	\$ 13.500
6	Medellín	\$ 18.500
7	Bogotá	\$ 19.000

Aunque el modelo de optimización propuesto para la localización de centros de distribución no tiene en cuenta las distancias recorridas entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro, los costos de transporte implícitamente representan las distancias entre las ubicaciones establecidas, ya que en su mayoría estos costos son establecidos por el peso unitario y trayectoria recorrida de la carga (ilustración 22).

Ilustración 22. Localización y asignación de clientes a los CEDIs.



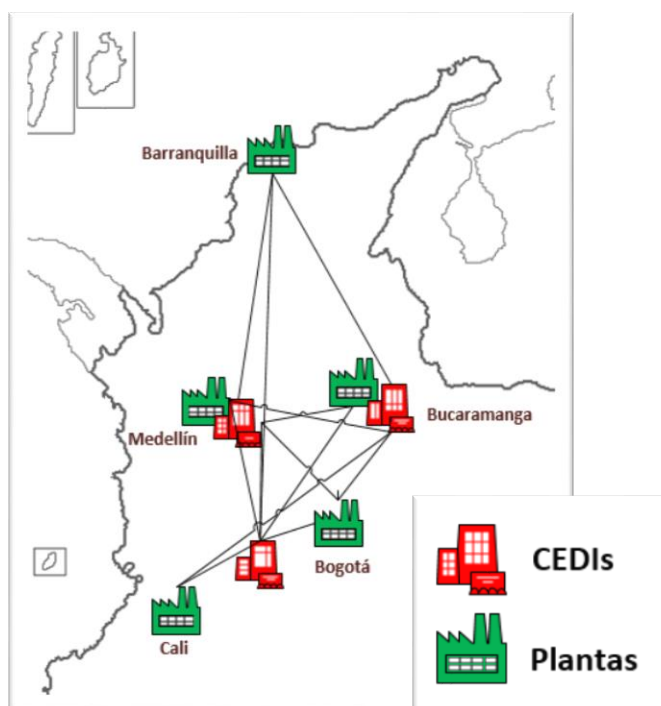
4.4.2. Análisis de demanda. A partir de una comprobación manual del modelo matemático, sumando los envíos por periodo de los productos demandados entre los tres eslabones de la cadena de suministro, se comprobó que el modelo solo envía los productos demandados por los clientes en el periodo de tiempo que lo requieren (tabla 14).

Tabla 14. Cumplimiento de la demanda por periodo para el producto P1.

Periodos	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
Demanda	1065	4843	1535	2589	2194	1332	2352	2010	4150	2190	4422	1545
X(p,i,j,t)	1065	4843	1535	2589	2194	1332	2352	2010	4150	2190	4422	1545
Y(p,j,k,t)	1065	4843	1535	2589	2194	1332	2352	2010	4150	2190	4422	1545

Por otra parte, también se comprobó que todas las plantas suplen a los centros de distribución, esto quiere decir que todas las plantas pueden enviar productos a todos los CEDIs que lo requieran, siempre y cuando la planta fabrique o comercialice el producto demandado (Ilustración 23).

Ilustración 23. Cubrimiento de la demanda, Plantas-CEDIs.



4.4.3. Análisis de la capacidad. Para analizar la capacidad arrojada por el modelo se tabulan periodo a periodo los datos del CEDI Bucaramanga (tabla 15).

Tabla 15. Capacidad por periodo CEDI Bucaramanga.

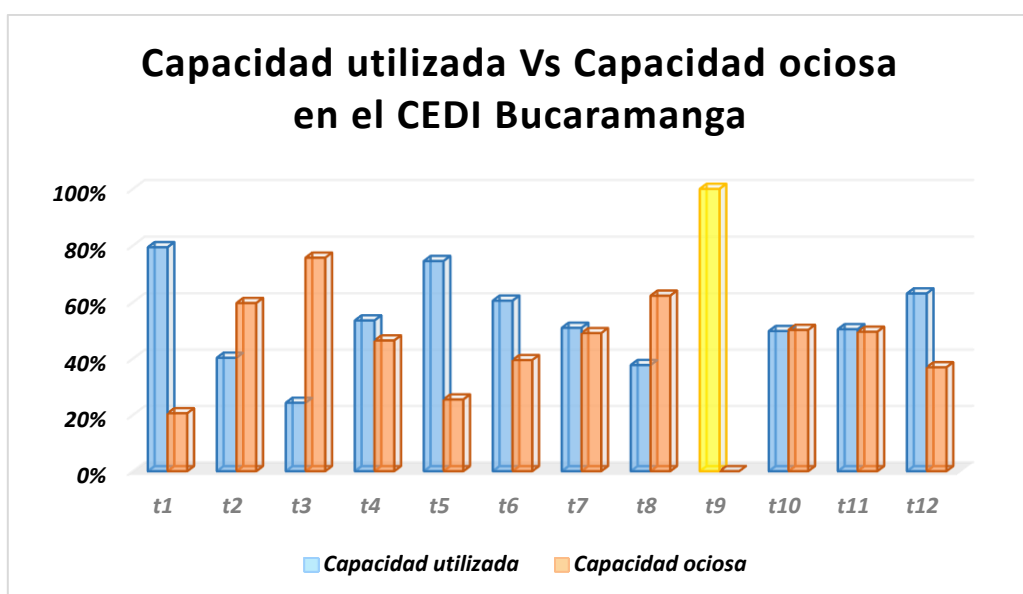
Análisis de capacidad del CEDI Bucaramanga en el periodo t		
Periodos	Capacidad m^2	Demanda
t1	719,629	1065
t2	365,313	4843
t3	220,275	1535
t4	4850315	2589
t5	674,407	2194
t6	548,593	1332
t7	561,646	2352
t8	341,85	2010
t9	906,328	4150
t10	451,896	2190
t11	457,297	4422
t12	571,652	1545

Como se puede observar en la tabla 15, las demandas más altas se encuentran en los periodos 2, 9 y 11, sin embargo la capacidad arrojada por el modelo para el CEDI Bucaramanga (906.328) corresponde a la tercera demanda más alta (periodo 9), esto se debe a que el modelo no solo determina la capacidad del CEDI de acuerdo a la demanda más alta en los periodos evaluados, sino que también involucra los volúmenes de los productos traducidos a factor estiba. Esto quiere decir que a mayor volumen del producto menor factor estiba (unidades sobre pallet), por lo tanto los productos demandados en el periodo 9 para el CEDI Bucaramanga tienen mayor volumen que los demás, dando como resultado una mayor capacidad. Este resultado se debe a la misma fórmula para el cálculo del área el cual divide la demanda del cliente por producto asignado al CEDI sobre el factor estiba.

Cabe resaltar que para el cálculo de la capacidad del CEDI, además de la demanda y el factor estiba, se involucran las características del sistema de almacenamiento como los niveles de la estantería, entre otras.

4.4.4. Análisis de capacidad ociosa. Como se ha dicho anteriormente en el apartado 4.4.3, la capacidad de cada CEDI está dada por características específicas que se involucran en las restricciones de capacidad escritas en el modelo de optimización en GAMS, pero estas capacidades varían periodo a periodo, por lo tanto, por medio de la siguiente ilustración se analizarán estas variaciones de capacidad.

Ilustración 24. Capacidad utilizada vs capacidad ociosa en el CEDI Bucaramanga.



Se puede observar que la capacidad del CEDI Bucaramanga corresponde al periodo 9, y que en los demás periodos se presentan capacidades ociosas que varían dependiendo de la demanda para ese periodo y de las características de los productos demandados, por ejemplo, en el periodo *t3* se encontró que el CEDI tiene una capacidad ociosa del 76% presentando el mayor desperdicio de capacidad en los periodos evaluados. En el periodo 2 y 11 se presentan las demandas de productos más altas para el CEDI Bucaramanga (tabla 15), pero asimismo presentan capacidades ociosas del 60% y 50% respectivamente, esto debido a que los productos demandados tienen un mayor factor estiba, por lo tanto, un menor volumen.

En total se presenta para el CEDI Bucaramanga un desperdicio anual de 4671,303 metros cuadrados

4.5. PLANTEAMIENTO DE CASOS

En este apartado se plantean diferentes casos en los cuales se varían los datos de entrada en el modelo planteado, esto con el fin de poder analizar el comportamiento de los resultados. Para los casos planteados, se mantienen los datos con los que se ejecutó el modelo original y solo son alterados los datos referentes al caso planteado.

4.5.1. Casos de demanda. Se plantean tres casos en los que el comportamiento de la demanda varía de acuerdo a las siguientes características.

Tabla 16. Descripción variaciones de demanda.

N°	Casos de demanda	Descripción
1	Demanda uniforme	La demanda tiene un comportamiento uniforme, los datos varían entre 800 y 1000 unidades de productos en cada periodo.
2	Demanda irregular	En algunos periodos se presentan demandas muy elevadas en comparación con las demás.
3	Demanda concentrada	La demanda de productos se concentra en algunos periodos.

Para cada caso, se realizan diversas pruebas en las cuales cambian los datos de entrada, esto con el fin de analizar detalladamente los resultados arrojados por el modelo.

Resultados de los casos de demanda:

Tabla 17. Resultados casos de demanda.

Casos	Prueba	Resultados				
		Numero de CEDIs	Localización	Capacidad Wj	Asignación Ujk	
Demanda uniforme	1	6	Bogotá	862,487	Bogotá	
			Cali	868,072	Cali	
			Medellín	1688,243	Medellín, Santa Marta	
			Barranquilla	1670	Barranquilla, Cartagena	
			Bucaramanga	1695,924	Bucaramanga, Cúcuta	
			Ibagué	1687,37	Ibagué, Pereira	
Demanda irregular	1	5	Bogotá	641,309	Bogotá	
			Medellín	928,724	Medellín, Cartagena	
			Barranquilla	500	Barranquilla	
			Bucaramanga	1958,835	Bucaramanga, Cúcuta, Santa Marta	
			Ibagué	1596,686	Ibagué, Pereira, Cali	
	2	5	Cali	598,369	Cali	
			Medellín	928,724	Medellín, Cartagena	
			Barranquilla	500	Barranquilla	
			Bucaramanga	1958,835	Bucaramanga, Cúcuta, Santa Marta	
	3	4	Ibagué	1393,564	Ibagué, Bogotá, Pereira	
			Medellín	1093,495	Medellín, Cartagena	
			Barranquilla	731,942	Barranquilla, Santa Marta	
			Bucaramanga	1167,615	Bucaramanga, Cúcuta	
			Ibagué	1635,699	Pereira, Bogotá, Cali, Pereira	
Demanda concentrada	A	1	6	Bogotá	609,128	Bogotá
				Medellín	1432,072	Medellín, Santa Marta
				Barranquilla	1128,082	Barranquilla, Cartagena
				Bucaramanga	589,131	Bucaramanga
				Cúcuta	815,946	Cúcuta
				Ibagué	1868,297	Ibagué, Cali, Pereira
	2	4	Medellín	1075,553	Medellín, Santa Marta	
			Barranquilla	677,266	Barranquilla, Cartagena	
			Bucaramanga	1357,991	Bucaramanga, Cúcuta	
				Ibagué	2321,545	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira
	B	1	6	Bogotá	504,94	Bogotá
				Medellín	1440,155	Medellín, Santa Marta
Barranquilla				1010,508	Barranquilla, Cartagena	
Bucaramanga				592,324	Bucaramanga	
Cúcuta				825,012	Cúcuta	
				Ibagué	1584,382	Cali, Ibagué, Pereira
2		6	Bogotá	884,981	Bogotá	
			Medellín	500	Medellín, Santa Marta	
			Barranquilla	1086,998	Barranquilla, Cartagena	
	Bucaramanga		924,747	Bucaramanga		
			Cúcuta	511,344	Cúcuta	
			Ibagué	1072,737	Cali, Ibagué, Pereira	

En el primer caso, las demandas de los diferentes clientes k varían entre las 800 y 1000 unidades de productos en todos los periodos t evaluados, dando como resultado aperturas de centros de distribución en casi todos los lugares donde

ya se encuentran localizadas plantas o proveedores. Esto se debe a que los volúmenes de productos a transportar y almacenar son tan altos, que el localizar un centro de distribución en una ciudad en donde no haya un proveedor o planta supondría un aumento considerable en los costos de transporte.

