

UNIVERSIDAD EAN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN INGENIERÍA DE PROCESOS**

MODELO ESTRATÉGICO DE DISEÑO DE REDES HÍBRIDAS DE DISTRIBUCIÓN

AUTOR

ELSA CRISTINA GONZÁLEZ LA ROTTA

DIRECTOR

MILTON RUEDA PH.D.

CODIRECTOR

JAVIER ARTURO ORJUELA CASTRO PH.D.

BOGOTÁ, D.C., ABRIL DE 2022

“...Dedicado a Constanza: mi cómplice, mi ángel, que nunca perdió su fe en mí. Gracias por ser mi hermana...”

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a mi familia: a mi madre, a mi hermana, a mis hijos, a mi Juli preciosa, a Tomás, son el motor de mi vida.

A mi esposo René, no es fácil entender mi falta de tiempo y mal humor constante.

A mis más cercanos amigos, quienes siempre me han impulsado para que no abandone mis metas: Mauro, Johanna y Marthica.

A Javier Orjuela, Hugo, Milton y a Ivan, tienen ustedes una paciencia infinita

A la Universidad Católica de Colombia y a la Universidad EAN por su apoyo para la realización de la presente investigación.

A todos los que de una u otra manera han contribuido a que este proyecto se haya concluido.

RESUMEN

Esta tesis doctoral en ingeniería de procesos de la Universidad EAN presenta un modelo de diseño de redes de distribución de bienes que aborda la planeación en los niveles estratégico, táctico y operativo; considera la combinación de dos estrategias logísticas: el almacenamiento tradicional y el uso de plataformas *Cross-Docking*, estrategia que preserva inventario no más allá de 24 horas. A partir de una revisión sistemática de la literatura, se encontró la brecha descrita en el marco teórico. El modelo formulado se desarrolla en tres fases, en forma de cascada, al combinar las técnicas de decisión multicriterio y de inteligencia artificial, con (*Big-Data*) o análisis de grandes conjuntos de datos y programación lineal entera mixta. Lo que permite obtener una novedosa solución, al proponer dos modificaciones a algoritmos existentes, facilitadores de los procesos de planeación y toma de decisiones en los sistemas reales.

La aplicación fáctica del modelo propuesto, realizada en un operador logístico de cuarta generación 4PL, permitió identificar las condiciones bajo las cuales es posible la hibridación de enfoques de distribución y la de técnicas de solución. Posteriormente se ejecutaron diferentes escenarios, se establece el costo mínimo para ciertos niveles de respuesta y de servicio. Las salidas de esta etapa se constituyen en entrada de la etapa de ruteo, la cual se realizó con el algoritmo del árbol de mínima expansión y luego con un algoritmo de optimización.

Entre los principales aportes de la investigación se encuentran: las ventajas de agrupar clientes (*clustering*), pronosticar con técnicas de inteligencia artificial (redes neuronales) para planear la demanda, utilizar técnicas de *big data* para realizar planeación logística a largo plazo, combinar técnicas estadísticas y de optimización para realizar modelos de localización de instalaciones y rutear con combinaciones de algoritmos no especializados para este fin.

Palabras clave

Localización; programación; ruteo; distribución; inventarios; optimización; *Big Data*; *Cross-Docking*.

ABSTRACT

This doctoral thesis in process engineering from the EAN University presents a model for the design of final goods distribution networks that addresses their planning, from three levels: strategic, tactical, and operational. It also considers the combination of two logistics strategies such as: traditional storage and the use of exchange platforms, called Cross-Docking, a strategy that preserves inventory for no more than 24 hours. When reviewing the literature, a gap was found that is properly described in the theoretical framework. The formulated model is developed in three phases, in the form of a cascade, combining different techniques: multi-criteria decision techniques, analysis of Big-Data, artificial intelligence techniques and mixed integer linear programming, thus, obtaining a novel solution, in which two modifications to existing algorithms are proposed, drivers of planning processes and decision making in real systems.

The practical application of the proposed model, carried out in a fourth generation 4PL logistics operator, allowed identifying the conditions under which the hybridization of distribution approaches and solution techniques is possible. Subsequently, the conditions were established under which the cost is minimum for a certain level of response and level of service, this point was obtained after running different scenarios. The outputs of this stage constitute the input of the routing stage, which was performed with the minimum spanning tree algorithm and then with an optimization algorithm.

Among the main contributions of this work, we can mention: the advantages of client clustering, forecasting with artificial intelligence techniques like neural networks to plan demand, the use of big data techniques to carry out logistics planning through long term, the combination of statistics and optimization. Techniques to perform facility location and routing models with a combination of non-specialized algorithms for this purpose.

Keywords

Location; programming; routing; distribution; inventories; optimization; Big Data; Cross-Docking.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 13 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE..... | 20 |
| 2.1 Cadena de Suministro (Supply Chain)..... | 21 |
| 2.1.1. Concepto de Supply Chain | 23 |
| 2.1.2 Procesos que Componen la Cadena de Suministro | 24 |
| 2.1.3 Actores de la cadena de Suministro..... | 25 |
| 2.1.4 Gestión de la Cadena de Suministro..... | 25 |
| 2.2 Sistemas Logísticos..... | 26 |
| 2.2.1 Generalidades | 28 |
| 2.2.2 Estrategias de Modelamiento | 29 |
| 2.2.2.1 Métodos de Optimización y Heurísticos..... | 29 |
| 2.2.2.2 Análisis de Grandes Conjuntos de Datos (Big-Data) | 29 |
| 2.3 Distribución..... | 31 |
| 2.3.1 Redes de Distribución y Localización | 36 |
| 2.3.1.1 Modelos de Localización con Programación Entera Mixta (MIP)..... | 38 |
| 2.3.2 Plataformas de Intercambio (<i>Cross-Docking</i>)..... | 41 |
| 2.3.2.1 Concepto de Cross-Docking..... | 42 |
| 2.3.2.2 Funcionamiento del Cross-Docking | 44 |
| 2.3.2.3 Tipos de Cross-Docking | 46 |
| 2.3.2.4 Estado del Arte de Cross-Docking..... | 49 |
| 2.3.3 Ruteo de Vehículos..... | 56 |
| 2.3.3.1 Formulación | 56 |
| 2.3.3.2 Origen | 56 |
| 2.3.3.3 Taxonomía de los Problemas Tipo V.R.P..... | 57 |
| 2.3.4 Transporte..... | 59 |
| 2.4 Modelos de Gestión de Inventarios..... | 60 |
| 2.4.1 Modelos Deterministas para el Control de Inventarios | 62 |
| 2.4.2 Modelos Estocásticos para el Control de Inventarios..... | 62 |
| 2.4.3 Esquemas de Gestión de Inventarios y Distribución por Terceros..... | 63 |

| | |
|---|----|
| 2.4.4 Problema de Ruteo e Inventarios..... | 63 |
| 2.4.5 Inventory Routing Problem Y Cross-Docking..... | 71 |
| 2.5 Modelo de Inventarios Administrados por el Proveedor (<i>Vendor Management Inventory V.M.I.</i>)..... | 72 |
| 2.6 Almacenamiento..... | 73 |
| 3. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN | 76 |
| 3.1 Problema de Investigación | 76 |
| 3.2 Objetivos de Investigación..... | 80 |
| 3.2.1 Objetivo General | 80 |
| 3.2.2 Objetivos Específicos | 81 |
| 3.3 Hipótesis de Investigación | 81 |
| 4. METODOLOGÍA | 84 |
| 4.1 Fase I: Estratégica..... | 85 |
| 4.2 Fase II: Táctica..... | 87 |
| 4.3 Fase III: Ruteo, Programación y Asignación | 89 |
| 5. MODELO..... | 94 |
| 5.1 Fase Estratégica..... | 94 |
| 5.1.1 Localizaciones Factibles..... | 94 |
| 5.1.1.1 Índices..... | 94 |
| 5.1.1.2 Parámetros..... | 94 |
| 5.1.1.3 Variables de Análisis | 95 |
| 5.1.1.4 Modelo | 95 |
| 5.1.2 Clúster de Clientes..... | 96 |
| 5.1.2.1 Índices..... | 96 |
| 5.1.2.2 Parámetros..... | 96 |
| 5.1.2.3 Variables de Análisis | 96 |
| 5.1.2.4 Algoritmo Propuesto..... | 96 |
| 5.1.3 Pronóstico de Demanda..... | 97 |
| 5.1.4 Modelo Estratégico-Táctico | 98 |
| 5.1.4.1 Supuestos del Modelo | 98 |
| 5.1.4.2 Índices..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.4.3 Conjuntos | 100 |
| 5.1.4.4 Parámetros..... | 100 |
| 5.1.4.5 Variables | 103 |
| 5.1.4.6 Función Objetivo | 104 |
| 5.1.4.7 Restricciones..... | 105 |
| 5.2 Fase Operativa: Rutas, Programación y Asignación En de Cada Clúster..... | 107 |
| 5.2.1 Modelo Propuesto para Programación y Asignación Rutas | 108 |
| 5.2.2 Algoritmo Propuesto para Rutas y Asignación de Vehículos | 109 |
| 6. RESULTADOS..... | 112 |
| 6.1 Objeto Fáctico | 112 |
| 6.2 Fase Estratégica..... | 113 |
| 6.2.1 Localizaciones Factibles..... | 113 |
| 6.2.2 Configuración de Clúster de Clientes..... | 117 |
| 6.2.3 Cálculo de Centroides..... | 119 |
| 6.2.4 Pronóstico de Demanda..... | 119 |
| 6.3 Fase Estratégica-Táctica..... | 123 |
| 6.4 Fase Operativa: Rutas, Programación y Asignación En de Cada Clúster..... | 126 |
| 6.5 Comparación Escenarios Actual Vs Propuesta | 127 |
| 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 134 |
| 7.1 Localización de Instalaciones Logísticas | 134 |
| 7.2 Planeación de la Demanda | 135 |
| 7.3 Hibridación de Instalaciones Logísticas..... | 137 |
| 7.4 Impacto en las Medidas de Desempeño | 138 |
| 7.5 Diseño de Rutas de Entrega a Clientes..... | 139 |
| 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 142 |
| 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 145 |
| 10. APÉNDICES..... | 176 |

LISTA DE TABLAS

| | PÁG. |
|--|------|
| Tabla 1.1. Referentes Teóricos Consultados para el Modelo | 15 |
| Tabla 2.1. Ventajas de Cross-Docking Frente a Otros Métodos de Distribución Física | 45 |
| Tabla 2.2. Pertinencia del Cross-Docking | 45 |
| Tabla 2.3. Configuraciones de Red para Cross-Docking..... | 48 |
| Tabla 2.4. Niveles de Decisión para Cross-Docking | 48 |
| Tabla 2.5. Tipos de VRPCD y Métodos de Solución | 53 |
| Tabla 2.6. Clasificación Propuesta..... | 70 |
| Tabla 3.1. Acciones a Planear en el Diseño de Redes de Distribución | 78 |
| Tabla 6.1. Datos de los Criterios de Análisis..... | 115 |
| Tabla 6.2. Vector de Criterios Priorizados..... | 116 |
| Tabla 6.3. Priorización de Alternativas..... | 116 |
| Tabla 6.4. Número de K-medias | 118 |
| Tabla 6.5. Resumen de Procesamiento de Casos | 119 |
| Tabla 6.6. Importancia de las Variables Independientes | 120 |
| Tabla 6.7. Resumen del Modelo | 120 |
| Tabla 6.8. Pronóstico de demanda agregada en COP | 122 |
| Tabla 6.9. Medidas de Desempeño Situación Actual | 124 |
| Tabla 6.10 Resultados Obtenidos Propuesta..... | 125 |
| Tabla 6.11. Envío de Mercancías desde los Puertos Hasta Almacenes | 125 |
| Tabla 6.12. Envío de Mercancías desde Almacenes Hasta Destinos (Cantidades en COP E+ 10)..... | 126 |
| Tabla 6.13. Resultados Ruteo por Clústeres | 127 |
| Tabla 6.14. Resultados Comparación Escenarios Actual vs Propuesta | 127 |
| Tabla 6.15. Resultados Test de Comparación de Medias | 129 |
| Tabla 6.16. Salidas Diferentes Ejecuciones del Modelo con Diferentes Parámetros | 130 |
| Tabla 6.17. Resultados Niveles de Servicio vs. Costo Logístico..... | 130 |
| Tabla 6.18. Resultados Nivel de Servicio vs Tiempo de Respuesta..... | 131 |
| Tabla 6.19. Resultados Nivel de Servicio vs Relación Beneficio/Costo | 131 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 2.1. Estrategia General de Construcción Marco Teórico | 20 |
| Figura 2.2. Tópicos Relacionados con Supply Chain | 21 |
| Figura 2.3. Trabajos publicados sobre SC (2000-2020) | 21 |
| Figura 2.4. Análisis bibliométrico Supply Chain..... | 22 |
| Figura 2.5. Matriz de Planeación en la Cadena de Suministro | 24 |
| Figura 2.6. Áreas Relacionadas con L.S. | 26 |
| Figura 2.7. Trabajos Publicados S.L. (2000-2020)..... | 27 |
| Figura 2.8. Análisis Bibliométrico S.L. | 27 |
| Figura 2.9. Áreas Relacionadas con el Término "Distribution" | 31 |
| Figura 2.10. Trabajos Publicados "Distribution" (2000-2020)..... | 32 |
| Figura 2.11. Análisis Bibliométrico "Distribution" | 32 |
| Figura 2.12. Análisis Bibliométrico Distribution Network | 33 |
| Figura 2.13. Clasificación Cross-Docking..... | 46 |
| Figura 2.14. Áreas Relacionadas con el Término "Inventory" | 60 |
| Figura 2.15. Trabajos Publicados "Inventory" (2000-2020)..... | 61 |
| Figura 2.16. Análisis Bibliométrico "Inventory" | 61 |
| Figura 2.17. Configuración de una Red Logística | 64 |
| Figura 4.1. Fases para Plantear el Modelo | 85 |
| Figura 4.2. Proceso Fase Estratégica | 86 |
| Figura 4.3. Fase Táctica | 88 |
| Figura 4.4. Fase Operativa | 89 |
| Figura 4.5. Diagrama de Flujo de la Metodología de Fase I..... | 91 |
| Figura 4.6. Diagrama de Flujo de la Metodología de Fases II y III..... | 92 |
| Figura 5.1. Flujos de la Red | 98 |
| Figura 6.1. Diagrama de Pareto para Entregas | 114 |
| Figura 6.2. Indicador de Distancia..... | 118 |
| Figura 6.3. Diagrama de la Red Neural de Pronóstico Demanda | 121 |
| Figura 6.4. Colombia Importaciones Totales Según Grupos de Productos OMC a Partir de la Agregación CUCI Rev.3 | 122 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.5. Esquema de Dicha Distribución Actual | 123 |
| Figura 6.6. Red de Distribución Propuesta por el Modelo | 124 |
| Figura 6.7. Diagrama de Cajas y Bigotes Análisis de Niveles de Servicio | 128 |
| Figura 6.8. Gráfica Nivel de Servicio vs Costo Total Logístico..... | 130 |
| Figura 6.9. Nivel de Servicio vs Tiempo de Respuesta | 131 |
| Figura 6.10. Gráfica Nivel de Servicio vs Relación Beneficio/Costo | 131 |

LISTA DE APÉNDICE

| | Pág. |
|--|------|
| Apéndice A. Imagen de la Base de Datos Original (2020)..... | 176 |
| Apéndice B. Técnica de Pareto..... | 177 |
| Apéndice C. Cálculos de AHP..... | 178 |
| Apéndice D. Análisis Estadístico de Datos de Entrada | 181 |
| Apéndice E. Análisis Clúster | 183 |
| Apéndice F. Conformación de Clústeres $k=12$ | 185 |
| Apéndice G. Procedimiento de la Conformación de los Centroides | 186 |
| Apéndice H. Procedimiento de la Red Neuronal..... | 192 |
| Apéndice I. Pronóstico para Cada Clúster | 196 |
| Apéndice J. Parámetros del Modelo Propuesto | 197 |
| Apéndice K. Código GAMS Modelo Propuesto..... | 203 |
| Apéndice L. Resultados Modelo Actual..... | 204 |
| Apéndice M. Resultados de Clúster 1..... | 205 |
| Apéndice N. Resultados de Clúster 2 | 206 |
| Apéndice O. Resultados de Clúster 4 | 218 |
| Apéndice P. Resultados de Clúster 5 | 220 |
| Apéndice Q. Resultados de Clúster 6 | 221 |
| Apéndice R. Resultados de Clúster 7..... | 222 |
| Apéndice S. Resultados de Clúster 8..... | 223 |
| Apéndice T. Resultados de Clúster 9..... | 224 |
| Apéndice U. Resultados de Clúster 10 | 225 |
| Apéndice V. Resultados de Clúster 11 | 226 |
| Apéndice W. Análisis de Salida y Escenarios | 227 |

1. INTRODUCCIÓN

El propósito de la investigación en esta tesis doctoral en el campo del diseño de redes de distribución fue combinar dos técnicas de almacenamiento: el tradicional y el que sucede a través de plataformas de intercambio o *Cross-Docking*. Dichos sistemas de preservación y organización de inventarios tienen dos formas de operación complementarios. Los centros de distribución, como técnica tradicional, tienen operaciones unitarias que contemplan: el descargue de vehículos, la ubicación en estantes, la organización de órdenes y el alistamiento de carga nuevamente en vehículos, uno de sus objetivos consiste en garantizar un nivel de servicio que permita atender variaciones de la demanda (Song y Cao, 2019; Yu et al., 2020). Por su parte, las plataformas *Cross-Docking* se conciben como instalaciones donde hay un cruce rápido o intercambio de configuración de la carga, al convertir unidades macro a otras de menor dimensión solicitadas por el cliente final, su objetivo es rapidez en la operación (Ladier & Alpan, 2016; Yazdani et al., 2015). Es importante precisar aquí que, en la revisión de la literatura, sólo se encontró una fuente bibliográfica que contempla ambas modalidades de instalaciones logísticas (Pourhossein, 2014); no obstante, su enfoque es netamente teórico y no exhibe resultados de aplicación en un sistema real. Lo anterior ratifica la necesidad de avanzar en el diseño de redes híbridas, puesto que combinan ambos tipos de almacenamiento y asegura la preservación de los productos, la atención a la variación de la demanda y rapidez en la operación, así mismo, encontrar la frontera eficiente costo-respuesta que todo sistema de cadena de suministro debe garantizar (Chopra & Meindl, 2013).

Esta investigación se plantea, el interrogante: ¿Cómo garantizar el cumplimiento de las órdenes a los clientes, su tiempo de entrega y a la vez ser eficiente en costo en el proceso de distribución física? Para dar respuesta a ello se requiere un análisis riguroso de todos los factores que componen la promesa de servicio y a su vez los elementos que incrementan el costo (Huang & Goetschalckx, 2014; Palacio et al., 2018; Ransikarbum & Mason, 2016).

Otro aspecto importante, es la integración de la planeación a lo largo, mediano y corto tiempo, estudiado por varios autores en logística. (Igoulalene et al., 2015; Keskin et al., 2010; Zhang et al., 2016) resaltan la dificultad para integrar estos estadios estratégico, táctico y operativo en una sola formulación. En la literatura se encuentran publicaciones donde hay sinergias entre la planeación (largo plazo), la programación (mediano plazo) y el día a día (corto plazo), por parejas de lapsos

de tiempo; pero no se encuentran aquellos que contemplen los tres estadios (largo, mediano y corto plazo), de manera simultánea. Con todo lo anterior, el problema a considerar tiene los elementos ya enunciados: combinación de estrategias de localización, almacenamiento y ruteo en diferentes estadios de tiempo.

Consecuentemente, el objetivo general de la investigación se orienta a formular un modelo de red híbrida; que para esta investigación es aquella combinación de instalaciones logísticas tradicionales con *cross-docking*, en distintas ubicaciones, de tal manera que mejoren el costo, el servicio y el cumplimiento a los pedidos del cliente. Se tuvieron en cuenta los procesos logísticos de distribución y almacenamiento; en las etapas de planeación estratégica, táctica y operativa, para evidenciar las oportunidades de mejora.

Los objetivos específicos por su parte; se orientaron primero en establecer un estado del arte que permitiera identificar las distancias en la aplicación de las dos técnicas de almacenamiento; segundo, se proponen formulaciones matemáticas que consideran los diferentes estadios de la planeación de redes de distribución de bienes; tercero, se establece un conjunto de técnicas combinadas que permitieran el manejo de grandes conjuntos de datos, estrategias de decisión y la optimización del costo logístico; cuarto, se analizan diferentes escenarios de respuesta; y finalmente, se validó el modelo mediante la utilización de técnicas estadísticas de comparación.

La hipótesis principal de investigación define que: se presentan mejores indicadores de desempeño en un entorno multi objetivo y de diversos estados de decisión, cuando se configura una red de distribución, en la que se consideren al mismo tiempo terminales *Cross-Docking* y bodegas de almacenamiento tradicionales.

Las hipótesis secundarias formuladas son: al utilizar diferentes tipos de instalaciones, se mejoran indicadores de costo, rapidez; seguido de ello, definir que, es posible integrar los procesos de distribución y almacenamiento en una sola formulación, obteniendo más bajos costos; y finalmente, comprobar si los métodos alternativos ofrecen soluciones más eficientes en términos computacionales para este tipo de problemas específicos, frente a los métodos tradicionales de optimización. Es importante precisar aquí, que para las soluciones propuestas en la verificación de la hipótesis se debió reducir su complejidad y simplificarse en la medida posible, puesto que este tipo de formulaciones de variables positivas con variables binarias, son *non polynomial hard* o *np-*

hard, como se les conocen en la literatura (Carlo et al., 2017; Hasani-Goodarzi & Zegordi, 2016; Küçüköğlü & Öztürk, 2014; Mohammadi-Bidhandi et al., 2009).

En concordancia con lo enunciado anteriormente, la metodología de la investigación aplicada para resolver la situación problema, se centró en el tipo de estudio cuantitativo, donde se abarcan fases de solución que se corresponden con los horizontes de tiempo a largo, mediano y corto plazo. Dichas fases se detallaron de tal manera que detallaran actividades referentes a la planeación en distribución para cada una y finalmente, condujeran a la resolución de los objetivos de investigación.

La propuesta de modelamiento se basó en variadas técnicas, derivadas de la revisión algunos referentes, que se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Referentes Teóricos Consultados para el Modelo

| Fase Propuesta | Autores |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Fase I: estratégica | Ahmadi-Javid & Hoseinpour, 2015 |
| | Amiri, 2006 |
| | Ballou, 2004 |
| | Bosona & Gebresenbet, 2011 |
| | Chang et al., 2017 |
| | Chopra & Meindl, 2007 |
| | Ganesan, 2015a |
| | Ko et al., 2006 |
| | S. Y. Liu et al., 2013 |
| | Marmolejo et al., 2016 |
| | Y. Y. Wang et al., 2018 |
| | J. Yang, 2017 |
| | Yener & Yazgan, 2019 |
| | Peker et al., 2016 |
| | Sumrit, 2020 |
| Maheshwari, Gautam, & Jaggi, 2020 | |
| Fase II: Táctica | Ballou, 2004 |
| | Chase et al., 2009 |
| | Disney & Lambrecht, 2007 |
| | Donath et al., 2002 |
| | Escobar, 2012 |
| | Ivanov et al., 2014 |
| Kalcsics et al., 2010 | |

Tabla 1.1. Referentes Teóricos Consultados para el Modelo (Continuación)

| Fase Propuesta | Autores |
|------------------------|---|
| Fase II: Táctica | Perea et al., 2009 |
| | Schimchi-Levi et al., 1997 |
| | Taylor, 2008 |
| | Thanh et al., 2008 |
| | Torres & Villegas, 2013 |
| | Christian Alexander Ullrich, 2013 |
| | Teng, Zhang, Li, & Gong, 2019 |
| | Fathollahi-Fard, Ranjbar-Bourani, Cheikhrouhou, & Hajiaghaci-Keshteli, 2019 |
| | Palacio, Adenso-Díaz, & Lozano, 2018 |
| | Orjuela Castro, 2018 |
| Fase III: operativa | Bertazzi et al., 2013 |
| | Chien, T., Balakrishnan, A., Wong, 1989 |
| | Dondo & Cerdá, 2015 |
| | Dondo et al., 2011 |
| | Kleywegt et al., 2002 |
| | Kwak et al., 2009 |
| | Y. H. Lee et al., 2006 |
| | Pourhossein, 2014 |
| Santos et al., 2011 | |
| Van Belle et al., 2012 | |

Fuente. Elaboración propia

Respecto a la aplicación práctica de los modelos matemáticos diseñados, es importante considerar que, Colombia es un país con enormes retos a nivel de infraestructura logística (Baquero et al., 2020), con una problemática de atraso en el desarrollo de vías 4G , pues según la Agencia Nacional de Infraestructura, solamente en 22 de 29 de ellas propuestas se está avanzando en su construcción; con una distribución unimodal donde aproximadamente el 80% de los productos se mueven por carretera y con costos logísticos reportados en la encuesta nacional de transporte, que ascienden al orden del 12,6% del porcentaje de ventas Departamento Nacional de Planeación DNP (2021). Estos desafíos impulsan la generación de propuestas investigativas de solución, con el fin de eliminar progresivamente las barreras, a partir de modelos que propendan por el mejoramiento de los tiempos de operación y mejoramiento de la eficiencia en costo, a través de la planeación a corto, mediano y largo plazo y, la aplicación de diferentes formulaciones teóricas con las respectivas adecuaciones a la economía y en el contexto nacional.