En el segundo caso, donde las demandas son irregulares, y varían de tal forma, que no es posible descifrar algún comportamiento de esta para un periodo específico, los datos varían entre 0-100-500, 0-500-700, 0-700-1200 unidades de producto en todos los periodos t , dando como resultado la apertura de diferentes CEDIs según la prueba realizada. También se puede observar que en las pruebas 1 y 2 en el CEDI Barranquilla la capacidad dada por el modelo es de 500 metros cuadrados, esto se debe a que el volumen de demanda asignada al CEDI es tan bajo, que la restricción de capacidad mínima asigna ese valor.

Para el tercer caso se plantearon dos sub-casos, cada uno con dos pruebas: caso A, alta demanda en los periodos 6,7 y 12 y caso B, con alta demanda en los periodos 6 y 12. La razón de agregar el periodo 7 en el caso A, fue observar qué cambios se producían en los resultados con respecto al caso B.

Caso A: En los periodos de demanda baja, la demanda solo fluctúa entre 0 y 400 unidades y, a pesar de esta baja demanda, el modelo escogió abrir más CEDIs con una capacidad considerablemente mayor. Para la prueba 1 se abrieron 6 centros de distribución y para la prueba 2 se abrieron 4. La diferencia de dos CEDIs se debe a que altas demandas se concentraron en determinadas ubicaciones lo que provocó la apertura de 2 CEDIs menos.

Caso B: En este caso, se abrieron 6 CEDIs en las dos pruebas, en las mismas ciudades y con las mismas asignaciones.

Tabla 18. Capacidades totales de los casos A y B de Demanda Concentrada.

Demanda concentrada			
Caso	Prueba	No. CEDIs	Capacidad total
A	1	6	6442,656
	2	4	5432,355
B	1	6	5957,321
	2	6	4980,807

Como se puede observar en la prueba 1 del Caso A, solo se abren 4 CEDIs siendo la capacidad total de estos, superior a la prueba 2 del Caso B, esto quiere decir que la variación de datos generada por el software Microsoft Excel, concentró valores de demandas en determinadas ciudades dando como resultado la apertura de menos centros de distribución.

4.5.2. Casos de oferta. Se plantearon diversas situaciones en donde las plantas o proveedores comercializan o fabrican sus productos según las características propias de estos, por ejemplo: el caso 1 corresponde a todas las plantas o proveedores que tienen una oferta ilimitada de productos, esto quiere decir que todas ellas fabrican o comercializan todos los productos que el cliente requiere.

En el caso 2 (oferta exclusiva), cada producto es fabricado o comercializado por un único proveedor o planta.

En el caso 3 (familia de productos), las plantas o proveedores fabrican o comercializan determinados grupos de productos.

La siguiente tabla muestra los casos de oferta planteados, es una tabla binaria, en donde 1, significa que el producto es fabricado por la planta y 0, todo lo contrario.

Tabla 19. Variaciones de oferta de productos.

Casos	O(i,p)	CASOS DE OFERTA DE PRODUCTOS																								
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25
Oferta ilimitada	Bogotá	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Cali	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Medellín	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Barranquilla	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Bucaramanga	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Oferta exclusiva	1	Bogotá	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Cali	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Medellín	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Barranquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
		Bucaramanga	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	2	Bogotá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Cali	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Medellín	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
		Bucaramanga	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	Bogotá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
		Cali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Medellín	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
		Barranquilla	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Bucaramanga	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Oferta por familia de productos	1	Bogotá	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Cali			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	
Medellín			0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	
Bucaramanga			1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	
2		Bogotá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
		Cali	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	
		Medellín	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	
		Barranquilla	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Bucaramanga	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Resultados de los casos de oferta:

Tabla 20. Resultados casos de oferta.

Casos	Prueba	Resultados			
		Numero de CEDIs	Localización	Capacidad (Wj) m ²	Asignación (Ujk)
Oferta ilimitada	1	7	Bogotá	725,045	Bogotá, Ibagué
			Cali	500	Cali
			Medellín	500	Medellín
			Barranquilla	757,192	Barranquilla, Santa Marta, Cartagena
			Bucaramanga	500	Bucaramanga
			Cúcuta	876,813	Cúcuta
			Ibagué	500	Pereira
Oferta Exclusiva	1	3	Medellín	591,219	Medellín, Barranquilla, Cartagena,
			Bucaramanga	1249,837	Bucaramanga, Cúcuta, Santa Marta
			Ibagué	1177,989	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira
	2	4	Cali	787,633	Cali, Ibagué
			Medellín	939,382	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena
			Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta
			Ibagué	518,586	Bogotá, Pereira
	3	5	Medellín	883,809	Medellín, Cali, Ibagué
			Barranquilla	500	Barranquilla, Cartagena
			Bucaramanga	729,133	Bucaramanga, Santa Marta
Cúcuta			576,813	Cúcuta	
Ibagué			518,586	Bogotá, Cúcuta	
Oferta por familia de producto	1	4	Barranquilla	500	Barranquilla, Cartagena
			Bucaramanga	729,133	Bucaramanga, Santa Marta
			Cúcuta	576,813	Cúcuta
			Ibagué	1352,586	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira, Medellín
	2	4	Medellín	603,402	Medellín, Santa Marta
			Barranquilla	500	Barranquilla, Cartagena
			Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta
			Ibagué	1177,989	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira

En el caso 1 (Oferta ilimitada), se observa que el modelo elige ubicar los centros de distribución en todas las posibles ubicaciones del conjunto CEDIs, estas aperturas se deben a que los conjuntos: plantas, CEDIs y clientes comparten las mismas ubicaciones, y los costos de transporte dentro de una misma ciudad son más bajos que transportar a otra ciudad. Es por esto que en su mayoría cada CEDI atiende la demanda de su misma localización a excepción de los CEDIs Bogotá y Barranquilla que atienden la demanda de su propia localización y ciudades aledañas. Ibagué atiende la demanda de Pereira, ya que Ibagué no tiene una planta o proveedor en su ubicación.

En el caso 2 (oferta exclusiva), la localización de los CEDIs está sujeta a la demanda de los clientes y a la oferta de las plantas, (cada producto es fabricado o comercializado por una única planta). Como se observa en la prueba 1 el modelo asigna solo tres centros de distribución ya que, por el tipo de oferta, el costo de ubicar otro centro de distribución aumentaría los costos de transporte y de arriendo.

En el caso 3, se realizaron dos pruebas en las que varían las ofertas de las familias de productos; cada familia consta de 5 productos. Para las dos pruebas se obtuvieron resultados similares, 4 CEDIs abiertos con asignaciones y capacidades muy parecidas, la principal diferencia radica en que la primera prueba abrió un CEDI en Cúcuta, y la segunda cambió esta ubicación por Medellín. En la primera prueba no se abrió el CEDI Medellín ya que el modelo asignó a Ibagué como CEDI para atender las demandas de cuatro ciudades: Cali, Bogotá y Medellín e Ibagué y que a Bucaramanga se le asignó Santa Marta debido a la oferta de productos de Bucaramanga que corresponde a 3 familias de productos. En la segunda prueba, se abre el CEDI Medellín y a este se le asignan las ciudades de Medellín y Santa Marta, a Bucaramanga se le asigna Cúcuta.

A partir de los datos obtenidos, se puede afirmar que el modelo ubica los CEDIs de manera que puedan aprovechar al máximo la oferta de las plantas más cercanas siempre y cuando estas manejen el producto que el o los clientes demanden al CEDI asignado.

4.5.3. Casos de variación de costos de arriendo. Para el análisis de los costos de arriendo se realizaron las siguientes variaciones:

Tabla 21. Descripción casos de costos de arriendo.

Prueba	Casos	Características
1	Tarifas similares	La variación de los costos de arriendo es más baja que en los datos originales.
2	Tarifas dispersas	Los costos de arriendo difieren significativamente unos de los otros.
3	tarifas iguales	Los costos de instalación en cualquier parte del país son los mismos, algunos presentan costos muy bajos, intermedios y otros muy elevados.

Resultados de los casos de variación de arriendo:

Tabla 22. Resultados de los de costos de arriendo

Casos	Costo de arriendo (Ca)	Prueba	Resultados					
			Número de CEDIs	Localización	Capacidad (Wj) m ²	Asignación (Ujk)		
Tarifas similares	≥\$9071 <\$17071	1	3	Medellín	591,22	Medellín, Barranquilla, Cartagena		
				Bucaramanga	1249,84	Bucaramanga, Cúcuta, Santa Marta		
				Ibagué	1177,99	Ibagué, Pereira, Bogotá, Cali		
		2	4	Medellín	500,00	Medellín		
				Barranquilla	757,19	Barranquilla, Cartagena, Santa Marta		
				Bucaramanga	906,38	Bucaramanga, Cúcuta		
		3	4	Ibagué	1177,99	Ibagué, Pereira, Bogotá, Cali		
				Medellín	500,00	Medellín		
				Barranquilla	757,19	Barranquilla, Cartagena, Santa Marta		
		Tarifas dispersas	≥\$4071 <\$22071	1	4	Bucaramanga	906,38	Bucaramanga, Cúcuta
						Ibagué	1177,99	Ibagué, Pereira, Bogotá, Cali
						Medellín	500,00	Medellín
Barranquilla	757,19					Barranquilla, Cartagena, Santa Marta		
2	3			Bogotá	940,46	Bogotá, Bucaramanga, Ibagué		
				Medellín	939,38	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
				Bucaramanga	576,81	Cúcuta		
3	6			Ibagué	638,668	Cali, Pereira		
				Medellín	939,382	Medellín, Barranquilla, Cartagena, Santa Marta		
				Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	1177,989	Ibagué, Pereira, Bogotá, Cali		
				Bogotá	725,045	Bogotá, Ibagué		
Tarifas iguales	\$13.071	1	3	Cali	500	Cali		
				Medellín	500	Medellín		
				Barranquilla	757,192	Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
	\$6.536	2	3	Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	1177,989	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
				Medellín	939,386	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
	\$261.430	3	1	Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	1177,989	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
				Bogotá	2552,303	Bogotá, Medellín, Cali, Ibagué, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta, Cúcuta, Pereira, Cartagena		

Caso 1: los costos de arriendo son similares y debido a esto se producen resultados muy parecidos para las tres pruebas realizadas. En la segunda y tercera prueba se obtuvieron datos exactamente iguales en ubicaciones y capacidad. En la primera prueba se abrió un CEDI menos, no se abrió el CEDI Barranquilla y sus clientes asignados en las otras pruebas fueron repartidos entre los CEDIs Medellín y Bucaramanga.

En el caso 2, (costos dispersos), los resultados son diferentes para las tres pruebas realizadas, la cantidad de CEDIs abiertos y las capacidades de cada uno fluctúan de acuerdo a la variación de la demanda y de los costos de arriendo; en la tercera prueba se abrieron CEDIs en todas las ubicaciones posibles debido a los bajos costos de arriendo en la mayoría de ubicaciones.

En el caso 3 (Tarifas iguales), el modelo siempre elige las mismas ubicaciones y asignaciones en las pruebas 1 y 2, esto se debe a que son más altos los costos de transporte que los de arriendo, entonces el modelo elige localizar los CEDIs donde el transportar productos a sus respectivos clientes tenga el menor costo posible.

De igual manera en la prueba 3, cuando los costos de arriendo son excesivamente altos, el modelo elige localizar un solo centro de distribución, en donde el despachar productos a los clientes tengan el menor costo de transporte. La localización del CEDI Bogotá como se puede observar en la ilustración 22 se debe a que los costos de transporte como se ha dicho anteriormente guardan una relación de costos/distancia, y esta ubicación al ser la más centrada en el mapa colombiano, presenta los costos de transporte más bajos.

4.5.4. Casos de variación del sistema de almacenamiento. En este análisis se contemplan algunos sistemas de almacenamiento paletizados, los cuales corresponden a un factor muy importante en el modelo propuesto, ya que dependiendo del sistema que se utilice, varía la capacidad del CEDI a ubicar y a su vez los costos de arriendo.

Los datos propuestos en estos casos no son definitivos, estos dependen de las características propias de una empresa, como los tipos de productos que manejan, el tipo de sistema de manejo de mercancías, entre otras.

Tabla 23. Sistemas de almacenamiento

Sistema de almacenamiento	Factor altura (Fh)	Factor pasillos (Fp)	Área estiba (Ae) m²
Selectivo de profundidad sencilla	5 o 7 niveles	1,6	1,2
Selectivo de doble profundidad	5 o 7 niveles	1,36	1,2
Selectivo de pasillo súper angosto	7 o 9 niveles	1,43	1,2
Drive in	6 niveles	1,27	1,2
Drive in pasillo angosto	6 niveles	1,2	1,2

Resultados de los casos de almacenamiento:

Tabla 24. Resultados de la variación de sistemas de almacenamiento

Sistema de almacenamiento	Prueba	Factor altura (Fh)	Factor pasillos (Fp)	Resultados				
				Numero de CEDIs	Localización	Capacidad (Wj) m ²	Asignación (Ujk)	
Almacenes con estanterías	Selectivo Profundidad Sencilla	5	1,6	4	Medellín	724,082	Medellín, Santa Marta	
					Barranquilla	500	Barranquilla, Cartagena	
					Bucaramanga	1087,594	Bucaramanga, Cúcuta	
		Ibagué		1413,586	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira			
		7		3	Medellín	805,184	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena	
					Bucaramanga	776,853	Bucaramanga, Cúcuta	
	Ibagué		1009,704		Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira			
	Selectivo doble profundidad	5	1,36	3	Medellín	958,169	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena	
					Bucaramanga	924,455	Bucaramanga, Cúcuta	
					Ibagué	1201,584	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira	
		7		3	Medellín	684,407	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena	
					Bucaramanga	660,325	Bucaramanga, Cúcuta	
Ibagué					858,249	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
Selectivo pasillo súper angosto	7	1,43	3	Medellín	719,633	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
				Bucaramanga	694,312	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	902,423	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
	9		3	Medellín	559,715	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
				Bucaramanga	540,021	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	701,885	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
Almacenes compactos	Drive in	1,27	3	Medellín	745,634	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena		
				Bucaramanga	719,398	Bucaramanga, Cúcuta		
				Ibagué	935,028	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira		
	Drive in pasillo angosto		6	1,2	3	Medellín	704,536	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena
						Bucaramanga	679,746	Bucaramanga, Cúcuta
						Ibagué	883,491	Ibagué, Bogotá, Cali, Pereira

El primer caso (almacenes con estanterías) muestra la diferencia entre 3 tipos de estanterías. Como se puede observar, los resultados son similares en cuanto a cantidad de CEDIs abiertos y asignaciones de clientes. En el segundo caso (Almacenes compactos), se abren 3 CEDIs al igual que los sistemas evaluados en el caso 1, pero difieren en las capacidades dadas.

En conclusión, la capacidad de cada centro de distribución está directamente relacionado con las características propias del sistema de almacenamiento. A mayor número de niveles se necesita una menor área, al igual que, a mayor tamaño de pasillos, los requerimientos de área son mayores.

4.5.5. Casos de variación de costos de transporte. Para este análisis, variaron los costos de transporte en dos pruebas, la primera consistió en reducir un 30% los costos de transporte para toda la cadena de suministro, de igual manera en la segunda prueba se aumentaron los costos un 60%.

Tabla 25. Resultados costo de transporte

Casos	Resultados			
	Número de CEDIs	Localización	Capacidad (Wj) m ²	Asignación (Ujk)
Costos de transporte rebajados 30%	3	Medellín	591,22	Medellín, Barranquilla, Cartagena
		Bucaramanga	906,33	Bucaramanga, Cúcuta
		Ibagué	1332,55	Ibagué, Cali, Bogotá, Pereira, Santa Marta
Costos de transporte aumentados 30%	3	Medellín	939,38	Medellín, Barranquilla, Cartagena, Santa Marta
		Bucaramanga	906,38	Bucaramanga, Cúcuta
		Ibagué	1177,99	Ibagué, cali, Bogotá, Pereira

Para las dos pruebas se obtuvieron las mismas localizaciones, pero con diferencia de capacidad. la diferencia en la capacidad se debe a los costos de transporte, cuando estos bajan (caso1), el modelo prefiere aumentar la capacidad del CEDI Ibagué, que posee el costo de arriendo por metro cuadrado más bajo. Al aumentar los costos de transporte se aumenta la capacidad del CEDI Medellín, ya que los costos de transporte de esta ciudad a Santa Marta son menores que desde la ciudad de Ibagué que atendía a Santa Marta en el primer caso

5. CONCLUSIONES

En primer lugar, es clave resaltar que, si bien existen precedentes de la inclusión de costos de arriendo en el problema de ubicación y que en algunos casos se abordó el cálculo del área de las instalaciones, no se encontró en la revisión de literatura realizada un modelo de localización de centros de distribución que se enfocara en el cálculo del área mediante las características propias de los sistemas de almacenamiento paletizados como el factor estiba, factor pasillos entre otros.

En la revisión de literatura se pudo observar que existe gran cantidad de modelos y métodos de solución para resolver el problema de localización de centros de distribución. Estos modelos varían de acuerdo a las necesidades o al enfoque que el autor quiera expresar y su solución depende del método que se esté utilizando, entre estos métodos se encontró el uso frecuente de metodologías de solución como: relajación Lagrangiana, Branch and Bound, heurísticas y metaheurísticas como: recocido simulado, GRASP, Ant Colony Optimization (ACO), entre otros.

Calcular la capacidad del CEDI por medio de una expresión matemática la cual involucra algunas de las características de los sistemas de almacenamiento, permite tener un acercamiento considerable a la necesidad de área real de los CEDIs capacitados ya que, no basta solo con saber dónde localizar los CEDIs para cubrir las necesidades de los clientes, también es imprescindible saber cuál es la capacidad de los CEDIs localizados de acuerdo a la demanda que se desea cubrir y a las características de los productos. Esto con el objetivo de poder dar un servicio de mayor calidad, además de mejorar las operaciones dentro de la empresa.

Por otra parte, a través de los diferentes análisis de resultados y planteamientos de casos, se identificó que el modelo localiza los centros de distribución de acuerdo a la mejor combinación entre los costos de transporte y arriendo. A su vez también se determinó que dependiendo de estos costos el modelo dimensiona las capacidades de los centros de distribución, cuando los costos de transporte y arriendo son más bajos en alguna ubicación, el modelo asigna una mayor capacidad a ese centro de distribución, en cuanto estos aumentan, las capacidades disminuyen.

En algunos casos evaluados donde variaron los parámetros de entrada, se pudo observar que el modelo arrojaba capacidades exactas (500 m), esto se debe a que la demanda asignada a ese centro de distribución era tan baja que, la restricción de capacidad mínima asigna ese valor, a su vez esta capacidad mínima es un requisito para el correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento.

Dado que las capacidades son determinadas por el modelo propuesto, no existe la necesidad de implementar una restricción que limite la localización de un solo CEDI por ubicación seleccionada, esto se da por que la capacidad calculada para cada centro de distribución es la necesaria para atender la demanda de los clientes que les fueron asignados.

En los diferentes casos planteados y en la ejecución del modelo, se comprobó que este funciona sin importar la variabilidad que se pueda presentar en los datos.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar el modelo de localización planteado en una organización que tenga la necesidad de instalar centros de distribución y a su vez determinar el área de almacenamiento, esto con el fin de discriminar de una mejor manera las características de los productos, como peso y volumen, y las cantidades de unidades que se pueden apilar sobre la estiba (factor estiba) de acuerdo al sistema de almacenamiento que utilice la empresa o tenga pensado utilizar.

Para el cálculo del área del centro de distribución, se recomienda implementar al modelo las áreas complementarias requeridas para centro de distribución y el sistema de almacenamiento, como el área de picking, administración, equipos tecnológicos, etc.

Respecto a los costos de transporte, se debe considerar un análisis en donde se involucren descuentos por cargas unitarizadas o grandes volúmenes ya que en el presente modelo estos costos son causados por el peso de cada producto.

Se recomienda en futuras investigaciones tener en cuenta en el modelo las distancias entre las localizaciones consideradas, ya que, en el trabajo actual estas fueron mostradas implícitamente a través de los costos de transporte.

Se resalta la posibilidad de sacar el modelo matemático del contexto investigativo y convertirlo en una metodología para la ubicación de centros de distribución multiproducto y cálculo del área de almacenamiento de acuerdo al sistema de almacenamiento que se esté utilizando.

BIBLIOGRAFÍA

A, Rahmani. SA, Mirhassani. A hybrid Firefly-Genetic Algorithm for the capacited facility location problem En: New trend computational intelligence in Human-Robot interaction. (2014). Vol. 283. p. 70-78.

ALARCON, B, Zaida, Estefania. Desarrollo de un modelo de localización de servicios binivel y su algoritmo de solución. Título: Maestría en ingeniería. México. Universidad nacional autónoma de México. (2012).

ALFRED, Weber. Ueber Standort der Industries, Ed 1. (1909).

AMIRI, Ali. "Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure." European journal of operational research (2006) Vol.171.2 p. 567-576.

APONTE, Andrés y ROSAS, Paula. Propuesta de solución al problema de localización de centros de distribución basándose en la meta heurística GRASP. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingenierías. Departamento de Procesos Productivos, (2009). P. 124.

ARDJMAND, Ehsan. PARK, Namkyu. WECKMAN, Gary and Reza, Mohammad. The discrete unconcious search and its application to uncapacitated facility location problem. (2014). Vol. 74. p- 32-40.

CHACKELSON, Claudia. Metodología de diseño de almacenes: fases, herramientas y mejores prácticas España. Universidad de Navarra. (2013).

CHOPRA, Sunil. "Designing the distribution network in a supply chain." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 39.2 (2003): 123-140.

CORREA, Gabriel y HERNÁNDEZ, Díaz. Localización de instalaciones enfoque cuantitativo. Conciencia tecnológica (2004). Vol. 26.

CURRENT, John. DASKIN, Mark. SHILLING, David. Facility Location: Applications and Theory Discrete network location models. En: Drezner, Z., Hamacher, H. (Eds.). Springer-Verlag. (2002). Berlin. p. 81–118.

DASKIN, Mark. Network and Discrete Location. Sabim S.A. A wiley publication. (1995).