Los datos, parámetros y variables, como fuente primaria de datos de esta investigación se obtuvieron de un operador logístico de cuarta generación o 4PL (*Fourth Party Logistics*), en el

que se caracterizaron las medidas de desempeño utilizadas en sus procesos. Los datos fueron extraídos de las salidas del ERP (*Enterprise Resourcing Planning*) corporativo, los cuales se adecuaron y sistematizaron estadísticamente de acuerdo con la rigurosidad exigida en este tipo de investigaciones. De otra parte, se realizaron varios “*clúster*” o grupos, acción que se denominará para efectos de esta tesis y como se acepta cotidianamente en ingeniería “*clusterizar*” o agrupar clientes, esto reduce la complejidad de los problemas de optimización en logística al reunir adecuadamente dichos clientes, de acuerdo con sus características comunes más sobresalientes. Estrategia que genera mejoras significativas en el costo y en los niveles de atención y satisfacción de los clientes de los operadores logísticos (Wang et al., 2014).

La estrategia de modelamiento se desarrolla de manera completa en el capítulo 5, a partir de fases para cada una de las etapas de planeación: La estratégica o de largo plazo, utiliza técnicas de análisis jerárquico de procesos; pronósticos con redes neuronales, *clustering* de clientes y *big data*, para la exploración de grandes conjuntos de datos; esto con el fin de reconocer los mejores sitios para las posibles localizaciones y el tamaño, así como, el tipo de instalaciones potenciales para la red de distribución. En el ámbito estratégico-táctico, se propone un modelo de programación entera mixta para escoger las instalaciones que componen la red, las cantidades a enviar, los niveles de inventario, las cantidades en déficit, los tiempos de respuesta y el costo de distribución de la red. Finalmente, en el estadio operativo, se plantea un modelo de rutas de entrega de mercancía que cumple con las restricciones de demanda y de capacidad de los vehículos.

En el capítulo sexto se desarrolla la estrategia de solución, para cada una de las etapas: estratégico, táctico y operativo. Se aplican las técnicas propuestas para la solución de los modelos planteados en el capítulo 5. Para el modelo de programación entera mixta se utilizó el software GAMS®, con el propósito de obtener todas las salidas que componen el estadio de lo estratégico-táctico. Esta aplicación resulta interesante por su versatilidad al conjugar en una sola formulación, diferentes períodos de tiempo y variados parámetros que componen una gran cantidad de información, primordial para la planeación de la distribución.

También se aplica el algoritmo del árbol de mínima expansión para el ruteo de vehículos y finalmente un algoritmo sencillo de optimización para encontrar la cantidad óptima de vehículos requeridos según su capacidad y cantidades demandadas en los puntos de entrega. De acuerdo con los objetivos propuestos, se realiza la comparación de escenarios de respuesta y la contrastación

estadística de los mismos, utilizando pruebas de medias para las medidas de desempeño planteadas desde un comienzo en las hipótesis: costo total de la distribución, tiempo de respuesta y nivel de servicio.

El séptimo capítulo es la discusión de resultados; comparando los hallazgos de este trabajo con la literatura consultada y se realizan los respectivos análisis y disertaciones para describir las explicaciones pertinentes de acuerdo con las aplicaciones fácticas realizadas.

El octavo capítulo presenta las conclusiones alrededor de los hallazgos obtenidos en el nivel general de la investigación. Se hace énfasis sobre como validar la hipótesis, bajo ciertos parámetros y/o condiciones, así como, combinar el uso híbrido de instalaciones, puede redundar en ahorros importantes en costos, así como en la reducción de tiempos de entrega y con ello se resalta la importancia de mezclar diferentes técnicas de solución para dar respuesta a los grandes retos de la logística moderna.

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

2. MARCO CONCEPTUAL Y ESTADO DEL ARTE

En el marco teórico de la presente tesis se construye un estado del arte acerca de diferentes conceptos relacionados, tales como: cadenas de suministro, sistemas logísticos, distribución e inventario; elementos generadores del problema de investigación. En la Figura 2.1 se puede observar un mapa conceptual de los principales componentes. En el nivel superior, se encuentran los términos principales ya mencionados. A cada uno de dichos términos le corresponde una pregunta. De cada uno de estos tópicos generadores, se desprenden conceptos que se van a desarrollar de manera secuencial, entendiendo que se corresponden con diferentes métodos, técnicas, enfoques y teorías que se han desplegado a medida que se ha avanzado en dicha temática. En la parte inferior, se establecen tres criterios relacionados con los posibles resultados obtenidos: aplicabilidad, entorno y nivel estratégico. La aplicabilidad se refiere a los posibles objetos fácticos sobre los que se estudiará el tema, acá aparecen los operadores de cuarta generación (4PL), el transporte entendido como una actividad y el equilibrio costo beneficio (*trade-off*) en las operaciones. El entorno se refiere a las condiciones actuales en los que se generarán las soluciones del modelo. Finalmente, la planeación pensada como un ejercicio a desarrollar en diferentes estadios de tiempo.

Para cada concepto, temática o aspecto a desarrollar, se utilizan tres herramientas de análisis y medición: *Scopus*, *Web of Science* y *VOSviewer* (herramienta de software gratuita), con los que se presenta un estado del arte de cada uno de los mismos, teniendo como ventana de tiempo las últimas dos décadas (2000-2020) y así mismo identificando tendencias y brechas de conocimiento.

Figura 2.1. Estrategia General de Construcción Marco Teórico

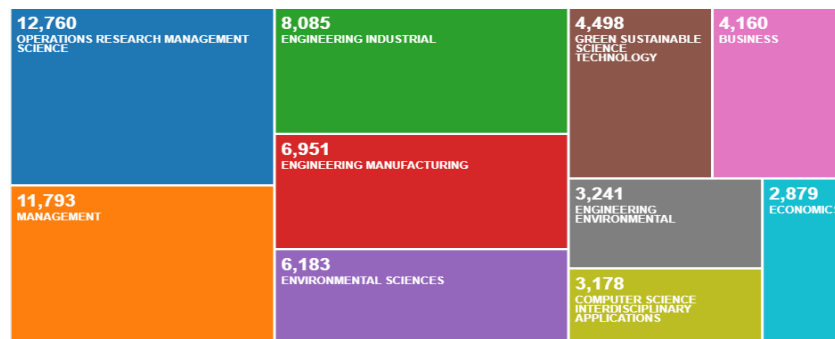


Fuente. Elaboración propia

2.1 Cadena de Suministro (Supply Chain)

El término cadena de suministro sugiere todos y cada uno de los pasos relacionados con la obtención de un producto y/o servicio para un consumidor. Es de una amplitud considerable la cantidad de trabajos y las diferentes corrientes que toma cada uno de ellos. En la búsqueda inicial, se obtiene la Figura 2.2, que muestra las principales áreas relacionadas con cadena de suministro (*Supply Chain*), los principales tópicos son investigación de operaciones; administración; ingeniería industrial y de manufactura; y ciencias del medio ambiente.

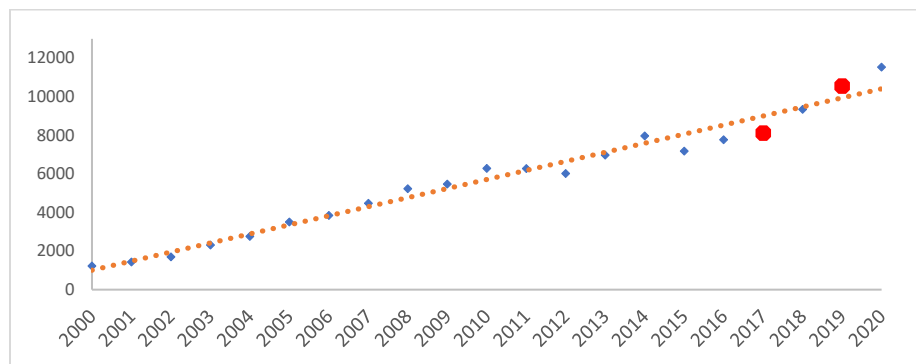
Figura 2.2. Tópicos Relacionados con Supply Chain



Fuente. Elaboración a partir de Web of Science

Por el contrario, las temáticas con menos incidencia hacen referencia a *Supply Chain* con las ciencias sociales y humanidades. Si se analiza el interés con respecto a la cadena de suministro, comparándolo respecto al tiempo, la Figura 2.3 presenta el número de trabajos presentados entre el 2000 y 2020. Se observa claramente un mayor interés por el tema de cadenas de suministro entre el 2017 y 2020, la tendencia es positiva ascendente, por lo cual se puede afirmar que el número de investigaciones relacionadas seguirá en aumento en los próximos años.

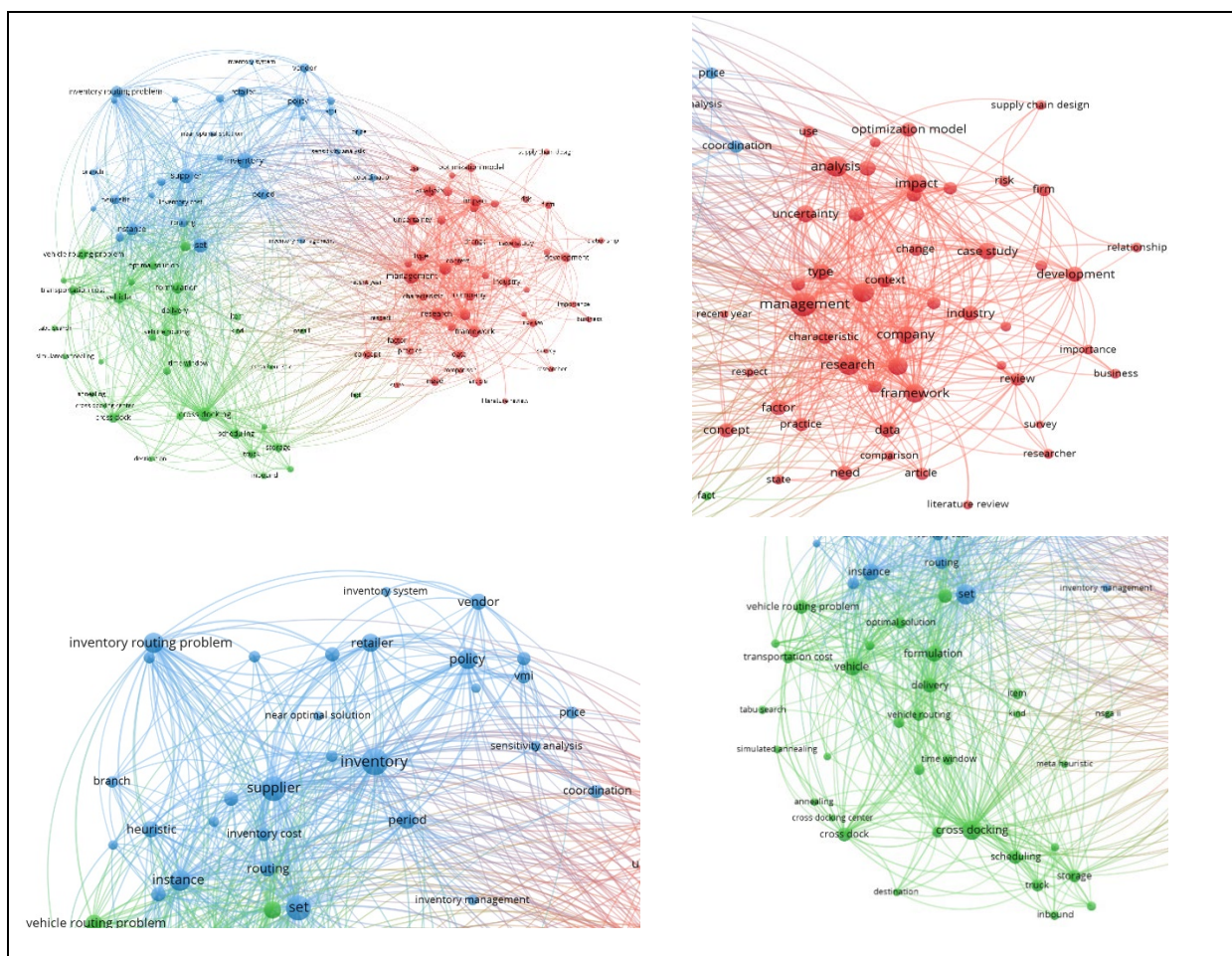
Figura 2.3. Trabajos publicados sobre SC (2000-2020)



Fuente. Scopus

La exploración cualitativa, Figura 2.4, presenta las relaciones entre diferentes términos que tienen coincidencia en el *abstract*, palabras claves o título. Se pueden observar claramente 3 clúster en los que se asocian por mayor fuerza de relacionamiento las palabras. El grupo azul tiene una mayor incidencia en temas de inventario, al enunciar términos tales como: *inventory routing*, *vendor*, *supplier*, *cost*. El conjunto rojo hace un fuerte énfasis en los modelos de gestión de *Supply Chain*. Finalmente, el color verde sugiere una amplia relación con procesos de distribución, al relacionar palabras tales como: *delivery*, *vehicle routing*, *transport*, *Cross Docking*, *Scheduling*, *Storage*.

Figura 2.4. Análisis bibliométrico Supply Chain



Fuente. Elaboración a partir de Vosviewer

De acuerdo con el análisis bibliométrico realizado, en esta sección se abordarán los conceptos de: cadena de suministro, procesos, actores, incertidumbre y toma de decisiones.

2.1.1. Concepto de Supply Chain

El concepto de cadena de suministro se ha abordado desde diferentes enfoques y vertientes. A continuación, se desarrollarán algunos de los más relevantes para los objetivos de esta tesis.

La cadena de suministro se define como aquella que inicia con materiales no procesados y termina con el cliente final haciendo uso de los productos terminados, además une muchas compañías. El material y la información son intercambiados en el proceso logístico desde la adquisición de materias primas hasta la distribución de productos para el usuario final. Todos los proveedores de materiales, proveedores de servicios y clientes son unidos en la cadena de suministro (Council of Supply Chain Management Professionals CSCMP, 2013).

De manera más concreta, la cadena de suministro está formada por todas aquellas partes interesadas de manera directa o indirecta que propenden por la satisfacción de un requerimiento de un cliente (Chopra & Meindl, 2007).

Otro enfoque explica la cadena de suministro como una red de organizaciones ligadas aguas arriba (proveedores) y aguas abajo (clientes), en los diferentes procesos y actividades que producen valor en forma de productos y servicios finales para uso de los consumidores (Stadtler & Kilger, 2008).

También puede ser considerada como una red orientada principalmente hacia las actividades individuales que participan en la producción de bienes y servicios a los clientes. Las operaciones involucradas pueden ser de fabricación, de diseño, legales, comerciales o de otra índole que contribuyen al flujo de bienes y servicios (Hopp, 2003).

Una definición que recoge lo anterior, describe la cadena de suministro como aquella formada por un conjunto de proveedores, productores, fabricantes, comerciantes y consumidores. Con un enfoque de integración de sus procesos de aprovisionamiento, manufactura, almacenamiento y distribución, así como la gestión de capacidades para la entrega oportuna a clientes y consumidores, aplicando la tecnología que garantice el intercambio continuo de información (Orjuela-Castro, 2018).

Para esta tesis, la autora propone una definición de cadena de suministro como el conjunto de todos aquellos actores que intervienen en la satisfacción de una necesidad de un cliente, sean estos: productores, fabricantes, proveedores, comerciantes y consumidores; los cuales a través de la

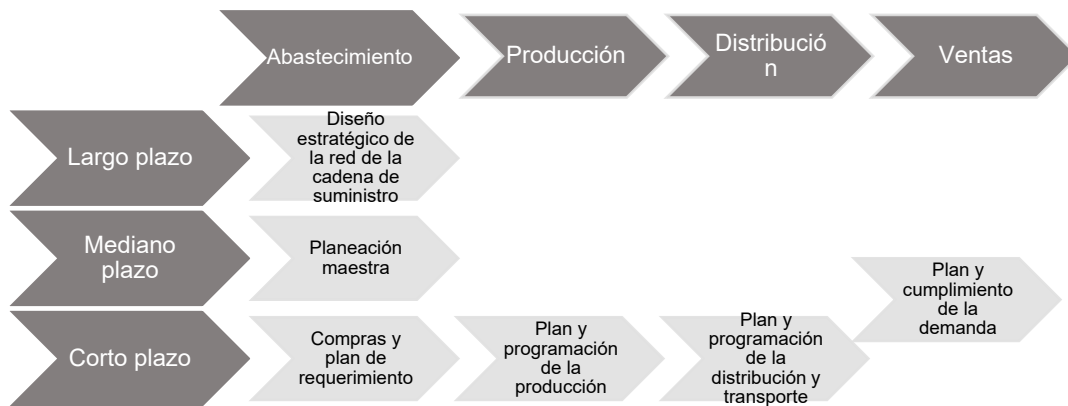
integración de sus procesos de aprovisionamiento, fabricación, almacenamiento, distribución, inventarios y acompañamiento al cliente; permiten atender dicha necesidad en tiempo, costo y oportunidad; garantizando la gestión eficiente de la tecnología y la información y agregando valor en cada una de las diferentes etapas (Orjuela-Castro, 2018).

Al ser un concepto que involucra tantos aspectos, se hace necesario determinar otras nociones relacionadas con cadena de suministro, tales como: actores de la cadena, procesos de la cadena y toma de decisiones en la misma.

2.1.2 Procesos que Componen la Cadena de Suministro

Es necesario observar la cadena de suministro desde dos perspectivas con el fin de determinar sus procesos constitutivos: una inter-organizacional, que consiste en una red de compañías que integra proveedores, fabricantes, bodegas y tiendas y que permite fabricar y distribuir un producto o familias de productos, exige integración y coordinación entre varias compañías. La otra perspectiva es la intra-organizacional que entiende la cadena al interior de la misma compañía y es esquematizada en la Figura 2.5. Esta gestión intra-organizacional de la compañía exige la integración y coordinación de las actividades internas de la compañía.

Figura 2.5. Matriz de Planeación en la Cadena de Suministro



Fuente. Elaboración a partir de Ullrich, 2013

La fila inferior de la Figura 2.5, indica los procesos relacionados con el flujo de material y la primera columna el horizonte de tiempo. En el nivel del largo plazo, deben determinarse las capacidades, modos de transporte, relacionamiento estratégico con otras compañías, ubicaciones de plantas y almacenes. Estas decisiones deben ser tomadas simultáneamente. En el mediano plazo, se decide sobre las cantidades de producción a asignar a los sitios de procesamiento, ajuste

de capacidades, identificar cuellos de botella y contratación de terceros logísticos. En el corto plazo, se requiere planear y comprar materiales, planear y programar la producción, planear y programar la distribución y el transporte. Es importante resaltar que la planeación y cumplimiento de la demanda se ejecutan en una ventana de tiempo intermedia entre el mediano y corto plazo (Ullrich, 2013).

2.1.3 Actores de la cadena de Suministro

Los actores de la cadena de suministro pueden ser de manera sencilla: sus proveedores, su compañía y sus clientes; de manera extendida la red está conformada por los proveedores de sus proveedores, su compañía, los clientes de sus clientes y los proveedores de servicios logísticos. Estos se desempeñan en áreas tales como: transporte, almacenamiento, finanzas, investigación de mercados, diseño de nuevos productos, información, comunicación y tecnología; generando unos niveles de relacionamiento importantes que influyen en el desempeño logístico de la compañía (Scott et al., 2011).

Para este caso en particular, en cuanto a los actores de la cadena: se abordará el proveedor de servicios logístico 4PL como objeto práctico de estudio, mediando la operación logística, en los eslabones de fabricante y mayorista (distribuidores y detallistas).

2.1.4 Gestión de la Cadena de Suministro

La gestión de la cadena de suministro o *Supply Chain Management*, abarca la planeación y administración de todas las actividades involucradas en el suministro y compra, adecuación y toda la gestión de actividades logísticas. De manera importante, también incluye la coordinación y colaboración con los socios de canal; que pueden ser proveedores, intermediarios, terceros proveedores de servicios y clientes. En esencia, la gestión de la cadena de suministro integra gestión de la oferta y la demanda al interior y fuera de la compañía (CSCMP, 2013).

Entre las decisiones más relevantes en la gestión de la cadena de suministro, la literatura menciona los siguientes cuestionamientos que debe responder cualquier organización si se quiere una cadena de suministro competitiva:

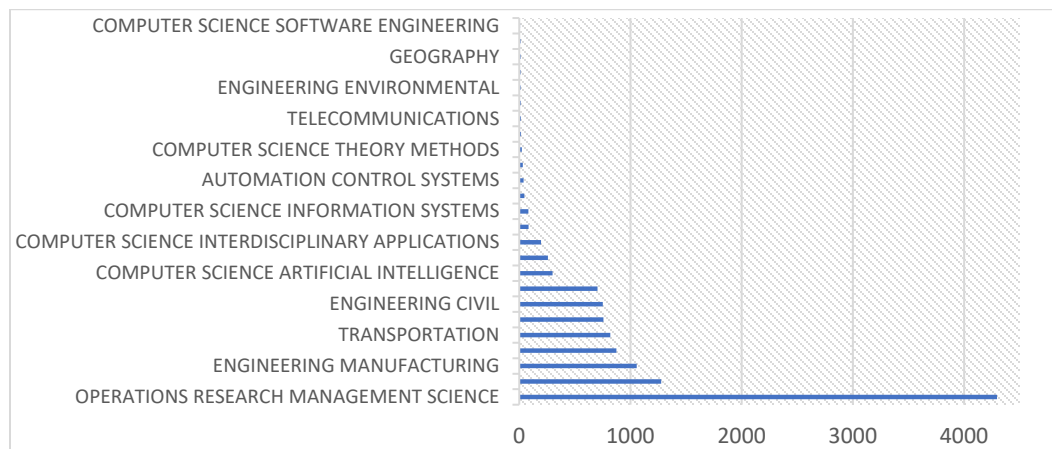
- ¿Dónde deberían ubicarse las plantas y los centros de distribución con el fin de minimizar los costos de transporte y los costos de instalaciones mientras se incrementa o alcanza un nivel de respuesta acorde con las necesidades del cliente?

- ¿Cómo podría esta red de suministro flexibilizarse a medida que se conoce la demanda de nuevos mercados y productos?
 - ¿Deben las mercancías ser embarcadas a los centros de distribución en su empaque final o a granel?
 - ¿Cuál modo de transporte debería ser usado para mover los productos?
 - ¿Cuándo es necesario considerar un modelo de plataforma de intercambio para distribución de productos?
 - ¿Cuál modelo de cumplimiento es beneficioso, hacer sobre pedido o hacer para almacenar?
- (Ganesan, 2015)

2.2 Sistemas Logísticos

Continuando con el análisis sugerido en esta tesis, se procede a analizar el concepto generador “Sistema logístico”. En las bases de datos se hizo la búsqueda con la palabra clave *logistics system* (L.S.), también en la ventana de tiempo de 2000 a 2020 como se observa en la Figura 2.6.