DE LA ROSA, Leonardo y MORENO, Cristhian. Propuesta de solución al problema de localización de centros de distribución multi-producto en una cadena de suministro de tres eslabones. Ingeniero Industrial. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander (2013)

DIABAT, Ali. BATTAÏA, Olga y NAZZAL, Dima. An improved Lagrangian relaxation-based heuristic for a joint location-inventory problem. Computers & Operational Research (2015) Vol. 61. p. 170-178.

SALDARRIAGA, R, Luis Diego. Diseño optimización y gerencia de centros de distribución, almacenar menos distribuir más. Ed 1. Medellín. (2012).

FERNANDES, Diogo. ROCHA, Caroline. ALOISE Daniel. A simple and effective genetic algorithm for the two-stage capacitated facility location problem. En: Computers & industrial Engineering (2014). Vol. 75. p. 200-202.

GUTJAHR, Walter. DZUBUR, Nada. Bi-objective bi-level optimization of distribution center locations considering user equilibria. En: Transportation Research Part E. (2016). p. 1-22.

HAKIMI, S. (1965) Optimum location of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems, Operations Research, (1965) Vol.13, p.462-475.

HAKIMI, S. Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph, *Operations Research*, (1964). Vol.12, p.450-459.

HESSE, Susan and DASKIN, Mark. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research* 111.3 (1998): p. 423-447.

ITAIM, Pablo. Resolución del problema de Set-Covering utilizando un algoritmo genético. (2005). Valparaíso.

KLOSE, Andreas y DREXL, Andreas. Facility location models for distribution system design. En: *European Journal of Operational Research*. (abr.2005) Vol. 162; p. 4-29.

KLOSE, Andreas. Obtaining Sharp Lower and Upper Bounds for Two-Stage Capacitated Facility Location Problems. En: *Fleischmann* (1998). p. 185-214.

KUBY, M. The p-dispersion and maximum dispersion problems, *Geographical Analysis*, (1987) Vol. 19, p. 315-329.

KUNG, Jeng. C, -H, Lee. A revised ant algorithm for solving location-allocation problem with risky demand in a multi-echelon supply chain network. En: *Applied soft computing*. (2015). Vol. 32. p. 311-322.

GARCIA, Mora, Luis, Aníbal. *Gestión logística en centros de distribución, bodegas y almacenes*. Ed 1. Bogotá. Ecoe ediciones. (2011).

MONTOYA, Torres, JR. "A literature survey on the design approaches and operational issues of automated wafer-transport systems for wafer fabs." *Production Planning & Control* Vol.17 (2006) p.648-663.

NEGRÓN Muñoz David. *Localización de plantas, centros de distribución y servicios* En: *Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios*. 1 ed. Cengage Learning Editores. (2009) February 23. p. 232.

NIÑO, Edna y PELÁEZ, Johanna. Diseño de una propuesta de localización para los centros de distribución (CEDIs) de la empresa COMERTEX S.A. a partir de un modelo matemático. Trabajo de grado ingeniería industrial Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de estudios industriales y empresariales. (2012).

NOZICK, Linda K y TURNQUIST, M. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research*. Vol 129.2 (2001) p. 362-371.

OLIVARES Benítez, E. RÍOS Mercado, R. Z y González Velarde, J. L. A. metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. En: *International Journal of Production Economics*. (2013). p.1-172.

PÉREZ, José y MELIÁN, Belén. Búsqueda por Entornos Variables para Planificación Logística. Universidad de La Laguna. (2005).

RAMOS, Jaime. Diseño de una red de distribución para una cadena de supermercados. Ingeniero Civil Industrial. Universidad de Chile. (2013).

REVELLE, C.S. & EISELT, A.H. Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*. (2005). p.165 1–19.

SEYED, Hamid, Reza. SEYED, Taghi, Akhavan. KOBRA, Asadi. Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three echelon supply chain network with warehouse reliability. In: *Expert Systems with application*. (2015). Vol. 42. p. 2615-2623.

SUKUN. Park, TAE. Lee, CHANG. Sung, a three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. In: *Transportation Research Part E: logistics and transportation review*. (2010). Vol 46. p. 563-581.

SUN, Huijun. GAO, Ziyou and WU, Jianjun. A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers. In *Applied mathematical modelling* 32.4 (2008): p. 610-616.

TRAGANTALERNGSAK. suda, HOLT. John, Rônnqvist. Mikael. Theory and Methodology: An exact method for the two echelon, single-source, capacitated, facility location problem. En: European journal of operational research. (2000). Vol. 123. p. 473-489.

VALLHONRAT, Joseph M y COROMINAS Albert. Localización, distribución en Planta y Manutención. (1991) Ed 1. España. Pág. 11.

MECALUX. Catálogo de Almacenes automáticos MECALUX. p. 9-111

MAULEÓN, Mikel. Sistemas de almacenaje y picking. Ed. Díaz de Santos S. A. Madrid (2003). Vol 1. p. 4-9.

ANEXOS

Anexo A. Datos de entrada para la ejecución del modelo en GAMS.

```

SET
i Plantas /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Emanga/
j Posibles lugares CEDIS /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Emanga,Cucuta,Ibague/
k Clientes /Bogota,Cali,Medellin,Bquilla,Emanga,Cucuta,Ibague,Smarta,Cartagena,Pereira/
t Periodos /T1*T12/
p Productos /P1*P25/

VARIABLES
X(p,i,j,t) Unidades de producto P a transportar desde la planta I hasta el CEDIS J en el periodo T
Y(p,j,k,t) Unidades de producto P a transportar desde el CEDIS J hasta el cliente k en el periodo T
U(j,k) Variable binaria para asignar un CEDIS a cliente
W(j) Capacidad requerida del CEDIS J en metros cuadrados
Z Costo minimo total:

POSITIVE VARIABLES X,W,Y;
BINARY VARIABLES U;

TABLE O(I,P) OFERTA
      p1  p2  p3  p4  p5  p6  p7  p8  p9  p10  p11  p12  p13  p14  p15  p16  p17  p18  p19  p20  p21  p22  p23  p24  p25
Bogota 0  1  1  1  1  1  1  1  0  0  1  0  1  1  1  1  1  1  0  0  0  0  1  0  0
Cali 1  1  0  0  1  1  0  0  1  1  1  0  0  1  0  0  1  1  1  1  0  1  0  0  1
Medellin 0  1  0  1  1  1  0  0  1  1  1  1  0  0  1  1  1  0  1  0  1  1  1  1  1
Bquilla 1  0  0  1  0  1  0  1  1  0  1  1  0  1  1  1  0  1  1  1  1  0  0  1  1
Emanga 1  1  0  1  1  1  0  1  0  0  1  0  1  0  1  1  0  1  1  1  0  0  1  1  1;

TABLE CT(i,j) COSTOS DE TRANSPORTE DESDE LA PLANTA i A LA POSIBLE UBICACION DEL CEDIS j
      Bogota  Cali  Medellin  Bquilla  Emanga  Cucuta  Ibague
Bogota 247  507  507  830  409  681  286
Cali 507  247  507  830  764  911  342
Medellin 507  507  247  477  477  830  342
Bquilla 830  507  477  247  570  960  1090
Emanga 830  764  477  570  247  374  729;

TABLE CTT(j,k) COSTOS DE TRANSPORTE DESDE LA POSIBLE UBICACION DEL CEDIS HASTA EL CLIENTE
      bogota  Cali  Medellin  Bquilla  Emanga  Cucuta  Ibague  Smarta  Cartagena  Pereira
bogota 247  507  507  830  409  681  286  1160  862  507
cali 507  247  507  830  764  911  345  1160  862  477
medellin 507  507  247  477  477  830  342  764  477  507
bquilla 830  570  477  247  570  960  1090  620  286  830
emanga 830  764  477  570  247  374  729  792  729  729
cucuta 681  911  830  960  374  247  960  1120  950  950
ibague 286  342  342  1090  729  960  247  1160  890  310 ;
    
```

Anexo A. (continuación)

TABLE D(t, k, p)	DEMANDA																								
	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24	p25
T1.bogota	120	0	0	908	947	874	0	307	168	0	0	288	420	1000	986	269	158	987	698	968	644	120	0	159	0
T1.cali	150	0	713	0	812	514	316	0	0	0	0	610	920	585	954	0	0	0	0	0	672	0	0	690	1090
T1.medellin	170	0	461	0	373	0	624	0	17	504	0	860	0	488	885	0	5	650	0	0	951	120	0	159	918
T1.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	308	0	892	0	150	172	453	0	0	0	0	0	0	360	390	0	1136
T1.bmanga	145	0	859	110	492	732	585	954	0	0	0	0	0	585	954	0	0	0	0	0	1010	0	281	159	997
T1.cucuta	150	0	988	0	434	3	0	427	0	879	799	0	0	722	0	440	23	0	0	395	0	0	0	0	1010
T1.ibague	200	110	829	0	468	305	0	486	219	773	768	0	180	0	109	4	823	761	0	0	0	0	0	0	0
T1.smarta	130	100	0	550	0	345	363	0	0	0	0	750	450	65	0	0	0	281	159	997	650	0	0	951	
T1.cartagena	0	0	408	0	0	488	885	0	5	650	0	0	962	900	720	620	420	360	390	0	1136	0	0	0	672
T1.pereira	0	710	0	0	863	692	600	0	0	245	0	916	750	180	0	0	0	120	0	159	918	987	698	968	644
T2.bogota	860	0	0	660	488	722	0	440	23	0	0	395	635	0	0	100	0	60	0	0	0	0	0	780	619
T2.cali	794	0	416	0	581	898	53	0	0	0	571	0	759	180	0	0	120	0	159	0	0	140	159	0	
T2.medellin	710	0	175	0	258	0	959	0	806	736	0	228	159	0	0	0	0	0	0	690	1090	180	90	428	995
T2.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	442	0	727	0	659	120	200	200	20	0	0	780	696	0	0	690	1090
T2.bmanga	792	0	470	630	490	828	172	453	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1000	0	0	0	1000	0
T2.cucuta	598	0	221	0	702	124	0	563	0	732	175	0	0	500	400	160	420	0	320	269	0	0	320	269	0
T2.ibague	430	380	129	0	506	1000	0	109	4	823	761	0	0	120	500	200	60	180	90	428	995	200	200	20	0
T2.smarta	659	340	0	655	0	287	65	0	0	0	0	281	159	60	200	20	120	0	100	169	0	207	702	0	0
T2.cartagena	0	0	828	0	0	103	906	0	3	704	0	0	840	900	100	500	120	0	140	159	0	0	264	590	723
T2.pereira	0	400	0	0	840	99	535	0	0	859	0	578	535	120	200	200	20	0	0	780	619	0	453	0	645
T3.bogota	240	120	165	286	600	0	900	720	620	420	360	390	0	287	65	0	0	0	0	281	986	0	0	701	980
T3.cali	0	180	123	206	608	0	0	0	100	0	60	0	0	906	0	3	704	0	0	150	802	0	0	515	430
T3.medellin	0	600	0	20	0	0	180	0	0	0	120	0	159	535	0	0	847	0	578	780	0	704	0	0	150
T3.bquilla	0	0	0	0	608	0	0	0	0	0	0	0	690	0	207	702	0	0	515	430	0	0	0	0	0
T3.bmanga	0	180	120	105	180	0	120	200	200	20	0	0	780	385	0	0	0	0	701	980	951	0	264	590	723
T3.cucuta	0	120	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	1000	760	0	324	413	0	453	0	645	135	371	0	508
T3.ibague	480	180	788	103	240	0	500	400	160	420	0	320	269	0	0	31	0	555	0	0	0	785	0	0	623
T3.smarta	0	190	363	701	140	2	120	500	200	60	180	90	428	380	453	0	0	0	0	0	87	756	0	0	0
T3.cartagena	507	150	507	129	0	0	60	200	20	120	0	100	169	0	369	0	265	259	0	268	0	0	508	0	656
T3.pereira	308	400	458	40	240	0	900	100	500	120	0	140	159	321	0	0	820	0	264	590	723	0	938	0	1074
T4.bogota	659	340	0	654	0	287	65	0	0	0	0	281	190	190	0	447	428	0	0	702	924	581	0	798	0
T4.cali	0	0	829	0	0	103	906	0	3	704	0	0	150	0	0	0	200	0	464	569	775	577	77	0	360
T4.medellin	0	400	0	0	840	99	535	0	0	847	0	578	780	801	0	135	371	0	508	0	656	859	0	205	0
T4.bquilla	100	0	0	644	823	617	0	207	702	0	0	515	430	801	0	135	371	0	508	0	598	338	0	938	0
T4.bmanga	210	0	759	0	366	949	385	0	0	0	0	701	980	0	0	581	0	798	0	800	689	282	0	0	680
T4.cucuta	510	0	337	0	701	0	760	0	324	413	0	453	0	209	453	0	0	0	0	450	907	859	0	205	0
T4.ibague	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	555	0	0	0	144	0	122	329	0	790	1011	230	688	0	671
T4.smarta	400	0	534	835	257	933	380	453	0	0	0	0	0	0	814	693	577	77	0	360	656	0	816	0	1185
T4.cartagena	710	0	559	0	720	570	0	369	0	265	259	0	268	180	0	0	0	0	667	0	1147	0	0	680	994
T4.pereira	0	540	0	0	481	540	321	0	0	820	0	264	590	530	0	87	756	0	0	0	976	0	623	850	913

Anexo A. (continuación)

T9.bogota	340	0	0	825	979	592	0	524	324	0	0	247	920	0	751	161	0	0	68	360	644	863	695	200	126
T9.cali	670	0	860	0	797	745	520	0	0	0	851	0	160	404	0	0	0	0	121	420	802	257	338	0	938
T9.medellin	930	0	260	0	735	0	553	0	325	658	0	899	156	203	0	737	349	0	514	820	0	265	259	0	268
T9.bquilla	0	0	0	0	0	215	0	112	0	420	0	0	120	0	0	291	0	168	0	0	0	125	0	0	1000
T9.bmanga	950	0	694	313	934	712	692	938	0	0	0	0	0	448	945	0	0	0	0	0	913	731	0	327	0
T9.cucuta	840	570	966	0	274	501	0	760	314	853	995	0	0	0	661	0	304	0	0	960	795	198	0	0	0
T9.ibague	220	290	0	609	0	890	593	0	0	0	0	207	158	0	661	0	304	0	0	960	0	907	0	0	0
T9.smarta	0	0	884	0	0	449	699	0	863	163	0	0	780	470	0	0	0	0	695	160	0	0	0	960	795
T9.cartagena	0	340	0	0	165	920	884	0	0	861	0	407	0	852	0	999	236	0	0	920	1082	0	227	48	0
T9.pereira	200	0	548	0	333	424	808	0	0	0	697	0	0	882	0	0	557	0	813	0	1035	371	0	508	0
T10.bogota	600	0	0	700	997	167	0	751	161	0	0	68	360	0	445	507	0	0	626	168	0	863	695	200	126
T10.cali	400	0	341	892	72	282	404	0	0	0	0	121	420	79	0	0	0	0	371	152	0	198	0	0	0
T10.medellin	100	0	140	0	195	0	203	0	737	349	0	514	820	864	0	131	731	0	327	0	840	731	0	327	0
T10.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	291	0	168	0	0	0	0	330	0	378	0	0	1035	371	0	508	0
T10.bmanga	500	0	40	339	753	951	448	945	0	0	0	0	0	736	0	0	0	0	650	616	0	227	48	0	0
T10.cucuta	300	0	894	0	944	672	0	661	0	304	0	0	960	0	79	0	0	951	0	150	707	907	0	0	0
T10.ibague	200	100	100	0	804	972	0	179	167	497	622	0	780	0	79	0	0	951	0	150	918	0	0	960	795
T10.smarta	90	850	0	881	0	406	470	0	0	0	0	695	160	0	812	77	118	15	0	890	723	265	259	0	268
T10.cartagena	0	0	744	0	0	660	852	0	999	236	0	0	920	198	0	0	0	0	299	320	976	257	338	0	938
T10.pereira	0	66	0	0	225	818	882	0	0	557	0	813	0	184	0	419	46	0	0	919	125	0	0	0	1000
T11.bogota	915	0	0	210	287	932	0	445	507	0	0	626	168	0	308	948	0	0	269	0	1090	863	695	200	126
T11.cali	995	0	300	0	471	849	79	0	0	0	0	371	152	79	0	0	0	0	371	152	924	371	0	508	0
T11.medellin	515	0	36	0	247	0	864	0	131	731	0	327	0	864	0	131	731	0	327	0	919	0	227	48	0
T11.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	0	330	0	378	0	0	0	0	330	0	378	0	0	853	0	0	960	795
T11.bmanga	177	15	130	25	377	659	736	0	0	0	0	650	903	975	0	0	0	0	150	0	731	0	327	0	0
T11.cucuta	977	0	809	0	248	996	0	79	0	0	951	0	150	294	0	0	157	0	837	960	0	125	0	0	1000
T11.ibague	555	830	855	0	956	780	0	812	77	118	15	0	890	688	0	227	48	0	0	365	0	907	0	0	0
T11.smarta	288	70	0	200	0	318	198	0	0	0	0	299	320	903	975	0	0	0	0	789	645	0	227	48	0
T11.cartagena	0	0	150	0	0	801	184	0	419	46	0	0	0	702	0	168	961	0	0	596	802	265	259	0	268
T11.pereira	0	612	0	0	427	918	356	0	0	456	5	415	0	666	0	0	0	0	950	986	907	257	338	0	938
T12.bogota	8	0	0	427	365	507	0	308	948	0	0	269	0	0	445	507	0	0	626	168	1136	0	0	960	795
T12.cali	607	0	290	0	668	776	666	0	0	0	0	950	50	79	0	0	0	0	371	152	0	371	0	508	0
T12.medellin	8	0	387	0	891	0	702	0	168	961	0	581	690	864	0	131	731	0	327	0	624	257	338	0	938
T12.bquilla	0	0	0	0	0	0	0	268	0	379	0	0	780	0	0	330	0	378	0	0	0	0	227	48	0
T12.bmanga	308	0	927	150	663	608	903	975	0	0	0	0	150	736	0	0	0	0	650	1147	265	259	0	0	268
T12.cucuta	1	0	492	0	958	101	0	222	0	0	27	0	169	0	79	0	0	951	0	150	0	125	0	0	1000
T12.ibague	5	611	711	0	79	214	0	353	895	163	69	0	150	0	79	0	0	951	0	150	847	907	0	0	0
T12.smarta	608	117	0	90	0	833	197	0	0	0	0	79	0	198	0	0	0	299	320	0	731	0	327	0	0
T12.cartagena	0	0	212	0	0	670	688	0	227	48	0	0	0	184	0	419	46	0	0	994	198	0	0	0	0
T12.pereira	0	326	0	0	620	10	294	0	0	157	0	837	0	356	0	0	456	5	415	0	0	0	227	48	0

Anexo A. (continuación)

PARAMETERS			
CA (j)	COSTO MENSUAL DE ARRIENDO POR METRO CUBICO EN J	/Bogota	11000
		Cali	12500
		Medellin	13000
		Bquilla	12700
		Bmanga	12800
		Cucuta	7500
		Ibague	10000 /
Fe (p)	CANTIDAD DE PRODUCTOS QUE SE APILAN EN EL PALLET	/p1	21
		p2	1
		p3	1
		p4	8
		p5	16
		p6	12
		p7	36
		p8	120
		p9	36
		p10	36
		p11	24
		p12	60
		p13	40
		p14	36
		p15	25
		p16	40
		p17	50
		p18	36
		p19	38
		p20	36
		p21	36
		p22	32
		p23	30
		p24	40
		p25	32/

Anexo A. (continuación)

```

Kl(p) PESO EN KILOGRAMOS DEL PRODUCTO P          /p1    0.40
                                                    p2    94
                                                    p3    77.66
                                                    p4    23
                                                    p5    10
                                                    p6    1.09
                                                    p7    6.99
                                                    p8    1.5
                                                    p9    1.8
                                                    p10   2
                                                    p11   6
                                                    p12   13.5
                                                    p13   0.8
                                                    p14   0.6
                                                    p15   0.8
                                                    p16   0.1
                                                    p17   0.8
                                                    p18   1.6
                                                    p19   1.9
                                                    p20   3.5
                                                    p21   0.1
                                                    p22   1.2
                                                    p23   1.9
                                                    p24   3.2
                                                    p25   10 /

FP FACTOR PASILLO (ADIMENSIONAL)/1.6/
FH FACTOR ALTURA (ADIMENSIONAL)/6/
AE AREA DE LA ESTIBA (M^2)/1.2/
B CAPACIDAD MINIMA DEL CEDIS /500/;

EQUATIONS
Costo Funcion minimizacion de los costos.
Capacidad(j,t) Capacidad de cada centro de distribucion
Asignacion(k) Variable binaria de asignacion
Flujo1(t,p,j) Cumplimiento de la demanda - Planta-CEDIS
Flujo2(j,k,t,p) Cumplimiento de la demanda - CEDIS-Cliente
Centro(j,k) Capacidad minima del centro de distribucion;

costo.. Z=E=sum((p,i,j,t),X(p,i,j,t)*Kl(p)*CT(i,j))+sum((p,j,k,t),Y(p,j,k,t)*Kl(p)*CTT(j,k))+12*sum(j,W(j)*CA(j));
flujo1(t,p,j).. sum(i,X(p,i,j,t)*O(i,p)) =G= sum(k,D(t,k,p)*U(j,k));
flujo2(j,k,t,p).. y(p,j,k,t) =e= D(t,k,p)*U(j,k);
asignacion(k).. sum(j,U(j,k)) =E= 1;
capacidad(j,t).. W(j) =G= SUM((p,k),(D(t,k,p)*U(j,k)/(Fe(p))/(FH))*AE*FP);
centro(j,k).. W(j) =G= B*U(j,k);

MODEL TUFLP /ALL/;
SOLVE TUFLP USING MIP MINIMIZING Z;

```

Anexo B. Resultados obtenidos en GAMS

```

Total (root+branch&cut) =    0.03 sec.
MIP status(101): integer optimal solution
Fixing integer variables, and solving final LP...
Tried aggregator 1 time.
LP Presolve eliminated 23265 rows and 31578 columns.
All rows and columns eliminated.
Presolve time =    0.02 sec.
Fixed MIP status(1): optimal

Proven optimal solution.

MIP Solution:    5384156988.965864    (30 iterations, 0 nodes)
Final Solve:    5384156988.965866    (0 iterations)

Best possible:    5384156988.965864
Absolute gap:        0.000000
Relative gap:        0.000000

--- Restarting execution
--- MOD1.gms(268) 4 Mb
--- Reading solution for model TUFLP
--- MOD1.gms(268) 6 Mb
*** Status: Normal completion
--- Job MOD1.gms Stop 10/03/16 14:07:54 elapsed 0:00:00.796