Figura 2.6. Áreas Relacionadas con L.S.

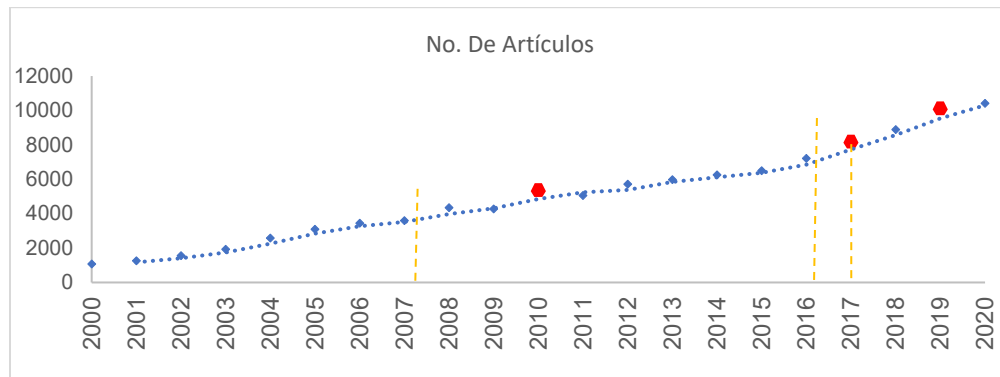


Fuente. Elaboración a partir de Web of Science

Como puede observarse en la figura 6, las áreas de mayor incidencia son: investigación de operaciones, ingeniería de manufactura y transporte. En las de menor incidencia se encuentra las ciencias de computación, la geografía y la ingeniería ambiental.

En lo que respecta al número de artículos publicados en las últimas dos décadas, se puede observar que, en los años 2010, 2017 y 2019 hay un especial interés en los sistemas logísticos. Lo anterior puede comprobarse en la Figura 2.7.

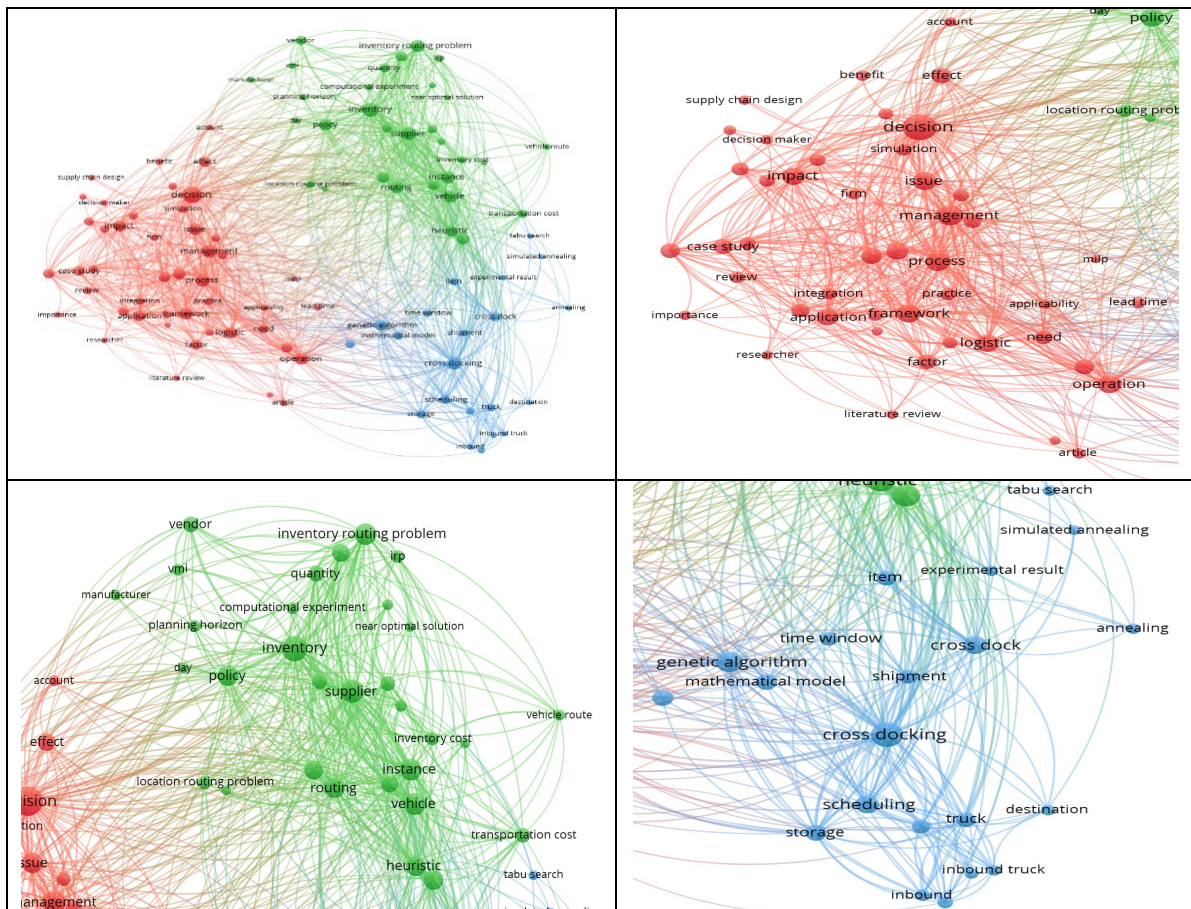
Figura 2.7. Trabajos Publicados S.L. (2000-2020)



Fuente. Elaboración a partir de Scopus

En la Figura 2.8 se observan también tres clústeres: uno asociado a la gestión y toma de decisiones, otro a inventarios y otro que tiene que ver con *Cross-Docking*. Lo anterior en concordancia con los elementos problematizadores de esta tesis.

Figura 2.8. Análisis Bibliométrico S.L.



Fuente. Elaboración a partir de VOSviewer

2.2.1 Generalidades

Un Sistema logístico puede ser definido como un conjunto de instalaciones conectadas por servicios de transporte. Dichas instalaciones pueden ser plantas, plataformas, centros de distribución, almacenes, puntos de trasbordo, terminales de carga, entre otros (Ghiani et al., 2004).

El sistema logístico incluye decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo; las cuales se toman en un horizonte de planeación a largo, mediano y corto plazo, respectivamente. En un lapso mayor a un año, algunas actividades pueden ser: escoger el número de instalaciones; su localización; capacidades de dichas instalaciones, las cuales pueden ser de almacenamiento o producción; flujo de materiales entre la red logística. Entre un trimestre y un año, pueden tomarse decisiones de compra y producción; políticas de inventarios; estrategias de transporte; frecuencia de visita a clientes. Mientras que a diario se toman decisiones con respecto a la programación y ruteo de vehículos (Ghiani et al., 2004; Schimchi-Levi et al., 1997).

En un sistema logístico se encuentran componentes tales como: acompañamiento al cliente, gestión de la demanda, distribución de productos, control de inventarios, manejo de materiales, gestión de pedidos, función de localización, compras, embalaje de productos, devoluciones, almacenamiento y logística inversa (Ballou, 2004); los cuales son subprocesos del proceso general. Si se observa con detenimiento, éstos están relacionados con el flujo de materiales, información y recursos, es decir; garantizan el funcionamiento de toda la compañía.

De manera similar, puede decirse que el propósito del sistema logístico es maximizar la eficiencia: alcanzar un bajo costo, menores tiempos de espera, mejor servicio al cliente, mínima utilización de recursos (Shan et al., 2016) y para efectos de los objetivos de desarrollo sostenible propuestos (ONU, 2015); consumo y producción responsables con el medio ambiente.

En concordancia con lo anterior, existe la preocupación de mejorar el servicio al cliente, pero hasta un nivel que no comprometa la rentabilidad financiera. Este concepto de análisis de los *trade-off*, o equilibrios, que puede mostrar si algún cambio en uno de los componentes del sistema logístico tiene un efecto significativo en el costo del sistema total; por otra parte, puede ser posible encontrar un ahorro general en costos, minimizando costos en todos y cada uno de los elementos de dicho sistema (Rushton et al., 2006)

2.2.2 Estrategias de Modelamiento

2.2.2.1 Métodos de Optimización y Heurísticos

Los métodos cuantitativos y herramientas de modelamiento en las cadenas de suministro consisten en formulaciones y algoritmos que buscan soluciones eficientes de alta calidad, que en este sentido atienden a la rapidez de ejecución del algoritmo y su uso de recursos computacionales. A continuación, se mencionan las principales técnicas referidas por la literatura:

- Optimización no lineal no restringida: donde el principal foco está en métodos que convergen a un óptimo local o un mínimo en un punto de silla, incluyendo métodos como el de Newton, gradiente conjugado, métodos de región de confianza, otras metaheurísticas de optimización global tales como recocido simulado, algoritmos evolucionarios, algoritmos genéticos, métodos de evaluación diferenciales. Los resultados teóricos están dados para mostrar alguna garantía que el método tiene una convergencia en un óptimo local o en un punto de silla (Dolgui & Proth, 2010).
- Optimización lineal restringida: método simplex, método simplex para redes, algoritmos de asignación (Martínez-Costa et al., 2014).
- Optimización no lineal restringida: métodos de penalización y multiplicadores de Lagrange (Nassief et al., 2015).
- Optimización combinatoria y optimización entera mixta: método de ramificación y acotamiento con sus variantes ramificación y precio y ramificación y corte y precio (Tangpong et al., 2014).
- Metaheurísticas: búsqueda TABU y métodos de partición anidadas (Mousavi, Tavakkoli-Moghaddam, Siadat, et al., 2013).
- Programación dinámica (Christou, 2012).

2.2.2.2 Análisis de Grandes Conjuntos de Datos (Big-Data)

Se puede definir *Big-Data* como una corriente novedosa que provee una alternativa a los métodos tradicionales. Analiza grandes conjuntos provenientes de bases de datos de diferente tipo: imágenes, audios, vídeos, interacciones en redes sociales, registros de GPS, entre otros. Algunos autores lo definen a través de lo que llaman “modelos 3V”, puesto que proporcionan alto volumen de manejo de datos, alta velocidad de procesamiento y alta variedad de información (volumen,

velocidad, variedad), con el fin de tomar decisiones, obtener nuevo conocimiento y optimizar procesos. Otros autores incrementan las V con valor y veracidad, es decir, modelos 5V (Koseleva & Ropaitė, 2017) y algunos comparan la importancia del *Big-Data* y la información, con el petróleo o el oro, en su tiempo (Alharthi et al., 2017). Otros autores, tras hacer un rastreo de la literatura identifican otras ventajas del *Big Data*, tales como: portabilidad e interconectividad de los datos, características que pueden aportar valor a las aplicaciones en las empresas (Günther et al., 2017).

Se relacionan algunos beneficios a partir de la utilización de estas técnicas, tales como: transaccionales, al hacer crecer la productividad; estratégicos, al proveer mejores productos y servicios, también por alinear la estrategia corporativa con la de *Big-Data*; transformacionales, al incrementar las capacidades y nuevas tecnologías a las empresas; finalmente, las de información, pues se mejora el acceso a la información de calidad en cualquier momento (Raguseo, 2018).

Al revisar la literatura, se encuentra que es un campo de conocimiento que tiene muchas aplicaciones por explorar. Se resalta la importancia de las técnicas de *Big-Data* en la toma de decisiones, particularmente en el sector Gobierno (Janssen et al., 2017). En la literatura científica relacionada con *Big-Data*, se establece que la mayor cantidad de trabajos se relacionan con: salud pública, educación, sector público, sector financiero, turismo, mercadeo, sector detallista (*retail*), energía, medicina, ecología, química y agricultura (Akoka et al., 2017). Las redes sociales o “*social media*”, genera una gran cantidad de información que es de mucha utilidad, si se exploran y analizan los datos que producen todos esos millones de interacciones, es así como surge otro interesante campo denominado *Big Social Data*, con gran potencial de aplicación en los negocios (Olshannikova et al., 2017). Otros trabajos resaltan la aplicación de los grafos en el análisis de datos no estructurados obtenidos a partir de las redes sociales (Patil et al., 2018).

Es importante resaltar la aplicación de estos métodos de *Big-Data* en el campo del transporte y la logística, al mencionar que a través de los sistemas RFID (*Radiofrequency Identification*) y GPS (*Global Positioning System*) se capturan gran cantidad de datos, que pueden utilizarse posteriormente para determinar frecuencias de viajes, predecir tiempos de arribo, entre otras predicciones. Se mencionan que los algoritmos de *Machine Learning*, pueden proveer de información analítica (Oussous et al., 2017).

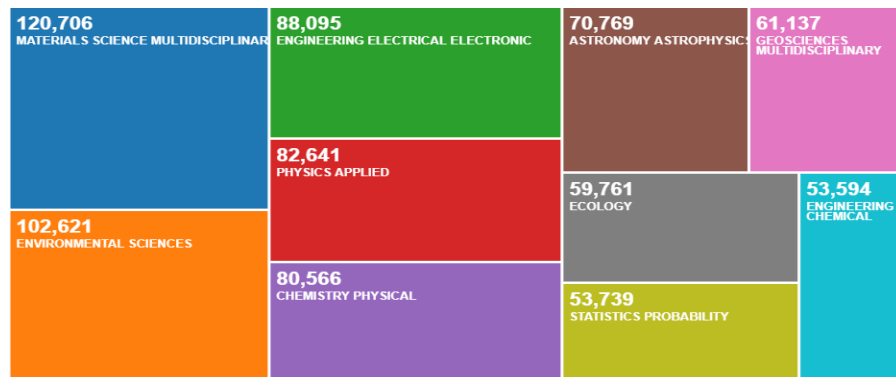
El agrupamiento (*clustering*) por *k*-medias, se presenta como un ejemplo sencillo de un algoritmo de aprendizaje no supervisado, puesto que divide los “conjuntos de entrenamiento” en *k* diferentes grupos (clústeres), para posteriormente aplicar una función matemática que defina el grado de afinidad entre los datos (Kapitanova & Son, 2012).

Entre los tipos de *Big-Data* análisis, se destacan tres tipos: el análisis descriptivo, en los que encontramos las medidas de tendencia central y de dispersión, estas son las formas más simples de análisis, tales como la organización de frecuencias, los tableros de indicadores y otras métricas. El segundo tipo es el análisis predictivo, que, en conjunto con el análisis estadístico y los pronósticos, se encargan de evaluar las futuras posibilidades basadas en modelos de aprendizaje. Busca patrones y relaciones entre los datos, tales como: regresiones multinomiales, logísticas y el *Machine Learning*, con aplicaciones de redes neuronales, regresión lineal y promedios móviles. El tercer tipo es el análisis prescriptivo, que determina las relaciones de causa-efecto con los resultados de la etapa predictiva (Sivarajah et al., 2017).

2.3 Distribución

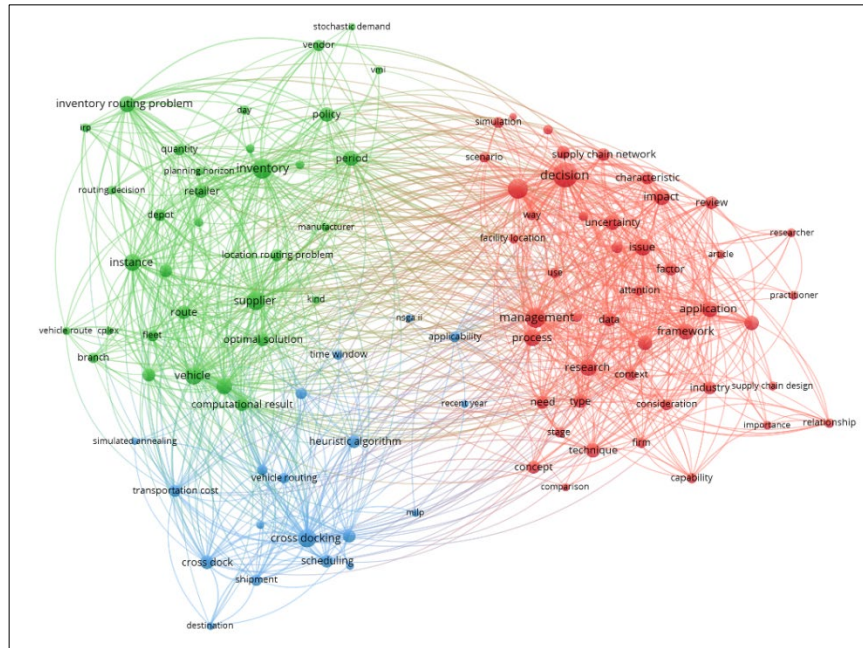
El siguiente concepto: Distribución, clave en este desarrollo del problema, presenta un comportamiento graficado en la Figura 2.9.

Figura 2.9. Áreas Relacionadas con el Término "Distribution"



Fuente. Elaboración a partir de Web of Science

La mayor cercanía se evidencia en ciencias de materiales y ciencias ambientales. En cuanto al crecimiento de su incidencia en los artículos publicados en el año, se puede evidenciar en la Figura 2.10, que la mayor tendencia se encuentra en los años 2004, 2016 y 2019.

Figura 2.12. Análisis Bibliométrico Distribution Network

Fuente. Elaboración a partir de VOSviewer

En ambos casos se forman tres grupos. Un primer clúster referido a inventarios con palabras claves tales como: localización, rutas, proveedores, entre otros. Para el grupo referente a gestión, se identifican: *supply chain*, capacidades, aplicaciones y planeación, entre los más cercanos. El último grupo se refiere a *Cross-Docking* y problemas de ruteo de vehículos.

Para abordar esta sección, en primera instancia se expondrá el concepto de distribución en el contexto de la logística, éste será el que se asumirá en la presente investigación. La literatura coincide en definir la distribución como todas aquellas funciones asociadas al almacenamiento y movimiento de bienes terminados desde las plantas de manufactura, pasando por los centros de distribución hasta llegar a los clientes finales (CSCMP, 2013).

Se considera necesario ubicar de manera temporal, los orígenes y antecedentes de la distribución, desde que empezó a considerarse como una función más de las organizaciones, hasta el modelo actual, que desarrolla el enfoque de las redes de distribución:

- Entre 1950 y 1960 los sistemas de distribución no eran planeados, los fabricantes tenían su flota propia y entregaban a los distribuidores o al cliente final, según fuera el caso.
- Entre los años 60's y los 70's el concepto de distribución física se fue desarrollando, se empezó a reconocer que había una serie de actividades interrelacionadas tales como transporte,

almacenamiento, manejo de material y empaque que deberían estar gestionadas de manera conjunta con el fin de poder reducir los costos, inicialmente los beneficios fueron para los fabricantes.

- En los 80's lo más significativo fue el crecimiento de las compañías que prestaban servicios de distribución, estos terceros logísticos permitieron la tecnificación de este tipo de actividades.
- Al alcanzar los 90's se evidencia la conveniencia de integrar las funciones de manejo de materiales con las de distribución física y surge el término "logística" para describir este concepto.
- En la década comprendida entre 1990 y 2000, el concepto de gestión de cadena de suministro permite que diferentes organizaciones se vean involucradas en la colocación de productos en el mercado: fabricantes y detallistas conjuntamente trabajan para la creación de redes de distribución que permitan un eficiente y efectivo flujo de materiales para la satisfacción del cliente final. En este tipo de alianzas, se ven incluidos otros intermediarios tales como distribuidores mayoristas y minoristas (Rushton et al., 2006b).
- Las compañías buscan implementar redes de distribución con el fin de lograr una combinación de objetivos, entre los más importantes están: la reducción del costo logístico y obtener una alta capacidad de respuesta al cliente final (Marmolejo et al., 2016).

Como ya se mencionó, el diseño de la red de distribución se considera una de las actividades de planeación a nivel estratégico en la gestión de la cadena de suministro. Una configuración óptima garantiza en gran medida el cumplimiento de los objetivos tendientes a mejorar el servicio y el costo logístico de una compañía (Chopra & Meindl, 2007).

Para que el diseño de la red de distribución sea eficiente, debe atender los requerimientos propuestos en el diseño de la cadena de suministro (*Supply Chain Network Design* "S.C.N.D." por sus siglas en inglés) y se consideran diferentes paradigmas, entre los que se encuentran:

- Red de suministro esbelta, la cual está basada en los principios de la manufactura esbelta (*Lean*), que busca primordialmente reducir todas aquellas actividades que no adicionan valor.
- Red de suministro ágil (*Agile*), que se desarrolla basada en la integración del concepto de manufactura *agile* a las cadenas de suministro. Este paradigma surgió como respuesta a los mercados competitivos donde las expectativas y necesidades de los consumidores son cambiantes; por lo tanto, el foco consiste en garantizar un ambiente flexible que permita reducir el tiempo para poner un producto en el mercado, aplicando la tecnología, todo bajo un costo razonable.

- Red de suministro verde (*Green*), se enfoca en diseñar redes de recuperación de productos de desecho, en mal estado o subproductos contaminantes de un proceso.
- Red de suministro sostenible, se diseñan redes pensadas desde la perspectiva financiera, ambiental y social.
- Redes de suministro bajo gestión de riesgo, que consiste en identificar, calificar, priorizar, monitorear y controlar los posibles riesgos que se presenten (Zanjirani et al., 2014).

La configuración de la red se refiere a la estructura o eslabones a través de los cuales fluyen los materiales desde proveedores hasta cliente final y la información en sentido inverso, de tal manera que deben determinarse:

- Ubicación, número, tipo y capacidad de las instalaciones, la cuales pueden ser plantas, centros de distribución, plataformas de intercambio o almacenes intermedios;
- Productos y clientes asignadas a cada una de dichas instalaciones;
- Modo de transporte, configuración de flota y rutas de distribución;
- Niveles de inventario y políticas de servicio al cliente; y,
- Logística de reversa o de devolución de defectuosos, materiales de empaque y embalaje, entre otros (Ballou, 2004b).

Por otra parte, al diseñar una red de suministro, se deben tomar decisiones con respecto a si el producto se entrega en la ubicación del cliente o en otro sitio o si se utilizará un intermediario. De acuerdo con el tipo de sector y de industria a la que pertenece la compañía, se proponen seis diseños de distribución:

- Preservación de bienes con el fabricante con envío directo
- Preservación de bienes con el fabricante con envío directo y consolidación en tránsito
- Preservación de bienes con el distribuidor con entrega por operador de paquetero
- Preservación de bienes Almacenamiento con el distribuidor con entrega a domicilio
- Preservación de bienes con el fabricante o distribuidor con recolección por cuenta del cliente
- Preservación de bienes Almacenamiento con el vendedor con recolección por parte del cliente

No debe descuidarse el hecho de que el diseño de la red debe considerar las características del producto y sus requerimientos, además de los costos y la adaptabilidad de la misma a nuevas condiciones del mercado (Chopra & Meindl, 2007).

También puede decirse que, en el momento del diseño de redes de distribución en las cadenas de suministro, se describen todos aquellos sistemas empleados en la optimización de las relaciones entre varios elementos de la cadena de suministro tales como: plantas, centros de distribución, puntos de venta con el fin de sincronizar el flujo de materiales y productos terminados, a nivel estratégico (CSCMP, 2013). Actualmente, las compañías buscan implementar redes de distribución con el fin de lograr una combinación de objetivos, entre los más importantes están: la reducción del costo logístico y obtener una alta capacidad de respuesta al cliente final.

2.3.1 Redes de Distribución y Localización

Las decisiones de localización se enmarcan como decisiones del orden estratégico de la compañía, puesto que impactan en gran medida los objetivos financieros e involucran considerables inversiones. Sin embargo, pese a la implicación económica, lo ideal es que lleguen a convertirse en ventaja competitiva. La revisión de la literatura realizada para la presente tesis, da cuenta de diferentes técnicas y combinación de éstas que apuntan hacia la rentabilización de la cadena de suministros mediante una adecuada elección de la red de distribución.

Es particularmente interesante, para los objetivos del presente trabajo, considerar otros trabajos que combinan *clustering* de centros de distribución y de grupos de clientes, con el problema de localización *LRP (Location Routing Problem)* (Yang, 2017).

A continuación, se hará un recuento de los trabajos más recientes que involucran técnicas de análisis clúster con modelos de programación entera mixta, utilizados con el fin de dar solución a uno de los problemas de más reciente atención como lo es el problema de localización de instalaciones. Es pertinente aclarar que se hará el recuento y como criterio de ordenación, la cronología de los trabajos.

Inicialmente, se mencionarán los trabajos que han utilizado técnicas de *clusterización*. El primer trabajo de esta revisión integra sistemas de información geográfica que, alimentan formulaciones de *clusterización* en (Bosona & Gebresenbet, 2011), para la localización de centros de acopio de alimentos.

Por otra parte, en un trabajo posterior, se propone un modelo basado en un algoritmo de clúster difuso para empresas logísticas, en el cual utilizan variables tales como: información básica, niveles de gestión, aspectos técnicos, capacidad de transporte, niveles de información, competencia, mercado y servicio al cliente, con el fin de evaluar y calificar la capacidad de agrupamiento de las empresas logísticas (Fu & Yin, 2012). En este mismo año, 2012 se presenta un modelo de *clustering* y diseño de rutas para logística humanitaria, con el fin de garantizar la atención oportuna de las ayudas a los posibles afectados (Özdamar & Demir, 2012).

Otra técnica como la simulación, se propone para probar que las redes de cadena de suministro diseñadas bajo una estructura de clúster, son más eficientes en tiempo de servicio al cliente, que las diseñadas bajo un enfoque tradicional (Liu et al., 2013).

En otros trabajos, se resalta que los problemas de *clusterización* son aplicables a problemas logísticos prácticos, para ubicación de plantas, utilizando un algoritmo heurístico y algoritmos genéticos para dar lugar a un nuevo algoritmo que según los ensayos realizados sobre el mismo, resulta significativamente más rápido en su ejecución que otros planteados con el mismo fin (Kazakovtsev & Stupina, 2015).

Otros trabajos publicados en 2015 y relacionados con técnicas de agrupación, proponen una aplicación de clúster de demanda para redes en logística de carga (Mesa-Arango & Ukkusuri, 2015); así como también una metodología para agrupar en clúster logísticos una región, con el fin de evaluar el potencial logístico de estos grupos conformados (Baranowski et al., 2015).

Con técnicas de *clusterización* jerárquica se realiza la ubicación de almacenes, teniendo en cuenta factores cualitativos y cuantitativos; justificando su utilización desde el punto de vista de la estrategia logística de la empresa, llegando a la conclusión que, con este método se pueden combinar diferentes tipos de datos, mejorando la información de entrada de los modelos propuestos (Škerlič et al., 2016).

Por otra parte, se desarrolla una herramienta para toma de decisiones y organizar la distribución en las ciudades, permitiendo un análisis territorial previo al establecimiento de construcciones logísticas, a través del modelamiento espacial y *clustering* (Ducret et al., 2016). Para 2016 también se aborda el tema de los clústeres logísticos como potenciadores de ambientes colaborativos, generando mejoras en el servicio (Rivera et al., 2016).

En otro sentido, se aplican técnicas de *clusterización* y análisis econométrico para determinar si la especialización en transporte y servicios logísticos, dependen de la ubicación geográfica urbana o rural de los mismos, demostrando el impacto positivo de estos clústeres sobre el empleo (Kumar et al., 2017).

Otros investigadores diseñan en primera instancia, un modelo de pronóstico de ventas y evalúan la importancia de los servicios logísticos sobre la demanda, para proponer un algoritmo que optimiza las ubicaciones de los depósitos, dicho algoritmo está basado en la *clusterización* geográfica jerárquica y enfocado en los puntos de entrega, con el fin de reducir la dimensionalidad del problema (Chang et al., 2017).

Es importante resaltar cómo mediante técnicas estadísticas se realiza una aplicación de clúster logísticos (Juozapaitis & Palsaitis, 2017). También es interesante resaltar otros trabajos que combinan técnicas tradicionales utilizadas en logística, como la utilización del método de centros de gravedad, en combinación con el agrupamiento (*clustering*), para localizar instalaciones (Li, 2018).

Para finalizar, se resalta un enfoque basado en clústeres de clientes en una cadena de suministro de dos eslabones para solucionar un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. Estos clústeres se realizan con las ubicaciones de los clientes y sus comportamientos de compra, además pronostican la demanda con suavización exponencial, que es otra técnica tradicionalmente utilizada por los tomadores de decisiones logísticas (Wang et al., 2018). Adicionalmente, se utiliza el análisis de clúster para conocer los patrones de comportamiento de clientes finales, comparar técnicas para identificar perfil de cliente y sus patrones de consumo a fin de conocer cómo mejorar la satisfacción y retención de clientes (Shalini & Singh, 2018).

A partir de estos trabajos recientes, se puede afirmar que estas técnicas de manejo de grandes conjuntos de datos son particularmente eficientes para caracterizar y parametrizar situaciones empresariales donde se requiere incluir gran cantidad de información.

2.3.1.1 Modelos de Localización con Programación Entera Mixta (MIP)

En cuanto a los modelos de localización de centros de distribución, basados en programación entera mixta, se pueden mencionar algunos de mayor relevancia para los objetivos del presente

artículo. Se presentarán en orden cronológico, resaltando las principales características del modelo y su técnica de solución.

En 2006 se presentan dos trabajos que se consideran relacionados con el presente problema a resolver: en el primero (Ko et al., 2006), la función objetivo minimiza el costo total, compuesto por el costo fijo, costo de apertura de almacenes, costo variable y costo de transporte. Las restricciones son de capacidad de producción de plantas, de cumplimiento de demanda, de capacidad de almacenes. Como no es posible encontrar una solución exacta, pues el problema es de tipo *Np-hard*, se utilizan algoritmos genéticos. Una vez obtenidas las localizaciones, se aplica la simulación discreta para realizar la planeación de la distribución. En el segundo trabajo relevante propuesto este año, se minimiza el costo total de cumplir con la demanda, el costo de embarque de las plantas a los almacenes y el costo asociado con la apertura y operación de los almacenes y las plantas. Las restricciones cumplen con la demanda y la capacidad tanto de plantas como de almacenes se resuelve mediante Relajación lagrangiana para las primeras soluciones y luego una heurística propuesta que llamaron *DistriNet* (Amiri, 2006).

Otra propuesta posterior, propone un modelo de programación lineal entera para localización, en un sistema de producción-distribución. Este modelo contempla múltiples escalones, múltiples productos, demandas determinísticas. Este trabajo proporciona una perspectiva desde un factor estratégico y táctico, con el fin de abrir o cerrar instalaciones, seleccionar proveedores y asignar cantidades de producto. Las decisiones son de carácter dinámico y presenta un plan de expansión de la compañía. Se resuelve mediante un solucionador de MILP (Thanh et al., 2008).

En (Perea et al., 2009) se estudian modelos de cooperación entre los nodos de una red que representa una red de distribución. Unos nodos son de oferta, otros son de demanda y un tercer grupo son nodos estratégicos para el plan de distribución. Se resuelve mediante juegos cooperativos. Seguidamente, se diseña una cadena de suministro con flujo de retorno, de tal forma que, se modelan varios períodos y varios productos. El modelamiento del tiempo se utiliza para representar el componente de gestión, con el fin de integrar el diseño de la cadena, con producción, almacenamiento y distribución, abarcando los niveles estratégico, táctico y operativo.

Se aplica un ejemplo de la industria en Portugal, para validar la aplicabilidad y la ejecución del modelo en entornos reales. Se utiliza un enfoque de solución de redes, desde el punto de vista

gráfico, a través de los conceptos de nodo y arco, con el fin de representar la red (Salema et al., 2010).

El segundo trabajo propuesto para el 2010, formula un modelo para localización de instalaciones con restricciones de capacidad. Se comparan las soluciones desde tres puntos de vista: como cliente, proveedor y operador logístico. Se modelan estas tres formulaciones y se presentan las comparaciones de las potencialidades y limitaciones de este tipo de enfoques de solución (Kalcsics et al., 2010).

Por otra parte, se plantea un PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem), sujeto a restricciones de frecuencia. La extensión estratégica se da por localización de depósitos independientes. El modelo toma simultáneamente decisiones de ruteo y de localización, la meta es combinarlas en un problema real. Para solucionarlo, se propone un algoritmo evolucionario (Prodhon, 2011).

Un trabajo importante que es pertinente mencionar, integra el nivel estratégico de una cadena de suministro y se realiza una aplicación de una situación real (Das, 2011). Para el siguiente año, se propone un procedimiento de solución para el modelo y se realizan los respectivos análisis de sensibilidad a las salidas del modelo, considerando la flexibilidad de varios parámetros. (Costantino et al., 2012).

En otro sentido, se formulan diferentes etapas para reconfigurar una cadena de suministro, presentando una técnica para la gestión estratégica de una cadena de suministro de manufactura (Escobar et al., 2013); en este mismo, la formulación de modelo matemático se realiza en dos etapas: una de programación entera mixta determinística y luego formulación de un modelo de programación entera mixta estocástica. Se obtiene solución a través de la técnica *Sample Average Approximation (SAA)*.

Se programa en C++ un algoritmo para diferentes instancias y tamaños de problema, acá se aborda la localización capacitada, incluyendo la decisión del tipo de depósito a acondicionar. Dichas ubicaciones tienen flujos en ambos sentidos, los autores las llaman ubicaciones híbridas (De Rosa et al., 2013).

De manera posterior, es resuelto un modelo de programación entera mixta, en CPLEX, que da como resultado la apertura de centros de distribución o el ajuste de la capacidad de los ya

existentes, el modelo arroja el número de localizaciones y capacidades de almacenes y centros de distribución (Longinidis & Georgiadis, 2014).

Para este mismo año 2014, se propone una aplicación para una cadena de suministro de Bio Diesel. Consiste en un modelo matemático que optimiza el número de ubicaciones y la capacidad de instalaciones. Se plantea un modelo para un horizonte de planeación de 10 años. Los resultados se presentan como de gran utilidad para la creación de políticas a nivel estratégico y táctico en la cadena de suministro (Babazadeh et al., 2014).

Posteriormente, se comparan 4 grupos de empresas y se indagan los procesos de abastecimiento y entrega en dichos clústeres. Las medidas de desempeño comparadas fueron: ingresos por ventas y la rentabilidad. El estudio presenta cómo las empresas deben procurar un nivel de calidad de su información, de tal forma que impacte de manera positiva en los procesos logísticos mencionados (Zhou et al., 2014).

También en 2014, se presenta un modelo que aporta varias contribuciones para los tomadores de decisiones, al representar una función multiobjetivo, con restricciones de oferta y demanda en condiciones de no equilibrio. El considerar una estructura dinámica en el tiempo, permite proponer diferentes escenarios y desarrollar diferentes ensayos computacionales. En este trabajo, se aborda un enfoque para formular y solucionar un modelo de distribución multi período y multi producto, con estructura dinámica (Ivanov et al., 2014).

Para 2016, se modela un sistema dinámico no estacionario con un modelo de programación lineal, acá es relajada la restricción de demanda y se formula el modelo como un de red de máximo flujo; la función objetivo minimiza el costo de envío de la planta a las plataformas *crossdocking* y los almacenes más el costo fijo de abrir y operar los centros de distribución (Marmolejo et al., 2016).

En 2016 se simula un modelo de localización, programación para estaciones multimodales de tren (Muñuzuri et al., 2016).

2.3.2 Plataformas de Intercambio (*Cross-Docking*)

En el campo de la distribución de bienes, actualmente cuatro estrategias son comúnmente usadas por las empresas: embarque directo, viajes rutinarios (*milk-run* por ejemplo rutas de avión), almacenamiento (*warehousing*) y plataformas de intercambio (*Cross-Docking*). Para contrarrestar

ineficiencias tales como camiones parcialmente cargados y largos tiempos de espera (*lead time*) para el cliente (Buijs et al., 2014) se han formulado algunas herramientas tales como el concepto de almacenamiento cero. Para este trabajo, se han contemplado como soluciones el almacenamiento y las plataformas de intercambio tipo *Cross-Docking*, como suplementarias en el diseño de redes de distribución para productos de tecnología tales como: celulares, chips, módems y otros relacionados. En la presente sección se abordarán el concepto, los tipos y el modelamiento de las plataformas.

2.3.2.1 Concepto de Cross-Docking

Puede definirse el *Cross-Docking* como una estrategia logística para la distribución de commodities y productos con la mínima utilización de almacenes intermedios (Buijs et al., 2014). Otros autores consideran que puede tener diversas metas: consolidación de envíos, optimización de la capacidad de los camiones, menores tiempos de respuesta y reducción de costos (Van Belle et al., 2012).

El *Cross-Docking* también puede definirse como una técnica de manejo de materiales y distribución en la cual los productos son transferidos directamente de la puerta de recepción a la puerta de embarque, reduciendo la necesidad de una bodega o centro de distribución, reduciendo el almacenamiento y las funciones de preparación de pedidos en un almacén (Mohtashami et al., 2015).

Algunos trabajos lo detallan como como una estrategia de almacenamiento que involucra el movimiento de los productos desde los nodos de recogida hasta los nodos de entrega en una menor cantidad de tiempo (Yu et al., 2016).

Por otra parte, el *Cross-Docking* es definido como una práctica logística que se diferencia de la de Centros de Distribución, porque los productos no son preservados por mucho tiempo en bodegas intermedias; en vez de eso, el *Cross-Docking* facilita la consolidación de la mercancía en los embarques antes de ser distribuidos a los consumidores finales (Dondo et al., 2011).

Otra definición, aborda el *Cross-Docking* como una práctica de almacenamiento utilizada en logística, usada para industrias con procesos que tienen un alto costo de distribución. Es descrita como el proceso de movilizar bienes desde los proveedores hasta los consumidores a través de una plataforma sin mucho tiempo de almacenamiento en esta locación (Dondo & Cerdá, 2013);

utilizada para trasladar bienes desde proveedores a consumidores vía una terminal *Cross-Docking*, sin almacenamiento permanente¹. La planeación operativa involucra diferentes aspectos tales como el ruteo de vehículos, la asignación de muelles carga/descarga y la programación de camiones (Dondo & Cerdá, 2014).

El *Cross-Docking* es aplicado por muchas firmas industriales para obtener ahorros sustanciales en tres funciones costosas tales como: almacenamiento, manejo de materiales y alistamiento de órdenes (*picking*). Sin embargo, el diseño y la coordinación de las operaciones relacionadas requieren un enfoque holístico, con el fin de lograr la sincronización al interior de la operación con la red de la cadena de suministro (Buijs et al., 2014). Lo anterior requiere que los embarques entrantes sean descargados desde adentro del camión sobre una plataforma terminal con un reducido espacio de almacenamiento y directamente trasladados a los vehículos de salida, que los conducirán hacia sus destinos (Dondo & Cerdá, 2015).

Desde un enfoque de redes, se trata de un subsistema de la cadena de suministro formada por una o más plataformas *Cross-Dock*, junto con las rutas de ingreso y salida de mercancías, las partes interesadas (*stakeholders*) conectadas; que pueden ser diversas instalaciones logísticas (proveedores, fabricantes, centros de distribución, mayoristas, detallistas y consumidores) (Buijs et al., 2014).

En cuanto a las operaciones de corto plazo, se define el problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* como el conjunto de rutas de mínimo costo para una flota de vehículos que cumple con la demanda de productos para una red de vendedores y clientes. Los vehículos salen de una sola plataforma *Cross-Docking*, con destino hacia los proveedores, recogen los productos y se regresan al punto de origen. Los productos pueden ser surtidos antes de ser distribuidos a los consumidores. Las rutas de los vehículos deben respetar las restricciones de capacidad, así mismo las ventanas de tiempo (Morais et al., 2014).

En el contexto de esta investigación se definirá el *Cross-Docking* como una estrategia utilizada en la cadena de abastecimiento con el fin de contribuir al cumplimiento de las metas de la misma: incrementar la rentabilidad total y reducir los tiempos de respuesta (Chopra & Meindl, 2007), a través de variadas técnicas tales como la eliminación de almacenamientos por períodos mayores a

¹ Acá el término permanente se refiere a períodos de almacenamiento mayores a las 24 horas que plantea la técnica de *Cross-Docking*.

24 horas, el incremento en la eficiencia de las operaciones de *picking* o alistamiento de pedidos, rutas de mínimo costo y programación de vehículos para optimizar la capacidad de los mismos (Belle, et al., 2013).

2.3.2.2 Funcionamiento del Cross-Docking

En un centro de distribución, los bienes son recibidos y almacenados, en estibas y *racks*. Cuando un cliente requiere una referencia, entonces se descarga y envía. De las cuatro funciones de almacenamiento: recepción, envío, almacenaje, y alistamiento de pedidos; las dos últimas son las más costosas. El *storage* es más costoso por el costo de mantenimiento del inventario; mientras que el alistamiento de pedidos implica utilización intensiva de mano de obra. Un enfoque para reducir costos podría mejorar una o más funciones o mejorar sus interacciones, sin embargo, el *Cross-Docking* es un enfoque que logra minimizar las dos operaciones más costosas de manejo de materiales. El foco es el transbordo, no la preservación de inventario. Se requiere la sincronización de vehículos de entrada y saliente, la cual es difícil de alcanzar (Van Belle et al., 2012).

En la práctica, se requiere el posicionamiento por un corto tiempo de la mercancía en plataforma (*staging*). Los bienes deben ser ordenados, consolidados y almacenados hasta que el envío siguiente se termine. La restricción estricta de no almacenamiento es descartada por muchos autores. El *Cross-Docking* puede ser interpretado como el proceso de consolidación de carga con el mismo destino, pero desde diferentes orígenes, con una mínima manipulación y con un pequeño o ningún almacenamiento intermedio entre la carga y descarga de bienes. Si los bienes requieren ser almacenados, esto será únicamente por un corto tiempo. Un límite definido son 24 horas. **Muchas organizaciones mezclan la estrategia *Cross-Docking* con almacenamiento tradicional a través de Centros de Distribución, obteniendo aprovechamiento de ambas estrategias** (Van Belle et al., 2012).

El *Cross-Docking* comparte las metas de una cadena de suministro esbelta: lotes pequeños de los inventarios más relevantes que son distribuidos más con rapidez y con mayor frecuencia. La Tabla 2.1 describe las principales ventajas frente a otros métodos de distribución.

Tabla 2.1. Ventajas de Cross-Docking Frente a Otros Métodos de Distribución Física

| Ventajas de <i>Cross-Docking</i> vs Centros de Distribución | Ventajas de <i>Cross-Docking</i> frente a Distribución Punto a Punto |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Minimización de costos de almacenamiento, de tenencia de inventario, de manejo de materiales y de mano de obra • Reducción de los tiempos de espera de distribución desde los proveedores a los consumidores • Mejora en el servicio al cliente • Reducción del espacio de almacenamiento • Rápida rotación de inventario • Menores excedentes • Reducción de riesgos por pérdidas y daños | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costos de transporte y mano de obra • Consolidación de embarque • Mejoramiento en la utilización de recursos • Concordancia ente las cantidades enviadas y la demanda real. |

Fuente. Elaboracion propia a partir de Van Belle et al. (2012)

El *Cross-Docking* podría ser una estrategia no efectiva en todos los casos, Van Belle et al (2012) presentan una matriz con criterios de pertinencia para la implementación de *Cross-Docking*, resumidos en la Tabla 2.2, los cuales tienen en cuenta la tasa de demanda de productos, si es estable o inestable y el costo de no surtir una unidad, si es alto o bajo; de acuerdo con estos, se determina en cuáles situaciones es conveniente utilizar una estrategia de distribución u otra.

Tabla 2.2. Pertinencia del Cross-Docking

| Costo de desabastecimiento por unidad | Tasa de demanda de productos | |
|---------------------------------------|---|--|
| | Estable y constante | Inestable o fluctuante |
| Alta | <i>Cross-Docking</i> puede ser implementado con sistemas adecuados y herramientas de planeación | Preferible la distribución tradicional |
| Baja | <i>Cross-Docking</i> es preferible | <i>Cross-Docking</i> puede ser implementada con sistemas apropiados y herramientas de planeación |

Fuente. Elaboración propia a partir de Van Belle et al. (2012)

Los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se piensa en implementar una estrategia *Cross-Docking*, según Van Belle et all (2012) son: la sincronización de los camiones entrantes y salientes, el software para planear y controlar las operaciones (*WMS*); además de la tecnología (*RFID*, *EDI*) y la disponibilidad de la información.

2.3.2.3 Tipos de Cross-Docking

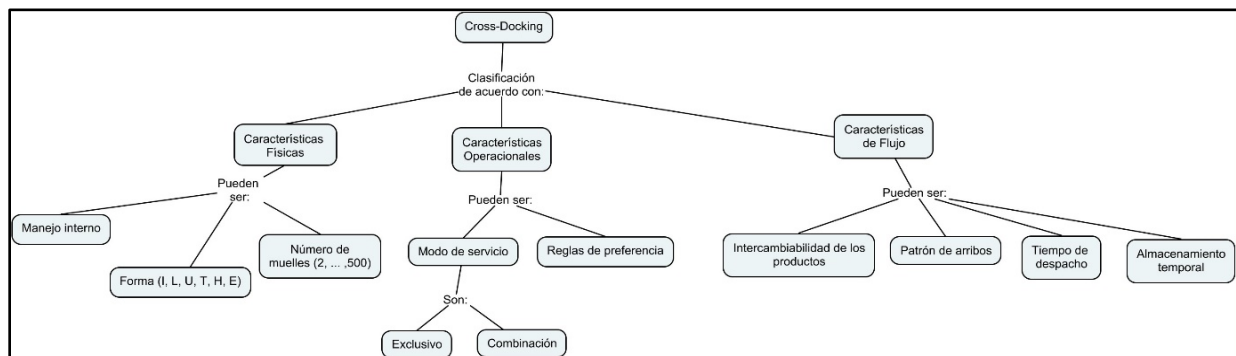
Una terminal *Cross-Docking* dedicada puede tener diferentes formas, estas de manera general pueden especificarse como polígonos irregulares alargados y angostos, a fin de optimizar el espacio. Las mercancías pueden ser cargadas o descargadas desde varios muelles donde llegan los camiones asignados. Los productos son descargados a un pasillo, son organizados y luego pasan hasta la puerta de carga en el camión de envío. Principalmente, no hay una infraestructura para posicionar carga, si las mercancías deben ser almacenadas temporalmente, hay unos sitios en el piso de la plataforma *Cross-Docking* (Van Belle et al., 2012).

Las principales características de una plataforma *Cross-Docking*, basadas en el número de toques o de etapas son:

- *Cross-Docking* de un toque. En el que los productos son tocados solamente una vez, cuando son recibidos y cargados directamente en los camiones de salida.
- *Cross-Docking* en dos toques o *Cross-Docking* de una sola etapa, es cuando los productos son recibidos y colocados en el muelle antes de ser cargados por el transporte saliente. Usualmente las mercancías son puestas en zonas correspondientes a puertas de apilado.
- *Cross-Docking* multi-toque o de dos etapas, los productos son recibidos y apilados en el muelle, entonces estos se reconfiguran para envíos y son cargados en los camiones de salida. En una configuración típica, la carga entrante es primero puesta en zona de descarga, luego los bienes son ordenados en las zonas correspondientes a las puertas de apilado.

La Figura 2.13 presenta una clasificación *Cross-Docking* de acuerdo con las características físicas, operacionales y de flujo.

Figura 2.13. Clasificación Cross-Docking



Fuente. Elaboración propia a partir de Van Belle et al. (2012)

Las diferentes configuraciones de *Cross-Docking* pueden darse de acuerdo con las características físicas de la distribución, características operacionales o de flujo.

Las características físicas corresponden a la forma, como ya se mencionó:

- Forma de letras del alfabeto;
- Número de puertas de carga/descarga que tenga la plataforma, entre 2 y 500 puertas;
- Modo interno de manejo de materiales: si es operado manual, mediante montacargas, o por sistemas totalmente automatizados utilizando bandas transportadoras. También podría darse un sistema mixto.