```

AnexoB. (Continuación)

```

---- VAR W  Capacidad requerida del CEDIs J en metros cuadrados

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
Bogota    .          .          +INF    1.3200E+5
Cali      .          .          +INF    1.5000E+5
Medellin  .          939.382    +INF    .
Bquilla   .          .          +INF    1.5240E+5
Bmanga    .          906.328    +INF    .
Cucuta    .          .          +INF    90000.000
Ibague    .          1177.989    +INF    .

          LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
---- VAR Z          -INF    5.3842E+9    +INF    .

Z  Costo minimo total

**** REPORT SUMMARY :
          0      NONOPT
          0      INFEASIBLE
          0      UNBOUNDED

EXECUTION TIME      =          0.062 SECONDS      6 Mb  WEX239-239 Nov 9, 2012

```

Anexo B. (continuación)

Bogota	.Bogota	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Cali	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Medellin	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Bquilla	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Bmanga	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Cucuta	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Ibague	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Smarta	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Cartagena	.	.	1.000	EPS
Bogota	.Pereira	.	.	1.000	EPS
Cali	.Bogota	.	.	1.000	EPS
Cali	.Cali	.	.	1.000	EPS
Cali	.Medellin	.	.	1.000	EPS
Cali	.Bquilla	.	.	1.000	EPS
Cali	.Bmanga	.	.	1.000	EPS
Cali	.Cucuta	.	.	1.000	EPS
Cali	.Ibague	.	.	1.000	EPS
Cali	.Smarta	.	.	1.000	EPS
Cali	.Cartagena	.	.	1.000	EPS
Cali	.Pereira	.	.	1.000	EPS
Medellin.	Bogota	.	.	1.000	1.3353E+8
Medellin.	Cali	.	.	1.000	3.0663E+8
Medellin.	Medellin	.	1.000	1.000	4.2659E+8
Medellin.	Bquilla	.	1.000	1.000	1.3370E+8
Medellin.	Bmanga	.	.	1.000	3.9112E+8
Medellin.	Cucuta	.	.	1.000	3.8788E+8
Medellin.	Ibague	.	.	1.000	4.1330E+8
Medellin.	Smarta	.	1.000	1.000	0.9995E+9
Medellin.	Cartagena	.	1.000	1.000	6.4172E+8
Medellin.	Pereira	.	.	1.000	2.5683E+8
Bquilla	.Bogota	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Cali	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Medellin	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Bquilla	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Bmanga	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Cucuta	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Ibague	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Smarta	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Cartagena	.	.	1.000	EPS
Bquilla	.Pereira	.	.	1.000	EPS
Bmanga	.Bogota	.	.	1.000	1.1210E+8
Bmanga	.Cali	.	.	1.000	2.6759E+8
Bmanga	.Medellin	.	.	1.000	1.9519E+8
Bmanga	.Bquilla	.	.	1.000	3.3652E+7
Bmanga	.Bmanga	.	1.000	1.000	5.5854E+8
Bmanga	.Cucuta	.	1.000	1.000	6.7225E+8
Bmanga	.Ibague	.	.	1.000	2.5931E+8
Bmanga	.Smarta	.	.	1.000	1.8808E+8

Anexo B. (continuación)

Bmanga	.Cartagena	.	.	1.000	2.4356E+8
Bmanga	.Pereira	.	.	1.000	1.5582E+8
Cucuta	.Bogota	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Cali	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Medellin	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Bquilla	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Bmanga	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Cucuta	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Ibague	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Smarta	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Cartagena	.	.	1.000	EPS
Cucuta	.Pereira	.	.	1.000	EPS
Ibague	.Bogota	.	1.000	1.000	3.0428E+8
Ibague	.Cali	.	1.000	1.000	4.5677E+8
Ibague	.Medellin	.	.	1.000	2.0138E+8
Ibague	.Bquilla	.	.	1.000	5.5619E+7
Ibague	.Bmanga	.	.	1.000	2.5506E+8
Ibague	.Cucuta	.	.	1.000	2.7416E+8
Ibague	.Ibague	.	1.000	1.000	6.4940E+8
Ibague	.Smarta	.	.	1.000	2.6717E+8
Ibague	.Cartagena	.	.	1.000	2.0450E+8
Ibague	.Pereira	.	1.000	1.000	5.4144E+8

Anexo C.

**DESARROLLO DE UN MODELO DE
OPTIMIZACIÓN PARA LA LOCALIZACIÓN
DE CENTROS DE DISTRIBUCIÓN
MULTIPRODUCTO CONSIDERANDO EL
CÁLCULO DE ÁREA**

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR OPTIMIZATION
LOCATION OF DISTRIBUTION CENTERS MULTI-PRODUCT
CONSIDERING THE CALCULATION OF AREA**

**L. Alejandro Bermudez Arango, Andrés F Garzón Rueda
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Universidad
Industrial de Santander**

Arango.alejandro0@gmail.com

Andresfgr94@gmail.com

RESUMEN

El problema de localización de centros de distribución se aborda a partir de la necesidad de las organizaciones de controlar eficientemente el flujo de bienes y servicios, representa uno de los mayores problemas de las organizaciones hoy en día, ya que las decisiones relacionadas con la localización de centros de distribución son complejas y difíciles de tomar, y su impacto se ve reflejado en la eficiencia de la cadena de suministro. Este artículo presenta un modelo de localización discreto de centros de distribución capacitados (TSCFLP) en una cadena logística de tres eslabones. El objetivo es ubicar los centros de distribución (CEDIs) y calcular el área de almacenaje necesaria para cada uno de acuerdo a una expresión matemática que involucra las demandas por atender asignadas al CEDI y, algunas de las características de los sistemas de almacenamiento paletizados, como el área de los pasillos, la altura de la estantería, entre otras. El modelo planteado fue programado en el Software GAMS y se resolvió mediante el solver CPLEX.

Palabras clave: Localización, Centros de distribución, Área de almacenamiento, Programación entera mixta.

ABSTRACT

The problem of locating distribution centers is approached from the need for organizations to efficiently control the flow of goods and services, represents one of the biggest problems in organizations today, as decisions relating to the location of distribution centers are complex and difficult to take, and their impact is reflected in the efficiency of the supply chain. This article presents a model of discrete location of distribution centers trained (TSCFLP) in a logistics chain of three links. The aim is to locate distribution centers (DCs) and calculate the storage area required for each according to a mathematical expression involving demands to address assigned to the CEDI and some of the features of the systems palletized storage, as the area of the halls, the height of the shelf, among others. The proposed model was programmed in GAMS Software and solved by CPLEX solver.

Keywords: Location, distribution centers, storage area, mixed integer programming

INTRODUCCIÓN

Cuando se aborda el problema de localización de los centros de distribución se enfrentan diversos cuestionamientos como: ¿Dónde ubicarlo?, ¿Dónde se puede obtener el menor costo posible?, ¿Cuál es el tamaño óptimo que debe tener el CEDI para poder satisfacer la demanda sin exceder la capacidad del mismo?, ¿Cuáles son los clientes que debe atender? Es así como, solucionar el problema de localización de los centros de distribución implica un estudio detallado que depende en gran medida de las necesidades logísticas que tenga la empresa y de las características propias de esta, sustentada en la obtención del menor costo posible al momento de decidir dónde localizar el CEDI.

El problema de localización de instalaciones capacitado en dos etapas TSCFLP es una extensión del problema de localización capacitado CFLP, Su objetivo es encontrar la localización óptima de las instalaciones que deben satisfacer a un conjunto de clientes, dada una demanda específica, asignando un cliente a un único CEDI, determinado el flujo que deben seguir los productos desde la planta hasta los CEDIs. Entonces se considera que hay dos flujos de transporte: entre las plantas y los CEDIs, y entre los CEDIs y los clientes, este modelo incluye las capacidades de las plantas y los depósitos, además de los costos fijos y variables.

En el presente artículo se plantea una variación del modelo TSCFLP que permita localizar los CEDIs multi-producto y calcular las capacidades de estos. Para calcular estas capacidades se utilizará una expresión matemática la cual involucra algunos de los aspectos más importantes de los sistemas de almacenamiento paletizados como: el área de los pasillos, y la altura, entre otras, entendiendo que el costo de arrendamiento está directamente relacionado con el área del CEDI. Para dar solución al problema planteado se formula como un modelo de programación lineal entera mixta el cual es resuelto utilizando el software GAMS por medio de su solver CPLEX.

REVISIÓN DE LITERATURA

Bajo el enfoque de hacer una revisión literaria científica y técnica sobre los estudios contemporáneos que abordan la temática de este proyecto, se estudiaron diversas publicaciones sobre localización de plantas o CEDIs y métodos de solución; esto con el fin de robustecer y complementar la investigación que se está realizando en el presente artículo.

[1] Tratan los problemas de localización estáticos y deterministas haciendo un análisis de los modelos más relevantes de la literatura como los problemas medios, cuyo centro de atención son los lugares más factibles para la ubicación de los CEDIs y los clientes potenciales que estos podrían atender. Esta clase de modelos son muy sencillos en su formulación y como consecuencia no se capturan varias características de estos problemas en un entorno real.

[2] Consideran el problema de localización de CEDIs en tres eslabones TSCFLP, el objetivo del problema es determinar el número y la ubicación de cada eslabón de forma simultánea, utilizan relajación lagrangiana aplicándola al método Branch & Bound para acotar la solución, implementan el algoritmo propuesto para probar su rendimiento en seis conjuntos de problemas de prueba codificados en FORTRAN, y ejecutados en DEC2000 300AXP, comparan la calidad de las soluciones y tiempos de cálculo en un paquete de programación llamado ZIP, dando como resultado que el primer conjunto de datos consume menos tiempo y producía ramificaciones B&B más pequeños.

[3] Exponen un ejemplo teórico-práctico del sector automotriz, muestran los efectos en los costos de almacenamiento y los costos asociados de transporte variando la cantidad de centros de distribución a instalar, definen la importancia de los inventarios de seguridad y cómo estos influyen en las características y el cálculo más exacto de la capacidad de los CEDIs. Los procedimientos usados para el cálculo de estos costos son “ideas integradas” (definido así por los autores) de diversas temáticas como la teoría de colas, análisis discreto y análisis multi-objetivo entre otras.

[4] Enmarcan todas las características a tener en cuenta en el diseño de las redes de distribución en una cadena de suministro Proveedor-CEDIs-Consumidor. En un nivel amplio, las principales propiedades a ser evaluadas en el diseño de CEDIs son: 1. Cumplir las necesidades de los consumidores 2. El costo de satisfacer las necesidades de los consumidores. También nombra los costos principales que se ven directamente afectados en la decisión de la ubicación de los CEDIs como son, los costos de inventarios, transporte, almacenamiento e información. Si bien estas características son determinantes para el problema.

[5] Plantean una posible solución al problema del diseño de una red de distribución desarrollando un modelo de programación entera mixta, proporciona una solución mediante un modelo heurístico; el modelo es justificado mediante la comparación de los resultados arrojados por el software CPLEX, para solucionar el problema planteado se utiliza relajación Lagrangiana, su particularidad es que busca determinar no solamente los mejores sitios para la ubicación de los CEDIs sino también el mejor sitio para la

instalación de plantas y la mejor estrategia para distribuir la mercancía de esas plantas a los CEDIs y de estos a los consumidores.

[6] Consideran el problema de localización de centros de distribución no capacitado en una cadena logística de dos eslabones, (TUFLP) donde se propone la utilización de un procedimiento voraz adaptativo probabilista (GRASP) para la resolución del problema, para la solución de este problema se realizó el planteamiento del modelo comparando por medio del uso de un algoritmo meta heurístico GRASP y programación lineal SIMPLEX.

[7] Tratan el problema de diseño de una red de abastecimiento única en una cadena de suministros de tres eslabones, formulan el problema como un modelo de programación no lineal utilizando un algoritmo heurístico y relajación lagrangiana para la solución del problema.