En cuanto a las características operacionales pueden darse:

- Modo de servicio: si cada entrada es exclusiva para entrada o salida de camiones o, por el contrario, las puertas pueden combinarse.
- Modo de servicio: interrumpido o continuo, es decir, si se está cargando un camión, puede interrumpirse la operación para dar paso a la carga de otro.

En cuanto al flujo, se puede contemplar si la flota es:

- Dedicada o intercambiable, de acuerdo con los productos.
- El patrón de arribos, teniendo en cuenta la periodicidad y el número de camiones.
- El tiempo de salida se refiere a si existe o no alguna ventana de tiempo para el despacho.
- El almacenamiento, que puede necesitarse temporalmente o no (Van Belle et al., 2012).

Debido a la ausencia de una acumulación de productos en un muelle *Cross-Docking*, la red de operaciones del *Cross-Docking* necesita ser cuidadosamente sincronizada. En (Buijs et al., 2014) se propone un esquema de clasificación de *Cross-Docking* que considera la sincronización de las operaciones locales y en red. En cuanto al diseño de la red de *Cross-Docking*, estos autores presentan una clasificación que puede resumirse en la Tabla 2.3 en la que se determina la cantidad de plataformas *Cross-Docking*, la cantidad de puntos de recolección (origen), la cantidad de puntos de entrega (destinos) y las aplicaciones más usuales.

Tabla 2.3. Configuraciones de Red para Cross-Docking

| Cross Dock | Partida | Destino | Aplicaciones |
|------------|---|---|--|
| Una | Pocos | Muchos | Distribución por <i>retail</i> . Ingresan pocos camiones de centros de distribución, se consolidan envíos en una sola plataforma y se distribuye a varios puntos <i>retail</i> . |
| Una | Muchos | Pocos | Industria manufacturera. Muchos proveedores, una sola plataforma para preparación de actividades de logística interna para entregar a pocas plantas cercanas de ensamble. |
| Una | Muchos | Muchos | Paquetería. Se recogen lotes pequeños de muchos puntos y se manejan generalmente en bandas transportadoras para posteriormente consolidar envíos para muchos destinos. |
| Múltiples | Muchos | Muchos | Diseños de red de una sola capa (<i>single layer of cross-docks</i>). Aplicados en diseños de cadena con gran cantidad de fabricantes y minoristas. |
| Múltiples | Pocos o muchos asignados a una Cross-Dock | Pocos o muchos asignados a una Cross-Dock | Diseños de red de centro y satélites (<i>hub-and-spoke</i>). Se forman clúster de puntos de recolección o de entrega y se asignan a una cross-dock satélite. Una red de cross-dock, se interconecta con una plataforma central. Aplicable en empresas de mensajería. |

Fuente. Elaboración propia a partir de Buijs et al. (2014)

Buijs et al. (2014) proponen otra clasificación para *Cross-Docking*, de acuerdo con el tipo de decisiones que deban ser tomadas durante el horizonte de planeación. La Tabla 2.4 presenta la clasificación propuesta por los autores en cuanto al nivel de decisiones y a los principales problemas individuales de decisión.

Tabla 2.4. Niveles de Decisión para Cross-Docking

| Nivel jerárquico | Gestión local de cross-dock | Gestión de la red cross-dock |
|------------------|--|---|
| Estratégico | DISEÑO DE CROSS DOCK: Forma, número plataformas, capacidad de área de apilamiento, diseño del área de apilamiento, equipo de manejo de materiales y automatización. | DISEÑO DE LA RED: Estructura de la red y tipos de instalaciones, número de <i>cross-docks</i> , ubicación de las <i>cross-dock</i> |
| Táctico | PLANEACIÓN: Especificación de <i>dock door</i> , asignación de la puerta de apilado y ordenado, planeación de las capacidades de equipo y mano de obra. | PLANEACIÓN DE LA RED: Planeación de la capacidad de ruta de la red, asignación del flujo de carga, asignación de destinos a embarques. |
| Operativo | PROGRAMACIÓN: Fuera de línea y en línea de camiones entrantes y salientes, programación de mano de obra, asignación de áreas de apilado, camiones de embarques salientes. | PROGRAMACIÓN DE LA RED: Despacho de embarques, ruteo de vehículos para recogida y entrega |

Fuente. Elaboración a partir de Buijs et al. (2014)

La tabla presenta una clasificación de los tipos de decisiones y los tipos de problemas a abordar en cuanto a diseño, planeación y programación de plataformas *Cross-Dock* locales (individuales) o de varias plataformas en red en una cadena de suministro.

2.3.2.4 Estado del Arte de Cross-Docking

A continuación, se presentan diferentes formulaciones y métodos de solución para *Cross-Docking* con ruteo de vehículos, hallados en la literatura entre el 2006 y el 2020, se escogieron las que más relación tuvieran con la temática central de la presente tesis.

Lee et al. (2006) exponen que uno de los más importantes factores en gestión de la cadena de suministro es el control eficiente del flujo físico a través de ésta y que debido a su importancia, muchas compañías propenden por desarrollar métodos eficientes para incrementar la satisfacción del cliente y reducir costos. En varios aspectos, el *Cross-Docking* es considerado un buen método para reducir inventarios y mejorar la respuesta a la demanda de los clientes. Sin embargo, estos autores consideran que, en estudios previos, hasta ese momento solamente había sido considerado desde el punto de vista estratégico, pero que era necesario considerar el *Cross-Docking* desde el punto de vista operacional, para encontrar la programación de las rutas de los vehículos. Su trabajo presentado, consistió en integrar el *Cross-Docking* y la programación de rutas, que por tratarse de un problema *NP-hard*, se resolvió a través de un algoritmo heurístico propuesto basado en búsqueda *TABU*, logrando de esta manera abordar los niveles táctico y operativo.

Se propone una formulación para determinar el número de vehículos y las rutas que minimizan la suma de los costos operacionales de transporte, se comparan los resultados de este con otros trabajos de 2006, obteniendo 50 soluciones a través de una metaheurística de recocido simulado para resolver un VRP con *Cross-Docking*; con iguales o mejores resultados que los obtenidos hasta ese momento en la literatura (Yu et al., 2014).

Santos et al., (2011) se refieren a varios ensayos computacionales elaborados por ellos que ofrecieron una novedosa modificación al algoritmo de ramificación y precio, aplicado a un modelo de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*; estos autores, después de varios experimentos, aportan una solución cuyos resultados computacionales mostraron que la salida del modelo aportada, brinda una mejora en término de calidad, al tratarse de un algoritmo de optimización, el cual ofrece, según lo reportado por los ellos, mejoras del 99% de los tiempos de ejecución en tamaños considerables de problema.

Por su parte, Dondo et al. (2011) aborda el problema de *Cross-Docking* con ruteo de vehículos, haciendo énfasis en que estos problemas podían ser aplicables a redes logísticas de distribución multi-escalón (para casos de cadena de suministro). Los autores desarrollan estrategias híbridas para combinar los embarques directos y el almacenamiento, en casos de múltiples ítems que deben ser consolidados y entregados al cliente final. Este trabajo propone una nueva categoría de VRPCD-SCM (*Vehicle Routing Problem with cross-docking in supply chain management*) que consiste en satisfacer la demanda de los clientes con un mínimo costo de transporte. Se reportan diferentes resultados computacionales para varias combinaciones de parámetros.

En Hasani-Goodarzi & Tavakkoli-Moghaddam (2012) se considera que el *Cross-Docking* juega un papel importante en la cadena de suministro y puede reducir los tiempos de entrega, la espera de inventario y los costos de transporte. Sin embargo, las ventajas del *Cross-Docking* se verían disminuidas sin un eficiente ruteo de vehículos. Estos autores abordan el VRP con entregas divididas (*split vehicle routing problem*) con restricciones de capacidad para múltiples productos en una plataforma Cross Dock.

En el trabajo de Meysam-Mousavi & Tavakkoli-Moghaddam (2013) los problemas de localización, ruteo y asignación con *Cross-Docking* son considerados como una nueva fuente de investigación para redes de distribución en la cadena de suministro. El objetivo es generar un diseño simultáneo de la ubicación del centro de distribución y el modelo de ruteo y asignación de vehículos. Se presenta un modelo de programación entera mixta de dos etapas para localización y posteriormente el ruteo y asignación, contemplando la estrategia *Cross-Docking*, dada sus diversas aplicaciones en las redes de distribución. Se propone un nuevo algoritmo basado en un recorrido simulado de dos etapas, a partir de una lista *TABU*.

Otro trabajo que reporta VRPCD (*Vehicle Routing Problem with Cross-Docking*) es el de Santos et al., (2013) quienes proponen un PDPCD (*Pickup and Delivery Problem with Cross-Docking*); se plantea una formulación de un modelo de programación entera, que se soluciona con un algoritmo de ramificación y precio.

Dondo & Cerdá (2013), solucionan con una heurística de barrido (*sweep heuristic*), un problema de ruteo de vehículos cuya realización de tareas de recogida y entrega se realiza en conjunto con la consolidación de embarques.

Moghadam et al. (2014), sostienen que uno de los más importantes aspectos en la gestión de la cadena de suministro es determinar la manera de mover de modo eficiente el flujo de materiales desde los proveedores hasta los consumidores, y que esto se consigue a través del *Cross-Docking*. En su trabajo, resuelven un VRPCD (*Vehicle Routing Problem with Cross-Docking*) para un conjunto de vehículos homogéneos, con capacidad limitada y ventanas de tiempo; sin embargo, tanto proveedores como consumidores pueden ser visitados por diferentes vehículos. El modelo consiste en una formulación entera no lineal que se soluciona con un híbrido entre colonia de hormigas y recocido simulado.

Otros trabajos, como el de Morais et al. (2014), comparan diferentes heurísticas para la solución del problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* y hacen una comparación de resultados.

Agustina et al. (2014), plantean que el *Cross-Docking* es usado para reducir la conservación de inventarios y el tiempo de espera de los productos en la cadena de suministro. Este trabajo estudia una aplicación de *Cross-Docking* para asegurar que productos alimenticios altamente perecederos puedan ser entregados en el tiempo justo y al mínimo costo; contemplando los costos de mantenimiento de inventario, el de transporte, además de costos de penalización por entregas muy tempranas o tardías. El foco de esta investigación es sobre la integración de programación y ruteo de vehículos en un solo modelo, objetivos que se venían trabajando antes separadamente, reportan los autores. Para reducir la talla del problema se generan clústeres de zonas de consumo de clientes y ventanas duras de tiempo; es decir, se plantea un modelo VRSP-CZHTW (*Vehicle routing scheduling problem with clients zones and hard time Windows*), que se resuelve para una talla pequeña en CPLEX. Se aclara que para modelos de talla grande o de dimensiones reales, ya no puede utilizarse CPLEX, debido a la naturaleza combinatoria compleja del problema.

Dondo & Cerdá (2014), abordan la programación de camiones para carga y descarga de operaciones en una plataforma *Cross-Docking*. Este trabajo introduce un modelo de programación entera mixta para la coordinación de un sistema sencillo de *Cross Dock*, con 70 clientes, 16 vehículos y 7 puertas de muelle.

Hosseini et al. (2014), desarrollan un modelo de programación entera para el problema de consolidación de red, donde un conjunto de vehículos es usado para transportar mercancías desde

los proveedores hasta sus correspondientes consumidores mediante tres sistemas de transporte: embarque directo, embarque a través de *Cross-Docking* y distribución tradicional. Debido a que la formulación es *NP-hard*, se plantea una hibridación entre una metaheurística novedosa y un recocido simulado. El objetivo es minimizar el costo total de embarque en la red, y reducir el número de vehículos requeridos. Finalmente, demuestran que las soluciones obtenidas con la técnica propuesta son más eficientes computacionalmente que las soluciones obtenidas a través de métodos exactos, desarrollados en GAMS o CPLEX.

Meysam-Mousavi et al. (2014), proponen un trabajo que resuelve la localización de múltiples centros de *Cross-Docking*, además de programación de ruteo de vehículos; contemplando de esta manera los niveles de toma de decisiones estratégico, táctico y operativo para compañías logísticas. La solución propuesta consiste en un híbrido entre programación estocástica y lógica difusa.

Küçükoğlu & Öztürk (2014), afirman que el *Cross-Docking* es uno de los métodos más efectivos aplicados en la gestión de la cadena de suministro para minimizar el costo total de transporte, satisfaciendo simultáneamente la demanda de los clientes. Este trabajo aborda el problema del diseño de la red de transporte *Cross-Docking*, sin tener mucho tiempo almacenados los productos. Este problema se resuelve con recocido simulado, los resultados muestran reducciones en el costo total de transporte en la red diseñada frente a la distribución tradicional.

Mohtashami et al. (2015) proponen un modelo matemático multi objetivo para minimización de tiempos de preparación, costo de transporte y del número de viajes de camiones en toda la cadena de suministro.

Dondo & Cerdá (2015), plantean que, de manera tradicional, las decisiones que involucran recogida, entrega, programación de rutas y almacenamiento se han tomado de manera independiente; pero tales decisiones son interdependientes, todas ellas deben ser simultáneamente consideradas en una formulación VRPCD (*vehicle routing problem with Cross-Docking*). Este trabajo revisa estudios previos que asumen que la recogida y entrega son realizadas por vehículos de capacidad homogénea y que ignoran el transporte interno de bienes a través del muelle Cross; la innovación consiste en introducir un nuevo y riguroso modelo de programación lineal entera mixta para el problema de determinar el ruteo y programación de la flota mixta, las puertas del muelle asignadas, la secuencia del camión y el tiempo de viaje requeridos para movilizar los

bienes; con el fin de comprobar la eficiencia computacional se planteó una solución por medio de un algoritmo de ramificación y acotamiento y heurísticas de barrido.

Las últimas tendencias en cuanto a Cross-Docking sugieren que aún hay brechas de conocimiento, sobre las cuales investigar; la primera serían los niveles de incertidumbre que ocurren en la demanda y la oferta, puesto que ninguna de las dos es susceptible de preverla con exactitud. Otros aspectos son: equilibrio entre servicio al cliente y costo; reducción de la contaminación; responsabilidad corporativa; tecnología de soporte a instalaciones CD; programación de horarios de las terminales CD, considerando restricciones de utilización de recursos y capacidad; fuentes de incertidumbre en las operaciones y, finalmente, el desarrollo de software y aplicaciones móviles para la operación de almacenes tipo CD (Mavi et al., 2020).

La Tabla 2.5 presenta un resumen de los tipos de *Cross-Docking* con ruteo de vehículos y métodos de solución más recientes y relevantes.

Tabla 2.5. Tipos de VRPCD y Métodos de Solución

| Autor(es) y año | Tipo de <i>Cross-Docking</i> | Método de solución |
|---|--|---|
| (V. F. Yu et al., n.d.) | Ruteo de vehículos y <i>Cross-Docking</i> | Recocido simulado |
| (Lee et al., 2006) | <i>Cross-Docking</i> y ruteo de vehículos | Modificación de búsqueda tabú |
| (Miao et al., 2009) | Asignación de camiones a muelles <i>Cross-Docking</i> con restricciones de tiempo operativo y restricciones del número de muelles. | Se proponen dos enfoques metaheurísticos: <i>Tabu Search</i> (TS) y algoritmo genético (GA). |
| (Dondo et al., 2011) | VRPCD-SCM (<i>with cross-docking in supply chain management</i>) | Modelo de programación entera mixta resuelto en GAMS |
| (Santos et al., 2011) | Ruteo de vehículos y <i>Cross-Docking</i> | Ramificación y precio (Branch and Price) |
| (Hasani-Goodarzi & Tavakkoli-Moghaddam, 2012) | Problema de <i>Cross-Docking</i> con VRP y entregas divididas. | Se resuelve un <i>Split-VRP</i> con <i>Cross-Docking</i> , mediante un modelo de programación entera en GAMS. |
| (Danloup et al., 2012) | Comparación de heurísticas y metaheurísticas para solución de un problema de <i>Cross-Docking</i> . | Estudio comparativo mediante la aplicación de heurísticas y metaheurísticas para solucionar un problema de <i>Cross-Docking</i> , se utilizaron técnicas tales como: algoritmos genéticos, algoritmos híbridos entre búsqueda local y de vecindades, entre otras; se comparan en diferentes casos y |

| Autor(es) y año | Tipo de <i>Cross-Docking</i> | Método de solución |
|-----------------|------------------------------|---|
| | | resulta siempre con mejores resultados las metaheurísticas. |

Tabla 2.5. Tipos de VRPCD y Métodos de Solución (Continuación)

| Autor(es) y año | Tipo de <i>Cross-Docking</i> | Método de solución |
|---|---|---|
| (Hasani-Goodarzi & Tavakkoli-Moghaddam, 2012) | <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos con entregas divididas, para capacidad restringida de vehículos y multi producto. | Modelo de programación entera mixta hasta con 15 vértices, resuelto en GAMS |
| (Dondo & Cerdá, 2013) | <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos | Se propone un algoritmo de barrido modificado |
| (Morais et al., 2014) | <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo. | Resuelve y compara resultados obtenidos con tres heurísticas basadas en ILS “ <i>Iterated Local Search</i> ” |
| Dondo & Cerdá, (2014) | Modelo de programación entera mixta para un sistema <i>Cross-Docking</i> con 70 clientes, 16 vehículos y 7 puertas de muelle. | Algoritmo de barrido para TSP (<i>Travelling Salesman Problem</i>) modificado. |
| (Hosseini et al., 2014) | Modelo de <i>Cross-Docking</i> con una función objetivo que busca minimizar el costo total de transporte, reduciendo el número de vehículos utilizados. | Hibridación de dos metaheurísticas: HS “ <i>Harmony Search</i> ” y Recocido simulado. |
| (S. Meysam Mousavi et al., 2014) | Localización y programación para múltiples plataformas <i>Cross-Docking</i> | Se propone una solución híbrida entre programación estocásticas y lógica difusa. |
| (Küçüköğlü & Öztürk, 2014) | Diseño de una red de transporte para <i>Cross-Docking</i> | Soluciones obtenidas con recocido simulado |
| (Agustina et al., 2014) | Se propone un modelo de <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos y programación con zonas de consumo y ventanas de tiempo VRSP-CZHTW | Se resuelve para un problema de talla pequeña en CPLEX. |
| (Moghadam et al., 2014) | Modelo de <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos homogéneo, con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo. | Hibridación entre colonia de hormigas y recocido simulado para solucionar un modelo de Programación entera no lineal. |
| (Dondo & Cerdá, 2015) | Modelo de programación lineal entera mixta para <i>Cross-Docking</i> con ruteo de vehículos y alistamiento de pedidos “ <i>picking</i> ”. | Heurísticas de ramificación y acotamiento y técnicas de barrido. |

| Autor(es) y año | Tipo de <i>Cross-Docking</i> | Método de solución |
|---|--|---|
| (Dondo & Cerdá, 2014) y (Dondo & Cerdá, 2015) | <i>Cross-Docking</i> con múltiples puertas de entrada. | Mediante un modelo de programación entera mixta, resuelto mediante ramificación y acotamiento, se determina: la ruta, la programación del vehículo, la asignación de la puerta del muelle y la secuencia de carga y descarga. |

Tabla 2.5. Tipos de VRPCD y Métodos de Solución (Continuación)

| Autor(es) y año | Tipo de <i>Cross-Docking</i> | Método de solución |
|----------------------------|--|--|
| (Mohtashami et al., 2015) | Modelo multiobjetivo para minimización de tiempos, costo de transporte y número de viajes | Hibridación entre “ <i>Sorting Genetic Algorithm</i> ” y “ <i>Multiobjective Particle Swarm Optimization</i> ”. |
| (Ladier & Alpan, 2016) | Estado del arte comparativo de la literatura vs. las prácticas reales en la industria del <i>Cros-Docking</i> . | Estudio comparativo de los artículos producidos y la realidad de la praxis del <i>Cross-Docking</i> en la industria. |
| (Birim, 2016) | En un entorno <i>Cross-Docking</i> con <i>Vehicle Routing Problem</i> , se plantea con vehículos de diferentes capacidades. El nodo de inicio es la plataforma C-D. | Recocido simulado, encontrando nuevas soluciones de reducción de costo. |
| (Serrano et al., 2016) | <i>Cross-Docking</i> a nivel operativo | Se estudian diferentes operaciones a nivel interno en las instalaciones tipo <i>Cross-Docking</i> . Se elabora un modelo de costos en la industria automotriz y la incidencia de diferentes operaciones como: programación de cargas de trabajo y re-embalaje, sobre costos totales. |
| (Reddy et al., 2017) | <i>Cross-Docking</i> para La reducción del desperdicio de alimentos durante la adquisición, la recolección y el almacenamiento | Simulación por multi agentes. |
| (Baniamerian et al., 2019) | Problema rentable de generación de rutas de vehículos heterogéneos con <i>cross-docking</i> (PHVRPCD). | Modelo de programación entera mixta, para formular el problema matemático, pero la solución se realizó mediante una combinación de meta-heurísticas: VNS modificada, colonia de hormigas y algoritmos genéticos. |
| (Gelareh et al., 2020) | Problema de asignación de <i>cross-docking</i> (CDAP) que consiste en asignar orígenes a puertas de entrada y destinos a puertas de salida para minimizar el costo total en la plataforma C-D. | Se proponen ocho nuevos modelos MIP y se comparan con 11 casos de diferentes artículos. |

Fuente. Elaboración propia

2.3.3 Ruteo de Vehículos

En el caso de la gestión eficiente de la cadena, específicamente en lo concerniente a distribución, el ruteo de vehículos es uno de los aspectos fundamentales de la operación. Es tema obligado si se quieren abordar modelos de Inventario y ruteo o modelos de *Cross-Docking*; es por esto por lo que esta temática se desarrollará de manera extensiva en esta sección.

El VRP o ruteo de vehículos consiste en diseñar rutas con el fin de distribuir (o recoger) productos desde uno o varios depósitos hasta varios puntos de consumo, los cuales tienen una demanda asociada, ubicados en un plano euclidiano. Este problema recibe el nombre de *V.R.P.*, por sus siglas en inglés (*Vehicle Routing Problem*). Durante los últimos 60 años, ha tenido especial desarrollo; es así como existen gran variedad de versiones del problema original formulado por Dantzing y Ramser (1959). Las tipologías de este corresponden a diferentes combinaciones de parámetros y variables (número de vehículos, restricciones de capacidad, restricciones de tiempo y demanda, entre otros).

2.3.3.1 Formulación

El problema de ruteo de vehículos consiste en un grafo no dirigido $G = (V, A)$ donde V es un conjunto de nodos (vértices) $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ y A es un conjunto de arcos $A = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V, i < j\}$. El nodo v_1 representa el inicio de las rutas (depósito) y la partición del conjunto V definida por v_2, \dots, v_n representa a los nodos. Existe una flota K de vehículos, una matriz de costos $[D_{ij}]$ definida y simétrica con A . El *VRP* consiste en diseñar rutas de mínimo costo, que inicien y terminen en el depósito y que visiten cada proveedor solamente una vez (Piqueras, 2002).

2.3.3.2 Origen

El problema de ruteo de vehículos (*Vehicle Routing problem V.R.P.*) surge a partir de la formulación del problema del agente viajero (*Travelling Salesman Problem TSP*). Consiste en un agente de ventas que tiene que visitar n ciudades, comenzando y terminando en la misma ciudad, visitando solamente una vez cada ciudad y haciendo el recorrido de costo mínimo, este costo de recorrido puede estar expresado en tiempo o distancia, es decir, recorrer el mínimo de kilómetros o llevar a cabo un recorrido en el menor tiempo disponible. Cuando el número de viajeros (vehículos) se incrementa, se habla de un “problema de m agentes viajeros (m -*TSP*)”. El VRP es una generalización del m -*TSP* en la cual se tiene un depósito y m vehículos. El objetivo es construir

m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes. El VRP o problema de ruteo de vehículos, es el m -TSP a donde a cada cliente se le asocia una demanda y cada vehículo cuenta con cierta capacidad, por lo tanto, se puede afirmar que el problema del agente viajero es aquel que da origen al problema de ruteo (Olivera, 2004).