[8] Trata el problema de localización de centros de distribución en una cadena logística de tres eslabones que cuenta con varios canales de transporte entre los nodos de cada eslabón con diferentes costos y tiempos de transporte. El objetivo del modelo es minimizar los costos de transporte de la planta a los centros de distribución y minimizar los tiempos entre los centros de distribución y el cliente, implementaron el método ϵ -restricción (ϵ -constraint) para la solución del problema en pequeñas y grandes instancias dando resultados favorables en los tiempos computacionales.

[9] Estudian el problema de localización y la asignación de tareas a CEDIs capacitado en una cadena logística multi-eslabones bajo demandas de incertidumbre, plantean el problema como un modelo estocástico en programación lineal entera mixta (MILP) junto a un algoritmo meta heurístico Ant Colony Optimization (colonia de hormigas) para encontrar la solución óptima del problema.

[10] Consideran en su trabajo un problema multi-eslabón relacionando los inventarios y la ubicación de los CEDIs, analizan las diversas metodologías para la solución del problema anteriormente mencionado como descomposición Dantzig-Wolfe, modelos analíticos estilizados, heurística iterativa, entre otras, y sus respectivas variables de decisión.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

- El modelo de localización a desarrollar es discreto, razón por la cual ya se tiene predefinido un conjunto de posibles ubicaciones para los CEDIs, y las ubicaciones de las plantas y clientes son fijas.
- Los costos asociados a la localización de los CEDIs son de transporte y arriendo, difieren según la ubicación.
- La demanda de los clientes es satisfecha por un único centro de distribución, garantizando una única ruta de transporte desde el centro de distribución al cliente, así mismo la ubicación de estos está dispersa, quiere decir que se encuentran en cualquier punto del plano.

- Cada CEDI localizado tendrá una capacidad mínima (metros cuadrados) la cual corresponde a la necesidad de espacio que se requiere para la instalación del sistema de almacenamiento que se esté utilizando.
- Las plantas o proveedores pueden suplir la demanda solicitada de cualquier centro de distribución y, aunque en el modelo no se considera la capacidad de los proveedores o plantas, estos tienen una disponibilidad limitada de referencias a despachar (no todas las plantas producen las mismas referencias de productos).
- Solo se puede instalar un CEDI por ciudad.
- Los centros de distribución tienen una capacidad limitada, esta es calculada por el modelo propuesto mediante una expresión matemática la cual involucra algunas de las características más importantes de los sistemas de almacenamiento paletizados como: el tipo de pallet, el peso, la capacidad de apilamiento de los productos y el sistema de transferencia de mercancías (cálculo del factor pasillos) entre otros.

Calculo del área de almacenamiento

Como se ha dicho anteriormente la capacidad de los centros de distribución está dada por una expresión matemática [11] la cual se adapta al modelo de optimización permitiendo encontrar los metros cuadrados necesarios de almacenamiento para cada CEDI que el modelo localice. Esta fórmula matemática involucra algunos de los factores más importantes de los sistemas de almacenamiento como la altura, el tamaño de los pasillos, el tipo o área de estiba y el factor estiba como podemos observar a continuación:

Nota: Esta fórmula solo determina el área principal de almacenamiento, es decir, no tiene en cuenta áreas complementarias como zona de picking, recepción, entre otras.

$$\left(\frac{\frac{\text{Demanda} \left(\frac{\text{und}}{\text{producto}} \right)}{\text{Factor estiba} \left(\frac{\text{und}}{\text{pallet}} \right)}}{\text{Factor altura (adimensional)}} \right) * \text{Area de la estiba} (\text{m}^2) * \text{Factor pasillo} (\%) = \text{m}^2$$

D = Demanda

Fe = Factor estiba

Fh = Factor altura

Ae = Área de la estiba

Fp = Factor pasillos

El factor estiba fe: el factor estiba está dado por las unidades de producto sobre pallet, este se calcula teniendo en cuenta el espacio disponible que hay entre los entrepaños de la estantería, para esto se tiene en cuenta la altura del pallet y la capacidad de arrume del producto a estibar.

Factor altura Fh : es el número de niveles que tiene la estantería, un valor que depende del sistema de almacenamiento o del tipo de equipo de manejo de materiales.

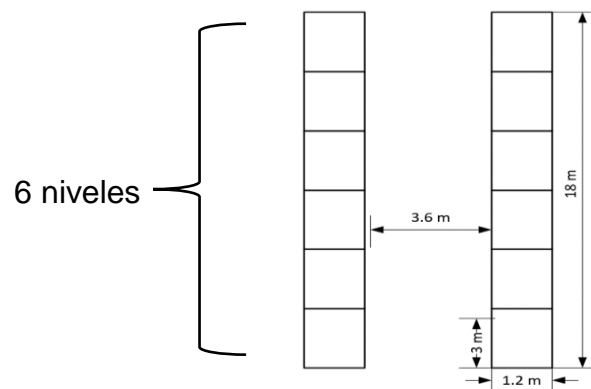
Área del pallet Ae : existen gran variedad de pallets su área depende del tipo de pallet que se esté utilizando y su relación con el sistema de almacenamiento o del tipo de mercancía que se esté manejando.

Factor pasillos Fp : este factor se refiere a la cantidad de área adicional que se debe reservar para cubrir las necesidades de pasillo, este dato cambia de acuerdo al sistema de estantería utilizado o al sistema de manejo de mercancía que se esté utilizando (montacargas o elevadores).

Cálculo del factor altura (Fh) y factor pasillo (Fp)

Las dimensiones de las estructuras y tipos de equipo son dependientes del diseño del centro de distribución, el factor pasillo se calcula como un porcentaje de la dimensión total del sistema de almacenamiento como se puede apreciar a continuación:

Ilustración 1. Diagrama de dimensiones de estantería



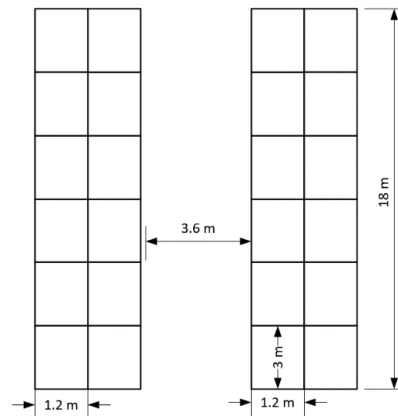
$$Fp = 1 + \left(\frac{\text{ancho del pasillo}}{(\text{Numero de Estanterías} * \text{ancho de la estantería}) + \text{ancho de pasillo}} \right)$$

$$Fp = 1 + \left(\frac{3,6}{(2 * 1,2) + 3,6} \right) = 1.6$$

Esto quiere decir, que se debe reservar el **60%** de área adicional para cubrir las necesidades de pasillos (este dato cambia de acuerdo al sistema de almacenamiento con estanterías utilizado o al sistema de manejo de mercancías.).

El factor altura para este caso es **6**, está dado por el número de niveles de la estantería, en cada nivel hay una altura de 3 m.

Ilustración 2. Sistema de almacenamiento de doble profundidad de estantería convencional



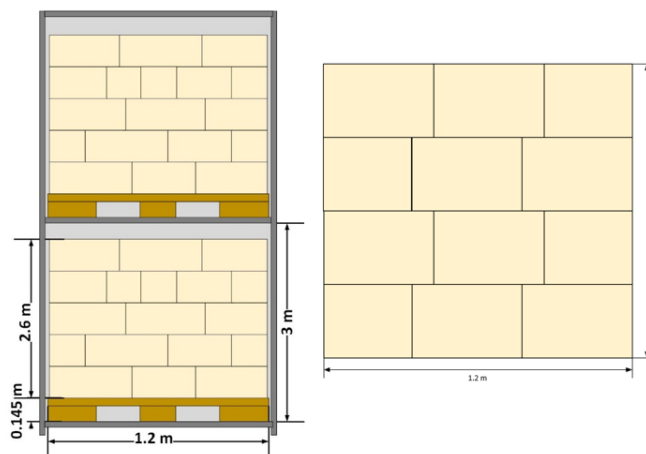
$$Fp = 1 + \left(\frac{3,6}{(4 * 1,2) + 3,6} \right) = 1.4286$$

Para esta estantería de doble profundidad, el factor pasillo es de 1,4286 lo que quiere decir que el **42,86%** corresponde al área necesaria de pasillos, y para este caso el factor altura también es **6**.

Cálculo del factor estiba (Fe).

El factor estiba depende de las características del producto a estibar, el tipo de embalaje, el volumen que ocupa, el peso unitario, el material de la estiba y de las dimensiones del estante. Este factor se debe entender como la cantidad de producto que se pueden apilar en una estiba.

Ilustración 25. Apilamiento de productos por entrepaños



Para una estiba estándar de 1 m x 1,2 m, se pueden apilar cajas de producto *p1*, cada caja contiene 24 unidades del producto. Supóngase que del producto *p1* se pueden apilar 36 cajas en un solo pallet, su factor estiba para este caso, es 36. Ahora bien, si un determinado producto no ocupa todo el pallet y se debe manipular un solo producto o caja por pallet, su factor estiba es **1**. Cabe resaltar que la capacidad de apilamiento depende de las

dimensiones del estante o de la resistencia de apilamiento del producto (peso). Así mismo los productos estibados no deben superar a la altura máxima permitida por el estante.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA

Conjunto de índices

- i Plantas $i = 1, \dots, I$
- j CEDIs $j = 1, \dots, J$ sitios potenciales para los CEDIs
- k Clientes $k = 1, \dots, K$
- p Productos $p = 1, \dots, P$
- t Periodos $t = 1, \dots, T$

Parámetros

- $CT(i, j)$: Costos de transporte desde la planta i hasta el centro de distribución j .
- $CTT(j, k)$: Costos de transporte desde el CEDI j hasta el cliente k .
- $Ca(j)$: Costos de arriendo en la ubicación j por metro cuadrado.
- $D(t, k, p)$: Unidades del producto p que demanda el cliente k en el periodo t .
- $O(i, p)$: Disponibilidad del proveedor i para despachar el producto p .
- $Fe(p)$: Factor estiba cantidad de productos que se apilan sobre el pallet (unid/pallet).
- $K(p)$: Peso del producto p .
- Ae : Área de la estiba.
- Fp : Factor pasillos.
- Fh : Factor altura.
- B : Capacidad mínima de los centros de distribución.

Variables

- $X(p, i, j, t)$: Unidades de producto p a transportar desde la planta i hasta el CEDIs j en el periodo de tiempo t .
- $Y(p, j, k, t)$: Unidades de producto p a transportar desde el CEDI j hasta el cliente k en el periodo de tiempo t .
- $W(j)$: Capacidad (m^2) del centro de distribución j .
- $U(j, k)$: $\begin{cases} 1: \text{si el cliente } k \text{ es atendido por el CEDI } j \\ 0: \text{de lo contrario} \end{cases}$; Variable binaria de asignación.
- Z : Costo mínimo total.

$$Z = \sum_p^P \sum_i^I \sum_j^J \sum_t^T X(p, i, j, t) * CT(i, j) * k(p) + \sum_p^P \sum_j^J \sum_k^K \sum_t^T Y(p, j, k, t) * CTT(j, k) * K(p) \quad (1)$$

$$+12 * \sum_j^J W(j) * Ca(j)$$

Sujeto a:

$$\sum_i^I X(p, i, j, t) * O(i, p) \geq \sum_k^K D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, t \quad (2)$$

$$Y(p, j, k, t) = D(t, k, p) * U(j, k) \quad \forall: p, j, k, t \quad (3)$$

$$W(j) \geq \sum_p^P \sum_k^K \left[\frac{D(t, k, p) * U(j, k)}{Fe(p)} \right] * Ae * Fp \quad \forall: j, t \quad (4)$$

$$W(j) \geq B * U(j, k) \quad \forall: k, j \quad (5)$$

$$\sum_j^J U(j, k) \leq 1 \quad \forall: k \quad (6)$$

La función objetivo (1) tiene como fin la minimización de costos, los costos de transporte se obtienen multiplicando la cantidad de unidades a transportar en los tres eslabones (Plantas-CEDIS-Clientes), por los costos unitarios asociados al peso de los productos y a las ubicaciones de los diferentes eslabones (distancias).