2.3.3.3 Taxonomía de los Problemas Tipo V.R.P.

A continuación, se presentan las diferentes variantes de problemas tipo VRP, de acuerdo con las condiciones específicas cambiantes de clientes, depósitos y flota de vehículos. Como ya fue mencionado en la sección 3.5.2. el problema se origina a partir del problema del agente viajero, llamado TSP, *Travelling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero), en el cual se contempla 1 vehículo. A partir de ahí se desprenden otros modelos de acuerdo con las variables y parámetros que se tienen en cuenta. El PTSP, *Probabilistic Travelling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero Probabilístico), modela condiciones o características probabilísticas. Cuando se trata de más de un vehículo, se habla de un m -TSP, *Multiple Travelling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero Múltiple). Entre estas categorías de varios vehículos, se pueden mencionar: el m -TSPTW, *Multiple Travelling Salesman Problem Time Windows* (Problema del Agente Viajero Múltiple con Ventanas de Tiempo), el m -PTSP, *Multiple Probabilistic Travelling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero Múltiple Probabilístico), m vehículos y probabilidades asociadas a los consumidores.

El CVRP (VRP con capacidades CVRP) es un problema tipo VRP en el cual una flota fija de vehículos de entrega con capacidad uniforme debe atender demandas conocidas para un solo producto desde un depósito común a un costo mínimo de transporte (Rocha et al., 2011).

El problema con flota heterogénea (FSMVRP). De acuerdo con la composición de la flota, se habla de modelos: VRPHF, *Vehicle Routing Problem Heterogeneous Fleet* (Problema de ruteo de vehículos flota heterogénea), en este caso los vehículos tienen diferentes capacidades

El VRP con múltiples depósitos (MDVRP) se presenta cuando una compañía puede tener muchos depósitos los cuales pueden atender a sus clientes. Si los clientes son agrupados (*clusterizados*) alrededor de los depósitos, entonces el problema de distribución debe ser modelado con un conjunto de VRP's. Sin embargo, si los clientes y los depósitos están entremezclados, entonces debe ser resuelto un problema de VRP multi-depósito (Olivera, 2004).

En los *VRP's* clásicos, típicamente el periodo de planeación es de un solo día. En el caso del VRP periódico, el clásico VRP es generalizado para ser extendido a un período de planeación de m días (Contardo & Cotardo, 2005; Du et al., 2007).

El SDVRP (VRP de entrega dividida *Split Delivery VRP*) es una relajación del VRP en donde se permite que el mismo cliente pueda ser atendido por diferentes vehículos si esto reduce el costo total (Renaud et al., 1996).

El VRP estocástico son modelos de VRP donde uno o varios componentes de la formulación son aleatorios. Tres diferentes clases de SVRP se presentan a menudo: clientes estocásticos: cada consumidor tiene una probabilidad i de presentarse y $1 - i$ de estar ausente. Demanda estocástica: La demanda de cada consumidor es una variable aleatoria. Tiempos estocásticos: Los tiempos de servicio y tiempos de viaje son variables aleatorias (Peterson & Chervit, 1991; Ryzin & Bertsimas, 1991).

El VRP con recogida y entrega (VRPPD: *VRP with Pick-up and Delivering*) es un VRP en el cual la posibilidad que los consumidores devuelvan algunas mercancías es contemplada. Así en VRPPD es necesario tener en cuenta que los bienes que los consumidores devuelven al vehículo de reparto deben caber en él (Rocha et al., 2011).

El VRP con *Backhauls* (*VRPB*) es un tipo de VRP en el cual los consumidores pueden demandar o retornar algunas mercancías. Los modelos permiten retornos al depósito para reabastecer mercancías, este tipo de modelos pueden clasificarse como: VRPB, *Vehicle Routing Problem with Backhauls* (Problema de Ruteo de Vehículos con Retornos). El VRPBTW, *Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows* (Problema de Ruteo de Vehículos con Retornos), Retornos y restricciones de tiempo (Contardo & Cotardo, 2005).

Un aspecto importante del *VRP* que ha sido ampliamente pasada por alto es el uso de satélites para reaprovisionar vehículos durante una ruta. Cuando es posible, el satélite permite reaprovisionar los conductores para continuar haciendo entregas antes del cierre del su turno sin necesariamente devolverse al depósito central (Laporte et al., 2013).

El VRPTW es el mismo problema que el VRP con la restricción adicional que en el VRPTW hay una ventana de tiempo asociada a cada consumidor, definiendo un intervalo en el cual el

consumidor debe ser atendido. El intervalo en el depósito es llamado horizonte de programación (Kolen et al., 1987).

En casos de recolección de bienes, donde se requiere un nivel de cumplimiento muy alto en la entrega de los mismo a otros puntos, se formula un problema VRP multi depósito, resuelto con colonia de hormigas (Niroomand & Nsakanda, 2018)

Casos donde se planean rutas en entorno de producción de artículos perecederos, donde se requiere controlar la temperatura en el almacén y transporte, es resuelto a través de dos algoritmos de búsqueda híbrido (Manouchehri et al., 2020).

algunos casos se combina el ruteo de vehículos e inventario, como en este caso donde se hace un modelo de recolección de residuos de la industria de baterías, la cual es altamente contaminante. Se logra proponer un modelo de optimización que integra el *Green VRP*, en un ruteo de vehículos ecológicos y el inventario del primer escalón de dicha cadena. Se consideran costos de mantenimiento de inventario, costo de transporte y el costo de las emisiones de carbono, logrando resolver cuatro casos del problema, mediante recocido simulado en GAMS (Sherif et al., 2021).

2.3.4 Transporte

El Transporte se puede entender como un recurso que permite cambiar de temporalidad y ubicación algún bien, de ahí su importancia en las cadenas de suministro. En esta sección, para efectos de esta tesis, se abordarán estudios recientes que aborden algunos aspectos relacionados.

La incertidumbre en la demanda es uno de los principales retos a superar en el transporte de bienes, es necesario establecer acciones para superar estas deficiencias especialmente en el comercio mayorista de alimentos de primera necesidad (Boulaksil et al., 2019). Además, los clientes son más exigentes en cuanto a tiempos de entrega y calidad, haciendo aún más deseable tener una logística urbana o de última milla, interconectada tecnológicamente y a la altura de los requerimientos de servicio y ambientales (Kim et al., 2021; Ni et al., 2018) .

Por otra parte, en Colombia existen limitaciones referentes a infraestructura e intermodalidad en el transporte; de manera opuesta, en otros países diferentes modos y medios se combinan para atender el comercio local y exterior (Archetti & Peirano, 2020).

Diferentes modelos de simulación de sistemas de carga y pasajeros son resueltos con agentes (Stinson et al., 2020). Es importante no perder de vista la minimización de costos de transporte,

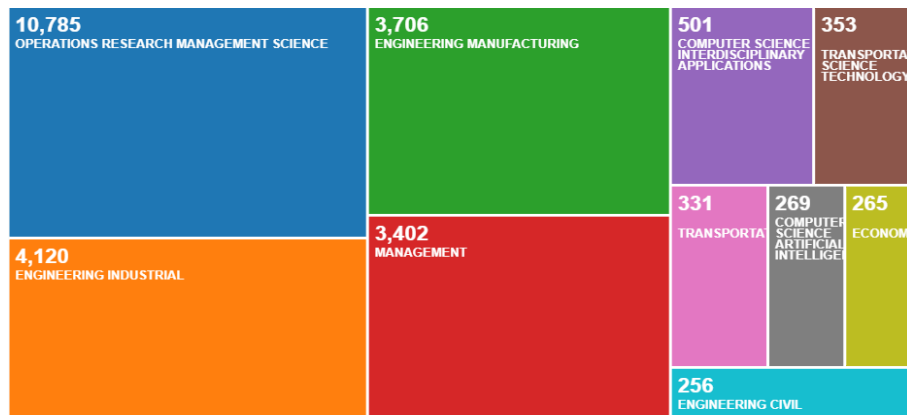
que se llevan la mayor parte del costo logístico (Mouloua & Oulamara, 2007), donde se aborda un modelo resuelto con programación dinámica. Optimizando la eficiencia de algunos recursos, mediante una adecuada asignación, también es posible encontrar mejoras en los costos (Yildiz et al., 2010).

Algo que llama la atención con relación a la búsqueda de la eficiencia en las operaciones logísticas, es la tendencia a buscar la integración entre inventario y transporte. Esto permite que la información se utilice de manera adecuada y el flujo de bienes no tenga interrupciones. Existen brechas en cuanto a modelos integrados que consideren la aleatoriedad de la demanda, la escasez y sean de tipo multi-producto; también que se establezcan estructuras de costo que permitan la inclusión de esquemas 3PL, envío directo y Cross-Docking (Mosca et al., 2019).

2.4 Modelos de Gestión de Inventarios

El último análisis se realiza a la palabra clave “*Inventory*”, con la cual se obtuvieron los resultados expresados en la Figura 2.14, donde las mayores áreas con que se relacionan son: investigación de operaciones, ingeniería industrial e ingeniería de manufactura. Las áreas relacionadas son muy similares con las de distribución, pero no se encuentran temas ambientales, lo cual es interesante, puesto que se había presentado en todas las palabras claves anteriores.

Figura 2.14. Áreas Relacionadas con el Término “Inventory”



Fuente. Elaboración a partir de Web of Science

Se observa en la Figura 2.15, que de 2013 y 2019 son los años con mayor tendencia a la producción académica relacionada con temas de inventario.

cantidades, los tiempos de reabastecimiento, los niveles de servicios y el tamaño de la orden (Chase et al., 2009).

En el campo de la investigación de operaciones, la metodología para la gestión de inventarios parte desde la definición de un modelo matemático, sea determinista o estocástico² que esté acorde con la demanda del producto o familia de productos. Una vez definido el modelo, se opta por una política de inventarios acorde con él. Posteriormente, se habla de un sistema de procesamiento de la información (software). Es necesario definir políticas óptimas con respecto a cuándo, cuánto y a quien reabastecer (Hillier & Lieberman, 2010).

2.4.1 Modelos Deterministas para el Control de Inventarios

La teoría de inventarios surge con el modelo de Cantidad Económica de Pedido (*EOQ*), propuesto por Harris en 1930 (Mantilla & Torres, 2014). Los más conocidos modelos deterministas para el control de inventarios son:

- Modelo de la cantidad económica de pedido para compra de un solo producto
- Modelo de la cantidad económica de orden de producción de un solo producto
- Modelo con descuento por compras en cantidad de un solo producto
- Modelo de la cantidad económica de pedido con escasez para un solo producto
- Modelo de la cantidad económica de pedido para múltiples productos.

2.4.2 Modelos Estocásticos para el Control de Inventarios

Este tipo de formulaciones consideran algunos elementos inciertos en el modelamiento de la gestión de inventarios, entre los cuales se encuentran:

- Modelo de un único período con demanda incierta
- Modelo de inventario de seguridad por orden
- Modelo de inventario de seguridad por unidad
- Modelo de demanda aleatoria con ventas perdidas (escasez)
- Modelo con ajustes por tiempos de entrega variables

² De acuerdo con el comportamiento de la demanda a atender. Los modelos deterministas consideran cantidades conocidas por abastecer, por período. Los modelos estocásticos consideran incierta la demanda durante el lead time (período de espera) de abastecimiento.

2.4.3 Esquemas de Gestión de Inventarios y Distribución por Terceros

En el nuevo esquema de la administración de las operaciones logísticas, se han venido planteando procesos integrados ofertados por terceros, que se encargan del almacenamiento, distribución de producto terminado y agenciamiento aduanero; permitiendo que las organizaciones desarrollen su objeto social sin tener que invertir esfuerzos y recursos en funciones que un experto desarrollará con eficiencia debido a la infraestructura y experticia que ya posee.

El proveedor de servicios logísticos consiste en una compañía que provee uno o múltiples servicios logísticos a los que pueden acceder los consumidores. Preferiblemente estos servicios son integrados. Dichas firmas facilitan el movimiento de partes y materiales de proveedores a fabricantes; y de producto terminado de productores a distribuidores y minoristas.

Entre los servicios ofrecen transporte, almacenamiento, plataformas de distribución, gestión de inventarios, transporte de carga, agenciamiento aduanero. El 3PL (*Third-Party Logistics Provider*) es una tercerización de todas o la mayoría de las operaciones logísticas de la compañía a una compañía especializada. El término 3PL fue por primera vez usado en los inicios de los setenta para identificar las compañías de mercadeo intermodal en los contratos de transporte. Hasta ese punto, los contratos de transportes se habían caracterizado solamente por dos partes: el embarque y el porte (Chopra & Meindl, 2007; Vitasek, 2013).

De acuerdo con lo anterior y de manera ampliada, la 4PL (*Fourth Party Logistics*) consiste en la administración estratégica de la cadena de suministro, en la cual las partes interesadas (proveedor de servicios logísticos y clientes) comparten riesgos y beneficios, lo cual permite que el prestador de servicios planifique y coordine el flujo de información y, diseñe la arquitectura logística, pero no ejecuta los flujos físicos, los cuales son tercerizados a un 3PL.

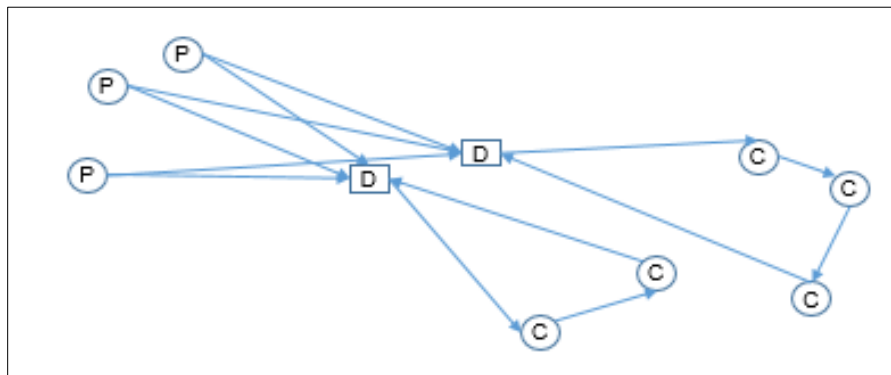
2.4.4 Problema de Ruteo e Inventarios

El problema de ruteo e inventarios (*Inventory Routing Problem o IRP*) surge en un contexto de inventario administrado por el proveedor (*Vendor Management Inventory VMI*), donde se reducen los costos logísticos y se agrega valor al servicio. La información acerca de las demandas es entregada al proveedor quien administra el inventario, determina las cantidades, la periodicidad de entrega y las rutas de distribución, pudiendo combinar los clientes y sus pedidos, optimizando la utilización de los medios de transporte. Básicamente deben tomarse tres decisiones: cuándo servir

a los proveedores, en qué cantidades entregar y cómo combinar clientes en las rutas diseñadas (Coelho et al., 2012).

La Figura 2.17 presenta la configuración de una red logística, donde las decisiones involucran proveedores (P), distribuidores (D) y consumidores (C). Las interrelaciones entre los actores son complejas e implican determinar duración de períodos de planeación, políticas de entrega, cantidades, tipo de vehículos a utilizar, diseño de rutas, programación y horarios de despacho de rutas.

Figura 2.17. Configuración de una Red Logística



Fuente. Elaboración propia

El problema de ruteo e inventarios es una extensión de los problemas de ruteo de vehículos (*Vehicle Routing Problem V.R.P.*) en el cual las decisiones de control de inventario y ruteo deben tomarse simultáneamente. Entre el conjunto de consideraciones a tratar, se encuentran: horizonte de planeación (finito o infinito), costo de mantener inventario (puede incluirse o no), tasas de producción o consumo (conocidas o desconocidas), períodos de consumo discretos o continuos en el tiempo, políticas de entrega (Golden et al., 2008).

Este problema está clasificado como un problema complejo, debido a la naturaleza combinatoria en su estructura y el número de soluciones posibles. Se considera un problema de clase *NP-hard (Non Polynomial-hard)*, porque no se conocen algoritmos que lo solucionen de manera exacta en tiempo polinomial.

El primer estudio en este campo, data de 1983 y fue el aportado por Bell y otros autores, en el que realizan una aplicación en una compañía distribuidora de gases (oxígeno, hidrógeno), logrando integrar la administración del inventario, con la programación y despacho de vehículos; el caso

fue resuelto mediante un modelo de optimización, aplicaron un algoritmo de ruta más corta mediante relajación Lagrangiana (Bell et al., 1983) logrando así ahorro del 6 al 10% en los costos de operación. A partir de ese momento, diferentes formulaciones del tema se han planteado en diversos trabajos.

Federgruen y Zipkin en 1984, modificaron la heurística de Fisher and Jaikumar, propuesta originalmente en 1981 para solucionar casos de ruteo de vehículos (*VRP*). Dicha modificación fue aplicada en un caso de *IRP* con demandas aleatorias. Blumenfield y otros en 1985 consideraron aspectos de distribución, inventario y costos de preparación en el modelamiento. Burns et al en 1985 minimizaron una función de costos de transporte y costos de inventario para un problema de distribución. Dror et al en 1985 estudiaron varios algoritmos de solución para el *IRP* y los compararon. En 1986, Dror y Levy adaptaron una heurística de aplicación al *VRP* para un *IRP*. Dror y Ball en 1987 solucionaron un problema de *IRP*, cambiando el período de planeación de un año a varios períodos inferiores. Anily y Federgruen en 1990 propusieron el primer algoritmo de *clusterización* para *IRP*, para un depósito y múltiples puntos de consumo. La mayoría de los trabajos iniciales suponen tasas de consumo determinísticas (Bertazzi & Speranza, 2012).

En 1985, Golden y otros, realizaron una aplicación a una distribuidora de gas propano, donde formularon dos modelos, el primero es un algoritmo que asigna entregas de gas a diferentes días de una semana, luego se resuelve un *Vehicle Routing Problem*; el algoritmo dos asigna los días a rutas, ambas soluciones fueron comparadas con el sistema llevado por la compañía, presentando mejoras en la operación (Golden et al., 1985).

Restricciones de ventanas de tiempo y retornos para este tipo de problemas, eran mencionadas Golden y Assad en 1986 como últimos avances en el tema (Golden & Assad, 1986). En 1989, Chien y otros presentan una formulación matemática para *Inventory Routing Problem*, teniendo como restricciones la capacidad de los vehículos y la de los depósitos (Chien, et al., 1989).

Un *inventory routing problem* con demandas consideradas aleatorias y fallas de ruta en un horizonte de planeación de 12 semanas y con diferentes ubicaciones de clientes fue propuesto en el trabajo de Trudeau & Dror en 1992, los autores obtuvieron soluciones a dicho problema, evitando de esta manera quedarse sin inventario (Trudeau & Dror, 1992).

Para 1995, Bramel y Sinchi Levi formularon una heurística de localización para problemas de inventario y de ruteo con vehículos capacitados, los autores reportan que dicha propuesta fue

testeada en ambos casos, obteniendo soluciones para problemas generales (Bramel & Simchi-Levi, 1995).

Una propuesta para un almacén que maneja diferentes referencias y que suple varios detallistas es desarrollada por Viswanathan y Mathur; suponen demandas conocidas y constantes, productos entregados al granel, combinando diferentes rutas; la función objetivo consiste en determinar políticas de reaprovisionamiento que especifiquen las rutas a utilizar y cantidades a entregar que minimicen el costo de inventario y de transporte, generando una nueva heurística de solución y abordando el problema multi-producto (Viswanathan & Mathur, 1997).

En 1998, se presentaron varias propuestas. Bard y otros incluyeron un almacén central y varios satélites donde los camiones entregan y vuelven a ser cargados para continuar con la operación. Se probaron heurísticas de *Clark and Wright*, *GRASP* y de barrido (modificada), los autores sugieren que el tomador de decisiones escoge el método de solución y los resultados fueron validados en la distribución de gas propano (Bard et al., 1998).

Chan y otros proponen en 1998, un análisis probabilístico para diferentes soluciones para un *IRP* de un depósito y varios puntos de entrega (Chan et al., 1998). Christiansen y Nygreen (1998b) consideran un problema de ruteo de barcos y toma de decisiones con respecto al inventario llevado en los mismos. De igual manera, en otro artículo, estos mismos autores, proponen un modelo para solucionar la planeación de los despachos de barcos con ventanas de tiempo y restricciones de inventarios (Christiansen & Nygreen, 1998).

Para 1999, Reiman y otros proponen un análisis de sistemas de tráfico pesado para el complejo problema de inventario y ruteo estocástico y dinámico, donde prediseñan un tour *TSP (Travelling Salesman Problem)* y un controlador dinámico decide el número de unidades a entregar. En una segunda etapa, se elige cual es el siguiente punto de entrega, hasta seguir con la tercera y cuarta etapas, aplicando el esquema de control desarrollado (Reiman et al., 1999).

Un modelo de inventario y ruteo utilizando programación dinámica estocástica fue planteado en 2001 para demandas no conocidas en el reparto de gases industriales (Berman & Larson, 2001)

En otras propuestas se establecen valores máximos y mínimos de niveles de inventario de una red de clientes y un productor debe abastecerlos antes de que alcancen el nivel más bajo; el

problema consiste en encontrar los espacios discretos de tiempo entre llegadas y las rutas a atender (Bertazzi et al., 2002).

Para horizontes cambiantes de planeación y demandas que varían diariamente se planteó un modelo *IRP* con costos de penalización por desabastecimiento de clientes (Jaillet et al., 2002a). Para un *IRP* con demandas estocásticas en un entorno de inventario administrado por el proveedor se plantea un proceso de decisión de Márkov (Kleywegt et al., 2002). Otro enfoque utiliza inteligencia artificial, específicamente multi-agentes para representar clientes, proveedores y entregas en un *IRP*, realizando una comparación con otros métodos publicados (Lao & Leong, 2002).

Un modelo de localización para centros de distribución considerando inventarios de seguridad y costos de mantenimiento de inventario es propuesto también en 2002 (Daskin et al., 2002).

Relacionado con el tema, pero para modelos de localización multi-depósito, estos se combinan con decisiones de ruteo y tamaño de inventarios, usando un enfoque de rutear primero y localizar después; para el cual en una fase 2, se aplica una heurística de solución (Liu & Lee, 2003).

En 2004, para el caso de un *IRP* estocástico y multi-producto considerando un horizonte de planeación infinito, se propone solucionarlo mediante programación dinámica, cadenas de Márkov y programación lineal (Adelman, 2004).

La programación entera es utilizada para la programación de entregas y luego, mediante un método aproximado se hace la fase de ruteo, teniendo en cuenta la solución de la fase 1 (Campbell & Savelsbergh, 2004).

Otra implementación interesante es la que se realiza en una cadena de supermercados holandesa, donde la formulación del *IRP* se hace periódica semanal desde el centro de distribución hacia las tiendas, teniendo en cuenta diferentes ciclos donde cambia la demanda de cada tienda, por horas, días y temporadas del año, para lo cual se utilizan información de pronósticos por tienda, tiempos de viaje y distancias, costo y restricciones de despacho, logrando un ahorro del 4% del costo de la operación logística durante el primer año (Gaur & Fisher, 2004).

Bajo un entorno *VMI*, se proponen soluciones aproximadas y con un bajo esfuerzo computacional, utilizando cadenas de Márkov para resolver un *IRP* estocástico (Kleywegt et al., 2004). Una hibridación de metaheurísticas tales como búsqueda tabu (*TABU Search*) y recorrido

simulado (*Simulated Annealing*) son utilizadas para dar solución a un problema IRP donde la función objetivo consiste en minimizar el costo total de la operación (Liu & Lin, 2004).

Un *IRP* multi-producto con reposición y capacidad limitada de vehículo, demandas determinísticas y consumo constante es propuesto y es resuelto con un método heurístico (ramificación y precio) y heurística greedy (Sindhuchao et al., 2005).

En 2007 se presenta un estado del arte del *IRP* donde se realiza una clasificación de los trabajos presentados hasta ese momento en cuanto a horizonte de planeación: modelos de único, múltiples períodos y de horizonte infinito. También se clasifican respecto a patrones de demanda aleatoria (*SIRP*), los autores recomiendan proponer soluciones a éste problema, donde se integren otros componentes aleatorios como el tiempo de viaje y la probabilidad de disponibilidad de puntos de entrega (Moin & Salhi, 2006).

En 2007 se presenta una formulación de *Vendor Managed Inventory Routing Problem* resuelta con el algoritmo de ramificación y corte (Archetti et al., 2007).

Una descomposición cruzada y relajación *Lagrangeana* separable produce un esquema de dos sub-problemas tipo transporte, obteniendo un algoritmo de solución eficiente es propuesto por (Cortés y Aceves, 2007).

Un algoritmo de solución para integrar los dos eslabones de la cadena (distribuidores y minoristas) es propuesto para coordinar funciones de transporte e inventario, teniendo una flota con capacidad limitada (Jung & Mathur, 2007).

No solamente el desarrollo de los modelos es importante, también la medición de la ejecución de los programas de ruteo e inventarios, por esta razón es planteado un trabajo que determina la efectividad de los mismos (Song & Savelsbergh, 2007).

Otros trabajos son presentados con diferentes enfoques de solución: con programación dinámica para casos simple determinísticos (Archibald et al., 2009), cadenas de Márkov para casos estocásticos (Hvattum et al., 2009), programación dinámica estocástica para industria de gas (Berman & Larson, 2001), rediseño de redes de distribución (Escobar, 2012), para productos perecederos con entregas divididas *-Split and Delivery IRP-* (Yu et al., 2012) son propuestos.

Se observa que del 2012 hacia el presente, ha crecido la atención por estas propuestas de integración de modelos, además se introduce el concepto de *IRP* con transbordos en un entorno

VMI, resuelto mediante un procedimiento de búsqueda de vecindades modificado y probado bajo dos políticas de reabastecimiento: la de máximo nivel y la de orden hasta nivel (Coelho et al., 2012a).

Dos trabajos presentados en 2012 aclaran el panorama del IRP y clasifican la tipología según demanda, período de planeación y flota (Coelho et al., 2012b; Bertazzi & Speranza, 2012).

En el 2013 se presenta una aplicación *IRP* a productos agrícolas (Liao et al., 2013). En 2020, se resuelve un IRP para la recolección de materiales para un sistema productivo, dando excelentes soluciones (Bertazzi et al., 2020).

En esta sección se destaca la amplia e importante contribución a este tema por parte de la comunidad científica, sin embargo, aún hay temas por abordar, combinación de técnicas a explorar, entre otros tópicos de investigación, a fin de aportar a la solución de este tipo de formulaciones matemáticas complejas.

En la taxonomía del IRP existen tantas formulaciones como características tenga el sistema bajo estudio, las cuales son reflejadas en cambios en la función objetivo, o en las restricciones.

Existen en la literatura casos de demanda conocida o desconocida, restricciones de tiempos de viaje, único o múltiples depósitos, composición de flota y tiempos de distribución, entre otras.

La Tabla 2.6 presenta la clasificación de los modelos IRP, propuesta para este trabajo. La clasificación propuesta utiliza cuatro categorías de evaluación de los trabajos consultados:

- Composición de la flota homogénea o heterogénea), refiriéndose a la capacidad de los vehículos expresada en volumen o peso.
- Cantidad de depósitos con los que cuenta el proveedor, que puede ser un solo centro de distribución, o varios almacenes.
- Las políticas de atención al cliente, que puede ser por tamaño de orden, o hasta alcanzar un nivel máximo preestablecido.
- La demanda, que puede ser conocida con anticipación, o solamente en el punto de entrega.

Tabla 2.6. Clasificación Propuesta

| Autores | Composición de flota | | Cantidad de depósitos | | Políticas | | Demanda | |
|---|----------------------|-------------|-----------------------|----------|--------------|-------|----------------|-----------|
| | Homogénea | Heterogénea | Uno | Múltiple | Máximo Nivel | Orden | Determinística | Aleatoria |
| (Archetti, Bertazzi, Laporte, & Speranza, 2007) | | | X | | | X | X | |
| (Bard, Huang, Jaillet, & Dror, 1998) | | | X | | | | | X |
| (Bell et al., 1983) | | X | | | | | | X |
| (Bertazzi, 2014) | X | | X | | | | X | |
| (Bertazzi et al., 2014) | | | | | X | | X | |
| (Bertazzi & Speranza, 2012)(Survey) | X | X | | | X | X | X | |
| (Cáceres, 2013) | | | X | | | | | X |
| (Campbell & Savelsbergh, 2004) | | | | | X | | | |
| (Chien, T. , Balakrishnan, A., Wong, 1989) | X | | | X | | | | |
| (Christiansen, 1999) | X | | X | | | | X | |
| (Coelho, Cordeau, & Laporte, 2012) | | | | | X | X | X | |
| (Coelho, Laporte, & Cordeau, 2012)(Survey) | X | X | X | X | X | X | X | X |
| (Cortés, M., Aceves, 2007) | X | | X | | | | | |
| (Gaur & Fisher, 2004) | | X | | X | | | | X |
| (Jaillet, Bard, Huang, & Dror, 2002) | | | | X | | | | X |
| (Jung & Mathur, 2007) | X | | X | | | | | |
| (A. J. Kleywegt, Nori, & Savelsbergh, 2014) | X | | X | | | | | X |
| (Liao, Li, & Wu, 2013) | | | X | | | | | |
| (Liu & Lee, 2003) | | | | X | | | | |
| (Liu & Lin, 2004) | | | | X | | | | |
| (Moin & Salhi, 2006)(Survey) | X | X | X | X | X | X | X | X |
| (Reiman, Rubio, & Wein, 2014) | X | | | | | X | | X |
| (Rotman & Ms, 2001) | | | X | | | | | X |

Fuente. Elaboración a partir de Bard et al. (1998); Bertazzi & Speranza (2012); Coelho et al.

(2012a); Coelho et al. (2012b); Jaillet et al. (2002a); Moin & Salhi (2006)

El IRP es un problema complejo de optimización combinatoria, el cual usualmente se formula como un modelo de programación entera. El IRP está definido como un grafo $G = (V, A)$ donde V es un conjunto de nodos (vértices) $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ y A es un conjunto de arcos $A = \{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V, i < j\}$. El nodo v_1 representa el inicio de las rutas (depósito) y la partición del conjunto V definida por v_2, \dots, v_n representa a los clientes. Existe una flota H de vehículos, una matriz de costos $[D_{ij}]$ definida y simétrica con A (Chien et al., 1989).

2.4.5 Inventory Routing Problem Y Cross-Docking

Tradicionalmente, bajo el esquema de centros de distribución, el proveedor almacena la mercancía en estanterías y la ubica en un sector de la bodega; cuando el cliente hace el pedido hay que alistarlo y embarcarlo en para llevarlo a su destino, generando demoras, daños en los productos por exceso de manipulación, además de sobrecostos por preservación y manejo de materiales. Algunos modelos trabajan integración de dos o más eslabones de la cadena de abastecimiento mediante esta estrategia (Dondo et al., 2011).

Las técnicas de solución halladas en la literatura combinan la estructura de un modelo de ruteo de vehículos VRP (*vehicle routing problem*) con *Cross-Docking*, sin embargo, en la búsqueda bibliográfica, solamente se encontró un trabajo donde se aborda la formulación de IRP (*Inventory Routing Problem*) y *Cross-Docking*; tal vez porque se asume que al no haber almacenamiento (o realizarse máximo por 24 horas), estos dos podrían ser conceptos opuestos.

Este trabajo que aborda el problema conjunto (IRP-CD), el cual soluciona de manera analítica un modelo de múltiples proveedores y consumidores para varios tipos de productos, en el que se diseñan rutas de mínimo costo generadas para cumplir con una demanda conocida, la autora reporta soluciones óptimas hasta para 626 nodos, sin embargo, el tiempo computacional es elevado (mayor a 20 horas). La función objetivo es de segundo orden, la cual debió ser linealizada para efectos de aplicar el algoritmo de generación de columna, utilizado para este caso en particular (Pourhossein, 2014).

2.5 Modelo de Inventarios Administrados por el Proveedor (*Vendor Management Inventory V.M.I.*)

Consiste en el esquema de administración de inventarios donde el proveedor genera los pedidos de compra y toma decisiones con respecto al tamaño del inventario de reposición de su cliente, el cual revisa de manera continua.

Con su implementación, se obtienen beneficios tales como la reducción del tiempo de transporte, mayor rentabilidad y evita el desabastecimiento del cliente. En muchos casos, es necesario compartir datos básicos de la demanda con el fin de no presentar faltantes (Keskin et al., 2010).

El VMI permite ajustar y alinear las decisiones de almacenamiento con la gestión de transporte, reportando mejoras en el servicio al cliente y aportando a la reducción de la incertidumbre de la demanda (Kao & Hsu, 2002).

En cuanto a tipos de *VMI*, Arango *et al* reportan tres categorías: El modelo VMI colaborativo, donde se comparten información y se desarrollan planes de producción conjuntos. El modelo de transferencia del costo, donde los costos de gestión del inventario se transfieren al proveedor. Finalmente, el modelo automatizado donde se combinan elementos del modelo anterior generando unas etapas de colaboración, planificación, ejecución y evaluación (Arango et al., 2011).

En la literatura revisada, se encuentran diferentes aplicaciones y enfoques de solución, entre ellos Kwak *et al*, que realizan una simulación discreta para resolver un problema de *VMI* (Kwak et al., 2009). Bersani *et al* realizan una aplicación en la industria de petróleos, para la distribución de combustible a las estaciones de servicio, este modelo optimiza las entregas con un VRP capacitado (Bersani et al., 2010).

Cárdenas et al en 2012 presentan una heurística alternativa para solucionar un *VMI* multi-producto y multi-restringido basado en el modelo de la cantidad económica de pedido *EOQ* (*Economic Order Quantity*) con órdenes pendientes, considerando costos mixtos se resuelve con un modelo de programación lineal entera (Cárdenas-Barrón et al., 2012).

La coordinación vertical de transporte e inventario es tratada en Chen *et al*, además de analizar una función objetivo que maximiza la utilidad en la operación bajo condiciones de cooperación y

de no cooperación, mostrando un mejor desempeño en cuando a costo y niveles de inventario e el modelo de cooperación (Chen et al., 2010).

Con el fin principal de estudiar los métodos para reducir el *lead time*, su impacto en los stocks de seguridad y el costo total esperado en un modelo de demanda aleatoria Glock en 2012 presenta un trabajo, en el cual considera el *lead time* como la sumatoria de los tiempos de producción, preparación y de transporte (Glock, 2012). Çetinkaya y Lee en 2014 proponen un VMI para demandas aleatorias, donde el proveedor puede darle prioridad a pedidos grandes (Cetinkaya & Lee, 2014).

La lógica difusa es propuesta para resolver un problema de múltiples productos, restringido a la capacidad del almacén y de las entregas (Roozbeh-Nia et al., 2014).

Sadeghi utiliza una política *VMI* para disminuir efecto látigo (Sadeghi et al., 2014). Shu estudia el diseño de una red logística en la cual una compañía aplica VMI en el escalón almacén-detallista e incorpora al problema las decisiones sobre localización, transporte y precios (Shu et al., 2012). Bertazzi propone un VMI con múltiples productos y múltiples políticas de envío (Bertazzi, 2008).

Stålhane *et al*, proponen un problema que combina el embarque tradicional de mercancías con una política *VMI*, la formulación matemática se resuelve usando un enfoque híbrido que combina *Branch and Price* y generación a priori (Stålhane et al., 2014). En Yu et al, es presentado un novedoso algoritmo híbrido para solucionar el VMI (Yu et al., 2013).

2.6 Almacenamiento

El proceso de almacenamiento es muy importante en los sistemas logísticos y de cadena de suministro. Tienen un horizonte de planeación que se mueve entre lo táctico y lo operativo (mediano, corto plazo). El almacenamiento va de la mano con el manejo de materiales y se justifica un especial cuidado en estos procesos, con cuatro aspectos que se logran al ejecutar una eficiente gestión en los mismos: reducción de costos entre las etapas de producción y transporte; coordinar la oferta y la demanda; permitir el almacenamiento de producto en proceso; y, finalmente, facilitar el mercadeo (Ballou, 2004a).

Esta gestión de almacenes es crucial en la obtención de máximos rendimientos de recursos y capacidades, dependiendo de las particularidades y volumen de las mercancías manejadas; es

necesario hacer énfasis en el uso actual de las tecnologías de la información y las comunicaciones en la función de gestión de almacenes (Espinal et al., 2010).

Varios estudios se han llevado a cabo para mejorar la eficiencia en las diferentes actividades que componen dicho proceso de almacenamiento, de los cuales se destacan para esta tesis: un trabajo propuesto para mejorar la eficiencia en la gestión de pedidos, el cual rediseña el proceso de cumplimiento de pedidos de producción y almacenamiento, mediante un algoritmo de decisión para minimizar el tiempo de procesamiento del pedido y el tiempo de almacenamiento, mediante la optimización de colonia de hormigas y un algoritmo genético (Luo et al., 2019).

También para mejorar la eficiencia en la preparación de pedidos, es posible resolver la asignación de ubicaciones de almacenamiento (SLAP), utilizando algoritmos de recocido simulado, obteniendo así reducciones de tiempos de espera en toda la cadena de suministro (Zhang et al., 2019).

De acuerdo con las nuevas tendencias de la cadena de suministro, se requieren tiempos de almacenamiento más cortos y es cuando la operación del almacén cambia su estrategia por el *Cross-Docking*. Se formulan algunos modelos de sincronización entre los procesos de fabricación y almacenamiento y es así como se propone un algoritmo metaheurístico el cual permite al decisor configurar procesos de producción y almacenamiento en diferentes escenarios posibles (Luo et al., 2019). En la sección donde se abordó el *Cross-Docking*, se hizo la revisión correspondiente al mismo.

Otros trabajos abordan la programación de operaciones internas en un centro de distribución, mediante diferentes formulaciones de programación lineal entera mixta (Fanti et al., 2011).

Al realizar la revisión de la literatura, se observa que es menor el énfasis en procesos de almacenamiento y manejo de materiales; que otros tales como: almacenamiento y distribución.

CAPÍTULO 3

MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES

3. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan los elementos que motivaron y dieron origen a la tesis. Se aborda la descripción del problema de investigación, su justificación y formulación. Posteriormente, los objetivos y las hipótesis de investigación.

3.1 Problema de Investigación

De acuerdo con lo indagado, es necesario incorporar un enfoque conjunto al diseño de redes de distribución, específicamente en los aspectos relacionados con distribución e inventarios, de tal forma que puedan tomarse decisiones simultáneamente, mediante modelos integrales, que recojan la variabilidad y dinámica de los sistemas logísticos actuales (Ahmadi-Javid & Hoseinpour, 2015). La integración de estos procesos redundaría en ahorros para la operación logística (Ghiani et al., 2004; Lambert et al., 1998), debido a que para las empresas, uno de los aspectos que más influye en la estructura de costos (cerca del 30% del costo total del producto), son las operaciones logísticas (Selva & Incae, 2009). Sin embargo, el enfoque de modelamiento hasta los 80's separaba los modelos de gestión de inventarios de los modelos de distribución (Cáceres, 2013; Coelho et al., 2012b; Moin & Salhi, 2006) y es así como surgen los modelos que integran estos dos procesos donde uno de los objetivos es la minimización de costos (Bertazzi & Speranza, 2012; Moin & Salhi, 2006).

Las cadenas de suministro operan en un entorno de incertidumbre debido a múltiples aspectos variables y dinámicos tales como: economías cambiantes que afectan la oferta y la demanda de productos, incertidumbre asociada a los tamaños de lotes pedidos por los clientes, tiempos de respuesta cada vez más cortos exigidos por los clientes, varios eslabones (productores, mayoristas, distribuidores, minoristas y consumidores) que se integran a través de diferentes procesos logísticos (abastecimiento, producción, almacenamiento y distribución), flujos de materiales y de información, redes de distribución en diversas ubicaciones geográficas, el avance de la tecnología, entre otros. Estos aspectos hacen que el diseño y ejecución de las actividades relacionadas con la cadena de suministro sean complejas para los tomadores de decisiones (Das, 2011; De Rosa et al., 2013, 2014; Jouzdani et al., 2013; Shao et al., 2015).

La cadena de suministro garantiza el flujo de materiales, información y recursos desde los proveedores, productores, fabricantes, comerciantes; hasta los clientes y consumidores. De igual manera, integra procesos de aprovisionamiento, almacenamiento, transformación, gestión de inventarios, distribución y acompañamiento al cliente. El desempeño de un sistema logístico en una cadena de suministro es un factor determinante en las operaciones de una empresa y se mide en términos de eficiencia (costo), tiempo de respuesta al cliente y niveles de servicio (Chopra & Meindl, 2013; Donath et al., 2002; Orjuela-Castro, 2018; Taylor, 2008; Vitasek, 2013).

De acuerdo con lo enunciado anteriormente, en las cadenas de suministro, el proceso de distribución es uno de las más importantes de dicha cadena, puesto que es el encargado, junto con los procesos logísticos de aprovisionamiento, inventario y almacenamiento (Orjuela-Castro, 2018); de enlazar cada uno de los eslabones de ésta, además de garantizar el flujo efectivo de materiales. Dicha función de distribución es influenciada por un número de factores tales como: decisiones políticas y económicas globales, avances tecnológicos, ambientales, requerimientos de transporte, entre otras variables macro (Das, 2011; Das & Sengupta, 2009; Gan et al., 2018; Perea et al., 2009; Xu et al., 2012).

Uno de los objetivos al diseñar el proceso de distribución en una cadena de suministro, debe ser el de minimizar el tiempo total del sistema (Taylor, 2008). Otro aspecto mencionado con relación a la finalidad de la distribución consiste en optimizar los *trade-off* entre el costo de distribución e inventarios (Stadtler & Kilger, 2008b). A partir de esta última premisa de estos autores, se introduce en esta tesis la visión integrada de los procesos de distribución e inventario, que se desarrollará a lo largo de la misma.

Algunos modelos integrados son susceptibles de ser aplicados en contextos de inventario administrado por el proveedor –*V.M.I. Vendor Management Inventory*–, donde el fabricante o distribuidor es responsable de todas las decisiones relacionadas con el mantenimiento de los niveles de inventario de los minoristas, a fin de reducir el efecto látigo -acumulación de inventarios en los primeros eslabones de las cadenas de suministro, debido a la incertidumbre acumulada aguas abajo en la misma cadena- que afectan los costos de tenencia de inventarios, afectando la eficiencia (Cetinkaya & Lee, 2014; Sadeghi et al., 2014; Vitasek, 2013; Yu et al., 2013).

Hay que mencionar, además de la integración de los procesos de distribución e inventario, la conveniencia del diseño de redes de distribución desde un punto de vista de planeación conjunta a

largo, mediano y corto plazo. Variados autores coinciden en algunas funciones a nivel estratégico, táctico y operativo que deben ser tenidas en cuenta. De acuerdo con la revisión de la literatura con ocasión de esta tesis, se presenta un resumen en la Tabla 3.1, titulada: “Acciones a planear en el diseño de redes de distribución”, la cual presenta clasificadas según la etapa de planeación, cada una de las actividades relacionadas halladas en la literatura.

Tabla 3.1. Acciones a Planear en el Diseño de Redes de Distribución

| Estratégicas (Largo Plazo) | Táctico (Mediano Plazo) | Operativo (Corto Plazo) |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Estructura de la red de distribución. • Localización plantas, proveedores, centros de distribución, nodos de distribución, rutas. • Planes maestros agregados. • Asignación de Proveedores. • Asignación de cliente a áreas. • Planes agregados a ser despachados por arco de transporte. • Costo de la propiedad • Accesibilidad a subsidios del Gobierno. • Proximidad a rutas de tren, redes de agua o aeropuertos. • Cercanía a Centros comerciales o zonas francas. • Disponibilidad de mano de obra calificada disponible. | <ul style="list-style-type: none"> • Reaprovisionamiento de los centros de distribución. • Suministro de materiales por parte de compras. • Cantidades para entregar y períodos de tiempo entre entregas no determinísticas. • Gestión de distribución: moviendo productos en camiones, embarques, aviones y trenes. • Gestión de almacenamiento: moviendo inventarios en los depósitos, almacenes y centros de distribución. • Gestión de órdenes: capturando las órdenes de los clientes desde la remesa hasta la generación de la factura. • Variables en la gestión de distribución incluyen: Velocidad, fiabilidad, seguridad, calidad, medio ambiente, costo. | <ul style="list-style-type: none"> • Cantidades por despachar. • Tamaño de lote de despacho. • Rutas de atención a clientes. • Reabastecimiento a bajo costo. • Incertidumbre en la ejecución de la información de las rutas. • Cumplir con la demanda de los clientes, en la rutas, la cual no siempre es conocida con anticipación de manera precisa. |

Fuente. Elaboración a partir de Bartolacci et al. (2012); Chen et al. (2014); Ganesan (2015b); Gendreau et al. (1996); Kleywegt et al. (2004); Lei et al. (2011); Moghaddam et al. (2012); Moin & Salhi (2006); Monterroso (2014); Rei et al. (2010); Ryzin & Bertsimas (1991); Scott et al. (2011); Stadler & Kilger (2008a); Tan et al. (2007); Zsidisin & Ritchie (2009)

Ciertamente, se han planteado diferentes modelos que utilizan la estadística y la investigación de operaciones con el fin de optimizar la eficiencia económica de la gestión de inventarios, tal es el caso de la cantidad económica de pedido y todas sus variantes, los modelos de revisión continua,

revisión periódica, cálculo de stocks de seguridad (Disney & Lambrecht, 2007; Schimchi-Levi et al., 1997).

Sin embargo, algunos modelos aplicados en la logística de distribución pertenecen al tipo de problemas de optimización combinatoria y la mayoría de algoritmos de solución para este tipo de situaciones se relacionan con los clasificados por la literatura como *NP-hard* (Piqueras, 2002). Es necesario reducir el espacio de soluciones mediante la combinación de métodos de solución heurísticos o de aproximación (Pillac et al., 2013). Este tipo de formulaciones matemáticas se pueden hacer aún más complejas si se incluyen variables con comportamiento aleatorio, tales como la demanda o los tiempos de operación (Gendreau, 2010b, 2010a; Rei et al., 2010), lo que hace de este tipo de formulaciones enriquecidas, un interesante aporte para desarrollo teórico del campo de la investigación de operaciones, la logística y la gestión de las cadenas de suministro.

Es así como se identifican en la vasta literatura científica, oportunidades de investigación en campos relacionados con la integración de propuestas de distribución e inventarios, que aún no han sido suficientemente explorados tales como: los modelos de inventarios multi-producto con demandas variables, que aborden la pérdida de oportunidad por la no venta debida a la escasez de producto, modelos de pérdidas de productos perecederos, plataformas *Cross-Docking*, transporte multimodal y modelos de reducción o cero emisiones; es decir, modelos que atiendan a la realidad de los sistemas de distribución actuales (Mosca et al., 2019).

Puede colegirse de lo indagado, que una alternativa al almacenamiento tradicional, para productos perecederos y de alta rotación, es el *Cross-Docking*, que consisten en plataformas donde casi desaparece el concepto de almacenamiento (Van Belle et al., 2012) y se reducen el *picking* -alastamiento- (Lee et al., 2006); presenta aún aspectos poco indagados en cuanto a variables y parámetros aleatorias tales como: tiempos de retraso por tráfico, condiciones climáticas o demandas bajo condiciones de incertidumbre. Además de aplicaciones en productos perecederos, mejora en tiempos de servicio al cliente y mínima manipulación de productos (González-La Rotta & Becerra-Fernández, 2017).

Otros estudios identifican aspectos estocásticos no solamente en la demanda, si no en la oferta también; oportunidades de medición de la satisfacción del cliente frente a la eficiencia operacional (costo) de la terminal *Cross-Docking* y temas relacionados con reducción de la contaminación y

responsabilidad corporativa como brechas de conocimiento relacionadas con este tipo de instalaciones logísticas (Mavi et al., 2020).