El costo de almacenamiento, se obtiene al multiplicar la variable $W(j)$ la cual corresponde a la cantidad de metros cuadrados necesarios para localizar el CEDI j , por el costo de arriendo ($\$/m^2$) de la ubicación j previamente definida, el numero 12 hace referencia a la suma total de periodos en que la función objetivo es evaluada.

Las restricciones (2) y (3) aseguran que siempre se cubra la demanda del producto p que requiere el cliente k asignado al CEDI j en el periodo de tiempo t indicado, así mismo aseguran que siempre haya un flujo constante de productos entre los tres eslabones de la cadena de suministro (Plantas-CEDIS-Clientes). En (2) $O(i, p)$ señala que no todas las plantas manejan las mismas referencias de productos, razón por la cual el modelo debe seleccionar el proveedor o planta que maneje la referencia demandada para despacharla al centro de distribución j que lo requiere. (3) garantiza que cada producto p que el cliente k demande sea cubierto por el CEDI j asignado.

(4) determina la capacidad de cada CEDI localizado, de acuerdo a la demanda de los clientes asignados a este, a las características de los productos (factor estiba) y el sistema de almacenamiento que se esté utilizando. (5) asegura que el modelo no arroje capacidades atípicas por medio de un parámetro B el cual hace referencia a los metros cuadrados mínimos que puede tener el centro de distribución, así mismo garantiza que el

área o la capacidad mínima de cada CEDI sea la requerida por el sistema de almacenamiento que se esté manejando. (6) Garantiza que cada cliente sea atendido por un único centro de distribución, así mismo que solo se pueda localizar un centro de distribución en un nodo.

Para la ejecución del modelo, los datos de oferta del producto y demanda de los clientes, fueron generados de forma pseudo-aleatoria a través de Microsoft Excel 2016, la ubicación de las plantas, centros de distribución y clientes se determinó con las ciudades más pobladas de Colombia [11] y a una relación de distancia entre las ubicaciones seleccionadas, los datos correspondientes al factor altura, el factor pasillo y el área de la estiba se calcularon [12] de acuerdo a las características propias de un sistema de almacenamiento convencional paletizado [13], los costos de transporte se obtuvieron de una empresa [14] dedicada a tal actividad y los costos de arriendo se determinaron mediante una búsqueda vía web de precios por metro cuadrado de bodegas en diferentes sectores de cada ciudad seleccionada.

A continuación, se procedió a ejecutar el modelo matemático con los datos de entrada establecidos y se obtuvieron los siguientes resultados:

RESULTADOS

Localización de los CEDIs	Capacidad del CEDIs (Wj)	Cientes asignados a los CEDIs (Ujk)
Medellín	939,382	Medellín, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena
Bucaramanga	906,328	Bucaramanga, Cúcuta
Ibagué	1177,989	Bogotá, Cali, Pereira, Ibagué

El modelo decidió abrir tres centros de distribución en relación a la demanda de los clientes asignados, a los costos de transporte y arriendo (capacidad), se observó que dos de los CEDIs están ubicados en ciudades donde se encuentra instalada una planta y una demanda por atender (clientes), esto, se debe a que el costo de transporte entre una misma localización es más bajo que el transportar a otra ciudad. Ibagué, por el contrario, no posee una planta o proveedor, pero los costos de transporte de esta ciudad a sus clientes asignados en Cali, Bogotá y Pereira son los más bajos.

ORIGEN	CTT(j,k) (\$/Kg)	DESTINO									
		Bogotá	Cali	Medellín	Barranquilla	Bucaramanga	Cúcuta	Ibagué	Santa Marta	Cartagena	Pereira
Bogotá	247	507	507	830	409	681	286	1160	862	507	
Cali	507	247	507	830	764	911	342	1160	862	477	
Medellín	507	507	247	477	477	830	342	764	477	507	
Barranquilla	830	507	477	247	570	960	1090	620	286	830	
Bucaramanga	830	764	477	570	247	374	729	792	729	729	
Cúcuta	681	911	830	960	374	247	960	1120	950	950	
Ibagué	286	342	342	1090	729	960	247	1160	890	310	

Para analizar la capacidad arrojada por el modelo se tabulan periodo a periodo los datos del CEDI Bucaramanga.

Análisis de capacidad del CEDI Bucaramanga en el periodo t		
Periodos	Capacidad m ²	Demanda
t1	719,629	1065
t2	365,313	4843
t3	220,275	1535
t4	4850315	2589
t5	674,407	2194
t6	548,593	1332
t7	561,646	2352
t8	341,85	2010
t9	906,328	4150
t10	451,896	2190
t11	457,297	4422
t12	571,652	1545

Como se puede observar en la tabla XX, las demandas mas altas se encuentran en los periodos 2, 9 y 11, sin embargo la capacidad arrojada por el modelo para el CEDI Bucaramanga (906.328) corresponde a la tercera demanda mas alta (periodo 9), esto se debe a que el modelo no solo determina la capacidad del CEDI de acuerdo a la demanda mas alta en los periodos evaluados, sino que tambien involucra los volúmenes de los productos traducidos a factor estiba, esto quiere decir que a mayor volumen del producto, menor factor estiba (unidades sobre pallet), por lo tanto los productos demandados en el periodo 9 para el CEDI Bucaramanga tienen mayor volumen que los demas, dando como resultado una mayor capacidad. Este resultado se debe a la misma formula para el calculo del area el cual divide la demanda del cliente por producto asignado al CEDI sobre el factor estiba.

El costo total anual arrojado por el modelo es de \$5'384.200.000 pesos colombianos (COP), un total de \$1'835.798 dólares (A tasa de cambio del 11 de octubre de 2016). Las asignaciones de clientes correspondientes a los CEDIs abiertos se muestran en la siguiente ilustración.

EXPERIENCIA COMPUTACIONAL

Con el fin de analizar la robustez y los tiempos computacionales del modelo planteado, se creó un escenario de alta variabilidad para los 25 productos demandados por los clientes en los doce periodos en los que se evalúa el modelo, estos datos se generaron pseudo-aleatoriamente a través de Microsoft Excel 2016, mediante una distribución uniforme [200,400].

Se crearon 100 instancias de demanda del modelo variando de forma pseudo-aleatoria la demanda con la misma distribución uniforme (200,400), los demás parámetros como costos de transporte, disponibilidad de las plantas, entre otros quedaron estáticos.

La compilación del modelo se realizó en el Software GAMS a través de programación lineal entera mixta utilizando el solver CPLEX, para esto se utilizó un computador con un procesador Intel® Core™ I3 de 3.30 GHz, 8 GB de memoria RAM y con el sistema operativo Windows 10 Pro, obteniendo un tiempo computacional en la solución del problema de localización de 0.265 segundos.

CONCLUSIONES

Calcular la capacidad del CEDI por medio de una expresión matemática la cual involucra algunas de las características de los sistemas de almacenamiento, permite tener un acercamiento considerable a la necesidad de área real de los CEDIs capacitados ya que,

no basta solo con saber dónde localizar los CEDIs para cubrir las necesidades de los clientes, también es imprescindible saber cuál es la capacidad de los CEDIs localizados de acuerdo a la demanda que se desea cubrir y a las características de los productos. Esto con el objetivo de poder dar un servicio de mayor calidad, además de mejorar las operaciones dentro de la empresa.

Por otra parte, a través de los diferentes análisis de resultados y planteamientos de escenarios se identificó que el modelo localiza los centros de distribución de acuerdo a la mejor combinación entre los costos de transporte y arriendo. A su vez también se determinó que dependiendo de estos costos el modelo dimensiona las capacidades de los centros de distribución, cuando los costos de transporte y arriendo son más bajos en alguna ubicación el modelo asigna una mayor capacidad a ese centro de distribución, en cuanto estos aumentan, las capacidades disminuyen.

En algunos escenarios donde se variaron los parámetros se pudo observar que el modelo arrojaba capacidades exactas (500 m), esto se debe a que la demanda asignada a ese centro de distribución era tan baja, que la restricción de capacidad mínima asigna ese valor, a su vez esta capacidad mínima es un requisito para el correcto funcionamiento del sistema de almacenamiento.

A partir del escenario de alta variabilidad en los parámetros de entrada correspondientes a la demanda y con las 100 iteraciones pseudo-aleatorias generadas, se obtuvieron resultados válidos en todas las pruebas realizadas, lo cual indica que el modelo matemático planteado es robusto para escenarios con alta variación en la demanda.

REFERENCIAS

- [1] HESSE, Susan and DASKIN, Mark. Strategic facility location En: *A review. European Journal of Operational Research*. 1998 Vol. 111.3. p. 423-447.
- [2] TRAGANTALERNGSAK. suda, HOLT. John and Rônnqvist, Mikael. Theory and Methodology: An exact method for the two echelon, single-source, capacitated, facility location problem. En: *European journal of operational research* 2000 Vol 123. p. 473-489.
- [3] NOZICK, Linda K y TURNQUIST, M. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. En: *European Journal of Operational Research*. Vol 129.2 2001 p. 362-371.
- [4] CHOPRA, Sunil. Designing the distribution network in a supply chain. En: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2003. Vol. 39.2 p.123-140.

- [5] AMIRI, Ali. Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. En: *European journal of operational research*. 2006 Vol.171.2 p.567-576.
- [6] APONTE, Andrés y ROSAS, Paula. Propuesta de solución al problema de localización de centros de distribución basándose en la meta heurística GRASP. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingenierías. Departamento de Procesos Productivos. 2009. p. 124.
- [7] SUKUN. Park, TAE. Lee, Chang. Sung, a three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. En: *Transportation Research Part E: logistics and transportation review*. 2010. Vol 46. p. 563-581.
- [8] OLIVARES, BENÍTEZ, E. RÍOS, MERCADO, R. Z y GONZÁLEZ, Velarde, J. L. A. metaheuristic algorithm to solve the selection of transportation channels in supply chain design. En: *International Journal of Production Economics*. 2013. p.1-172.
- [9] KUNG, Jeng. C, -H, Lee. A revised ant algorithm for solving location-allocation problem with risky demand in a multi-echelon supply chain network. En: *Applied soft computing*. 2015. Vol 32. p. 311-322.
- [10] DIABAT, Ali. BATTAÏA, Olga y NAZZAL, Dima. An improved Lagrangian relaxation-based heuristic for a joint location-inventory problem. En: *Computers & Operational Research*. 2015. Vol. 61. p. 170-178.
- [11] DANE, Proyecciones de población municipales por área 2005-2020. Disponible en: www.dane.gov.co. [Recuperado el 06 de octubre de 2016]
- [12] SALDARRIAGA, R, Luis, Diego. Diseño optimización y gerencia de centros de distribución, almacenar menos distribuir más. Ed. Impresos Begon Ltda. Medellín. Vol. 1. (2012). p. 81-87.
- [13] MECALUX. Catálogo de soluciones MECALUX Almacenes con estanterías. Disponible en: www.mecalux.es. p. 4-18. [Citado el 28 de septiembre del 2016].
- [14] COORDINADORA, Tarifas e información general. En. <http://www.coordinadora.com/tarifas-e-informacion-general/> [Citado el 30 de septiembre del 2016].