Hasta el momento, la literatura aporta una base de conocimiento que permite establecer que las cadenas de suministro y por ende sus sistemas de distribución ofrecen diversas situaciones complejas sujetas a la realidad *per se* de las mismas. En este contexto surgen preguntas de interés, que direccionan el problema:

- ¿Es posible evitar las ineficiencias expresadas en incumplimientos a los clientes y sobre costos, si las redes logísticas se diseñan con criterios de integración de los procesos de inventario y distribución?
- ¿De realizarse ese diseño integrado, cómo extender esa toma de decisiones a los niveles táctico y operativo en los procesos ya enunciados de distribución e inventario?
- ¿Una red de distribución que utilice diferentes tipos de instalaciones logísticas (red híbrida) logrará mantenerse en la frontera eficiente costo-respuesta?
- ¿Mejorarán las plataformas *Cross-Docking*, los niveles de servicio al cliente reduciendo las ventas perdidas por escasez?

Estos interrogantes permiten formular la siguiente pregunta de investigación, a partir de la revisión de la literatura:

¿Cómo el diseño de una red híbrida; que combine diferentes tipos de instalaciones logísticas; e integre distribución, inventario y almacenamiento; en sus etapas de planeación estratégica, táctica y operativa; mejora la eficiencia (costo logístico), la respuesta (rapidez) y, los niveles de servicio al cliente?

Para responder a lo anterior, se plantean el siguiente objetivo general y los siguientes objetivos específicos:

3.2 Objetivos de Investigación

3.2.1 Objetivo General

Esta investigación tiene por objetivo general:

Proponer un modelo de red híbrida, que combine diferentes tipos de instalaciones logísticas, e integre distribución, gestión de inventario y almacenamiento; en las etapas de planeación

estratégica, táctica y operativa, con el fin de mejorar el costo logístico e incrementar la capacidad de respuesta al cliente.

3.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos serán los siguientes:

Objetivo Específico 1: Establecer un estado del arte de los diferentes modelos de redes de distribución, considerando todos los procesos logísticos involucrados y las nuevas tendencias de gestión de distribución e inventarios.

Objetivo específico 2: Modelar una formulación matemática de la red de distribución de la cadena de suministro interna de una compañía, considerando las etapas de planeación estratégica, táctica y operativa de los procesos integrados de distribución e inventarios.

Objetivo específico 3: Proponer un método de solución al modelo que permita el manejo de grandes conjuntos de datos, para las medidas de desempeño establecidas.

Objetivo específico 4: analizar diferentes escenarios de respuesta, con el fin de evaluar el comportamiento de la red de distribución propuesta, en un horizonte de tiempo determinado.

Objetivo específico 5: validar el modelo y las técnicas de solución, mediante las técnicas estadísticas de contrastación del comportamiento del costo logístico, tiempo de respuesta actuales versus propuestos, en la red de distribución de un operador logístico.

3.3 Hipótesis de Investigación

Para la presente investigación se tiene una hipótesis general y tres hipótesis auxiliares:

- Hipótesis general: Existen condiciones bajo las cuales, configurar una red de distribución en la que se consideren al mismo tiempo la presencia de terminales *Cross-Docking* y bodegas de almacenamiento, presenta mejores indicadores de desempeño en un entorno multi objetivo. Esta configuración en la que se consideren decisiones de orden estratégico, táctico y operativo, presentarán mejores condiciones de desempeño en cuanto a costo total de la distribución y cumplimiento de las metas de niveles y promesa de servicio.

- Hipótesis 1: Al utilizar diferentes tipos de instalaciones logísticas, combinando diferentes temporalidades de almacenamiento y diferentes capacidades, permitirá reducir el costo fijo y

variable del uso de instalaciones, además de incrementar la rapidez de la cadena interna de suministro de una compañía.

- Hipótesis 2: Integrar la gestión de la distribución e inventarios en una sola formulación, permitirá reducir los costos de operación logística, por efecto de las economías de escala.
- Hipótesis 3: Es necesario buscar métodos alternativos, a los métodos tradicionales de optimización, que ofrezcan buenas soluciones no tan costosas en términos computacionales, dichos métodos pueden compararse con indicadores de eficiencia propuestos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

Esta tesis aborda decisiones del diseño de redes de distribución para operadores logísticos 4PL, en los tres niveles de la planeación: estratégico, táctico y operativo. Los objetivos buscan alcanzar una reducción en el costo logístico total y en los tiempos de respuesta a lo largo del horizonte de planeación (Zhang et al., 2016).

El problema a solucionar consiste en el diseño de una red de distribución que combinen diferentes instalaciones: plataformas *cross-docking*, donde no existe el concepto de almacenamiento; centros de distribución tradicionales, amplias superficies dedicadas al almacenamiento y preservación de productos, con extensivo uso de la tecnología; y, bodegas o almacenes de menos capacidad, los cuales potencialmente se ubican en regiones apartadas donde hay dificultades con la infraestructura regional, poca población y bajas posibilidades de inversión en tecnología.

La hibridación de instalaciones no es suficientemente tratada en la literatura, por eso resulta de especial interés, en particular con el auge de los operadores logísticos 4PL, quienes ofrecen soluciones a la medida de los clientes y enfrentan dificultades con respecto al desarrollo logístico en algunas regiones del país (Baquero et al., 2020).

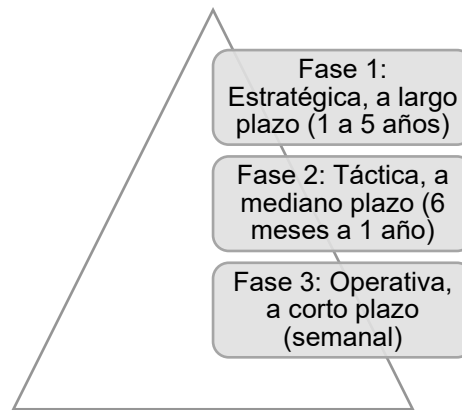
El reto consiste en lograr eficiencia en la distribución, a través de disminuciones en el costo de ésta. La distribución debe ser contemplada sistémicamente desde los tres estadios de planeación de dicho proceso. Es importante incluir en la incidencia sobre el costo aspectos tales como: **cumplimiento de niveles de servicio**, expresados como el porcentaje de unidades entregadas efectivamente al cliente y, además; **cumplimiento en la promesa de servicio**, expresada en tiempo de entrega o *Lead Time*; el cual para efectos de esta tesis se define como la sumatoria del tiempo transcurrido entre la colocación de la orden y la entrega a satisfacción en el sitio del cliente.

Como tesis se ha planteado la hipótesis de investigación: **Existen condiciones bajo las cuales, configurar una red de distribución en la que se consideren al mismo tiempo la presencia de terminales Cross-Docking y bodegas de almacenamiento, presenta mejores indicadores de desempeño en un entorno multi objetivo. Esta configuración en la que se consideren decisiones de orden estratégico, táctico y operativo, presentarán mejores condiciones de desempeño en cuanto a costo total de la distribución y cumplimiento de las metas de niveles y promesa de servicio.** Esta premisa se examinará a través de un paradigma positivista de

teorización de una hipótesis de investigación, que buscará validarse o refutarse a través de la recolección de datos de la situación, mediante métodos o técnicas propias de la ingeniería y su contrastación estadística con un diseño experimental propuesto (Creswell, 2009).

La metodología de investigación con un enfoque cuantitativo (Hernández-Sampieri et al., 2010), abarca fases relacionadas con el abordaje del problema y su solución. Tiene forma piramidal, puesto que la solución debe atender el enfoque de planeación abordado en el presente trabajo. El horizonte de planeación total son 5 años, durante los cuales deben tomarse decisiones semanales, mensuales y anuales. La Figura 4.1 presenta las tres fases sugeridas y el lapso planeado para cada una de ellas.

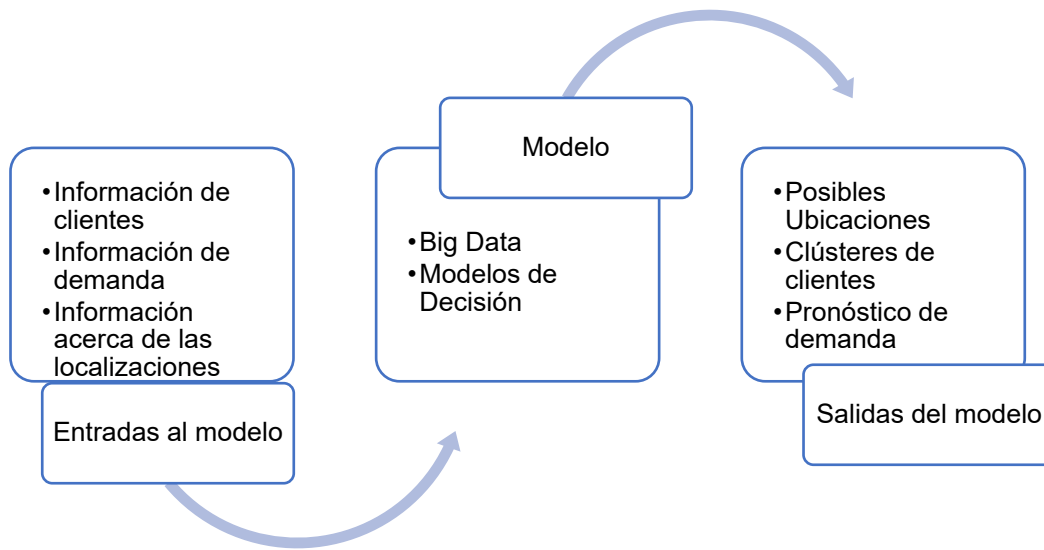
Figura 4.1. Fases para Plantear el Modelo



Fuente. Elaboración propia

4.1 Fase 1: Estratégica

En esta fase las decisiones son a largo plazo, en un horizonte de 1 a 5 años. Se abordará el diseño de la red de distribución. El objetivo es identificar las posibles localizaciones y tomar decisiones con respecto a dónde eventualmente se puedan ubicar los almacenes intermedios, centros de distribución (CEDIS), dónde ubicar plataformas de consolidación tipo *cross-docking* (CD) (Ahmadi-Javid & Hoseinpour, 2015; Ballou, 2004a; Chopra & Meindl, 2013; Musavi & Bozorgi-Amiri, 2017). Identificar el número de clúster y la pertenencia de cada cliente a cada clúster. Así como, caracterizar posibles patrones de comportamiento de la demanda (Bosona & Gebresenbet, 2011; Gan et al., 2018; Ganesan, 2015b; Ko et al., 2006; Liu et al., 2013; Marmolejo et al., 2016b). La Figura 4.2 presenta el proceso durante esta fase.

Figura 4.2. Proceso Fase Estratégica

Fuente. Elaboración propia

1. Configuración de clúster de clientes. Se agrupan los clientes de acuerdo con posibles similitudes, no solamente por tipo de productos, sino por el objetivo perseguido en su estrategia de distribución; puede ser el mínimo costo logístico, con una estrategia de servicio al cliente, basada en un alto nivel de servicio (disponibilidad de unidades en inventario) o la disminución del tiempo de respuesta. Para la realización de lo anterior, se requiere información acerca de los objetivos de distribución de los clientes, sus familias de productos, el tamaño de lote, y las cantidades promedio a movilizar. Una vez realizado el método de agrupación, mediante técnicas de *Big Data*, preferiblemente, se tiene como salidas de este, una agrupación o clúster de clientes, que permite reducir la talla del modelo (Maheshwari et al., 2020).

2. Pronóstico de demanda. Es necesario tener como entradas, las cantidades históricas movilizadas para cada cliente, además de algunas variables macroeconómicas, que influyen en el comportamiento de los productos. Se obtiene un pronóstico para un horizonte de 1 a 5 años (Christou, 2012).

3. Estudio de posibles localizaciones. En esta actividad se establecen algunas posibles locaciones de CEDIS y CD, la cuales serán información de entrada del modelo de localización. Para este fin es posible utilizar diferentes técnicas de análisis de grandes conjuntos de datos *Big Data* y técnicas de decisión multicriterio (Peker et al., 2016; Sumrit, 2020; Yener & Yazgan, 2019). Los siguientes aspectos requieren ser identificados con el fin de tomar decisiones de ubicación que

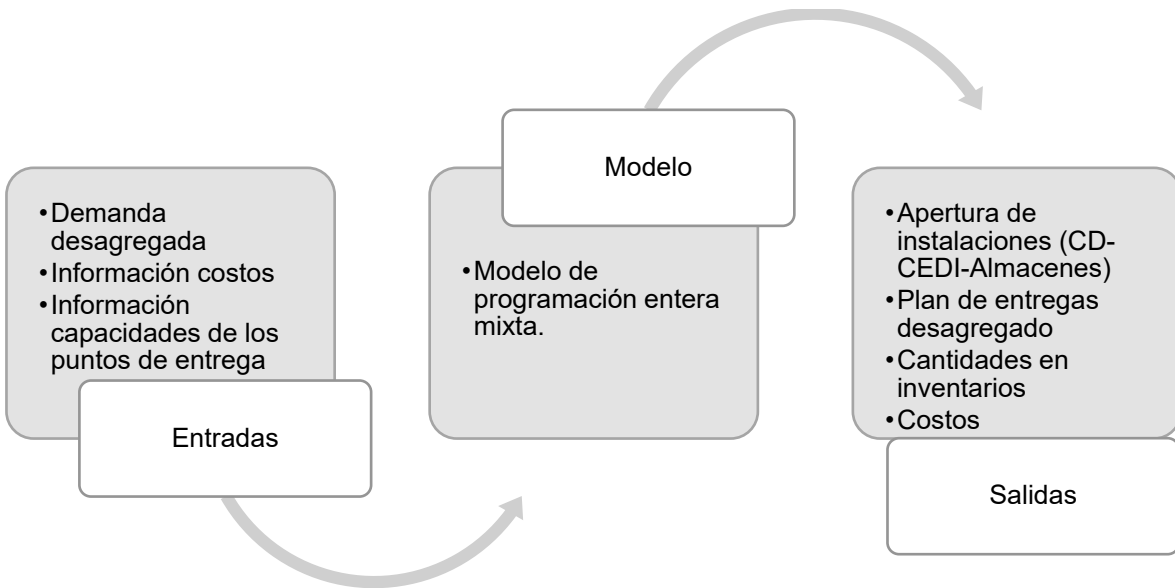
atienda a los criterios de mínimo costo y rapidez en la cadena: Aspectos estratégicos, Aspectos tecnológicos, Aspectos macroeconómicos, Aspectos infraestructura logística, Aspectos políticos, Aspectos competitivos, Tiempo de respuesta al cliente, Costos logísticos, Costos de instalaciones, Costos indirectos.

Una vez obtenida la información de entrada, se plantea un modelo que genera como salidas:

1. Las posibles ubicaciones de instalaciones (CEDIS o CD), su uso y capacidad potencial.
2. Costo fijo y variable de la apertura y uso de instalaciones
3. Agregación de clúster de clientes y número óptimo de clúster de clientes
4. Demanda potencial agregada y comportamiento en un horizonte amplio de 5 años

4.2 Fase II: Táctica

En esta fase se toman decisiones a mediano plazo, en un horizonte de planeación de un año, véase Figura 4.3. Para lo cual se requiere como información de entrada la obtenida en las salidas de la fase anterior. Es necesario además parametrizar información adicional: demanda y su desagregación en períodos de tiempo inferiores a un año, tener información sobre costos de almacenamiento, costos de operación en los almacenes, costos de penalización de unidades no entregadas, valor monetario del cumplimiento de la promesa de servicio, promesa de servicio, costos fijos y variables de transporte, capacidad de vehículos a utilizar de acuerdo con el tipo utilizado en cada tramo del país, niveles de servicio ofrecidos por cliente, entre otros (Ballou, 2004a; Chase et al., 2009; Dai et al., 2019; Disney & Lambrecht, 2007; Donath et al., 2002; Escobar, 2012; Gan et al., 2018; Ivanov et al., 2014; Kalcsics et al., 2010; Muñoz-Villamizar et al., 2014; Orjuela-Castro, 2018; Palacio et al., 2018; Perea et al., 2009; Schimchi-Levi et al., 1997; Taylor, 2008; Thanh et al., 2008; Ullrich, 2013). La Figura 4.3 presenta la metodología propuesta para esta fase.

Figura 4.3. Fase Táctica

Fuente. Elaboración propia

La información de entrada requerida para el modelo de programación entera mixta es:

1. Demanda: se utilizan algunas de las entradas del modelo anterior, entre los cuales están los grupos de clientes (clúster) y el pronóstico de demanda de los clientes.
2. Las ubicaciones potenciales, su uso y capacidades asignadas, son salidas del modelo aplicado en la Fase I, que se convierten en entradas de la Fase II.
3. Información relacionada con los costos de mano de obra, inventario, penalización, procesamiento por unidad y uso de la tecnología, los cuales son parámetros del modelo táctico.
4. Con respecto a la ubicación final de los productos, deben conocerse las cantidades a entregar y las ubicaciones, además de las políticas de almacenamiento, información de capacidades, políticas y niveles de servicio requeridos por el distribuidor o detallista (cliente de los clientes).
5. Estudio de la operación de recogida. Esta actividad busca determinar las cantidades recogidas por el operador logístico, la ubicación de los puntos de recogida de mercancía y la capacidad de los vehículos.

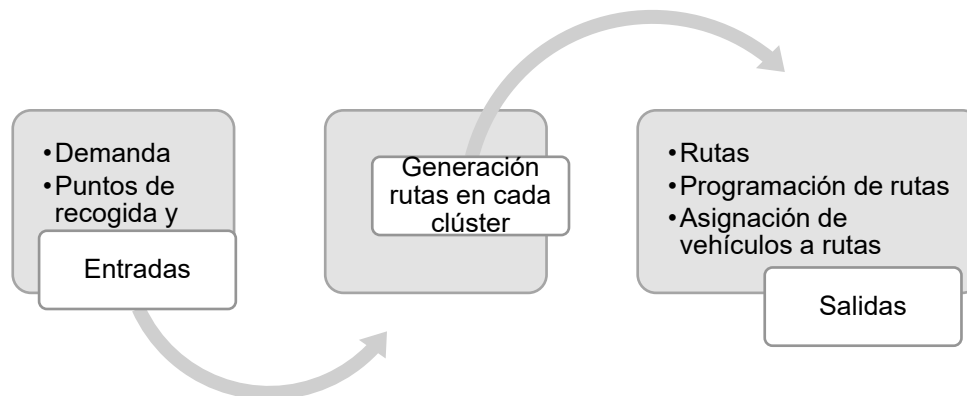
A partir del modelo propuesto y resuelto en esta fase, se espera tener como salida el diseño de la red, el plan de distribución óptimo, las cantidades a entregar, costos y niveles de inventario. Este modelo debe hacer la transición entre lo estratégico y lo táctico al brindar información detallada

de aspectos que involucran inversiones a largo y mediano plazo. Una vez obtenido dicho un modelo de distribución se baja de nivel en la pirámide de planeación y se pasa a la fase III que es la que arroja la programación diaria y asignación de rutas para cumplir con los requerimientos del cliente.

4.3 Fase III: Ruteo, Programación y Asignación

En esta fase se toman decisiones a corto plazo, en un horizonte de planeación semanal o diario. Se requiere como información de entrada la demanda, los puntos de recogida y entrega, capacidades y costos logísticos; todo esto es información obtenida en las fases anteriores (Agustina et al., 2014; Chien et al., 1989; Dondo et al., 2011; Dondo & Cerdá, 2015; Kleywegt et al., 2002; Pourhossein, 2014; Santos et al., 2011; Van Belle et al., 2012). La Figura 4.4 presenta la metodología propuesta para esta fase.

Figura 4.4. Fase Operativa



Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con la propuesta metodológica de bucle, utilizada en la tesis, las salidas de la fase II se convierten en entradas de la fase III. Otro tipo de información de entrada para el cumplimiento del modelo de ruteo, asignación y programación es:

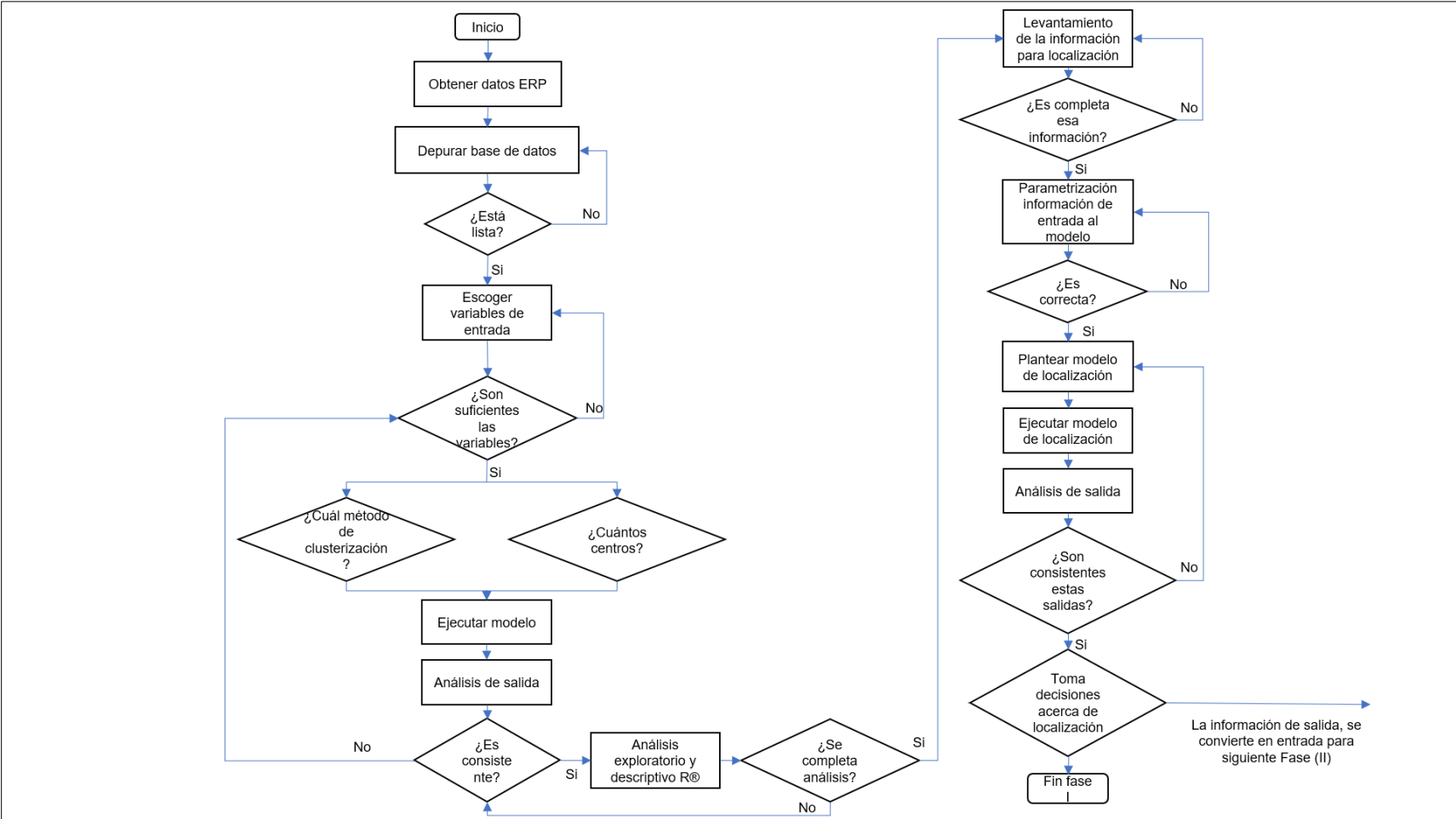
1. Capacidades de vehículos. Estos pueden variar de acuerdo con la oferta de los proveedores logísticos.
2. Distancia entre los puntos.
3. Costo de transporte

Una vez planteado y resuelto el modelo de programación de rutas, se definen como salidas:

1. Las rutas propuestas para la atención y el cumplimiento de la distribución de productos del cliente del operador 4PL
2. La asignación de vehículos de diferentes capacidades a las rutas y a los clientes, de acuerdo con la oferta del proveedor 3PL.
3. La programación de envíos

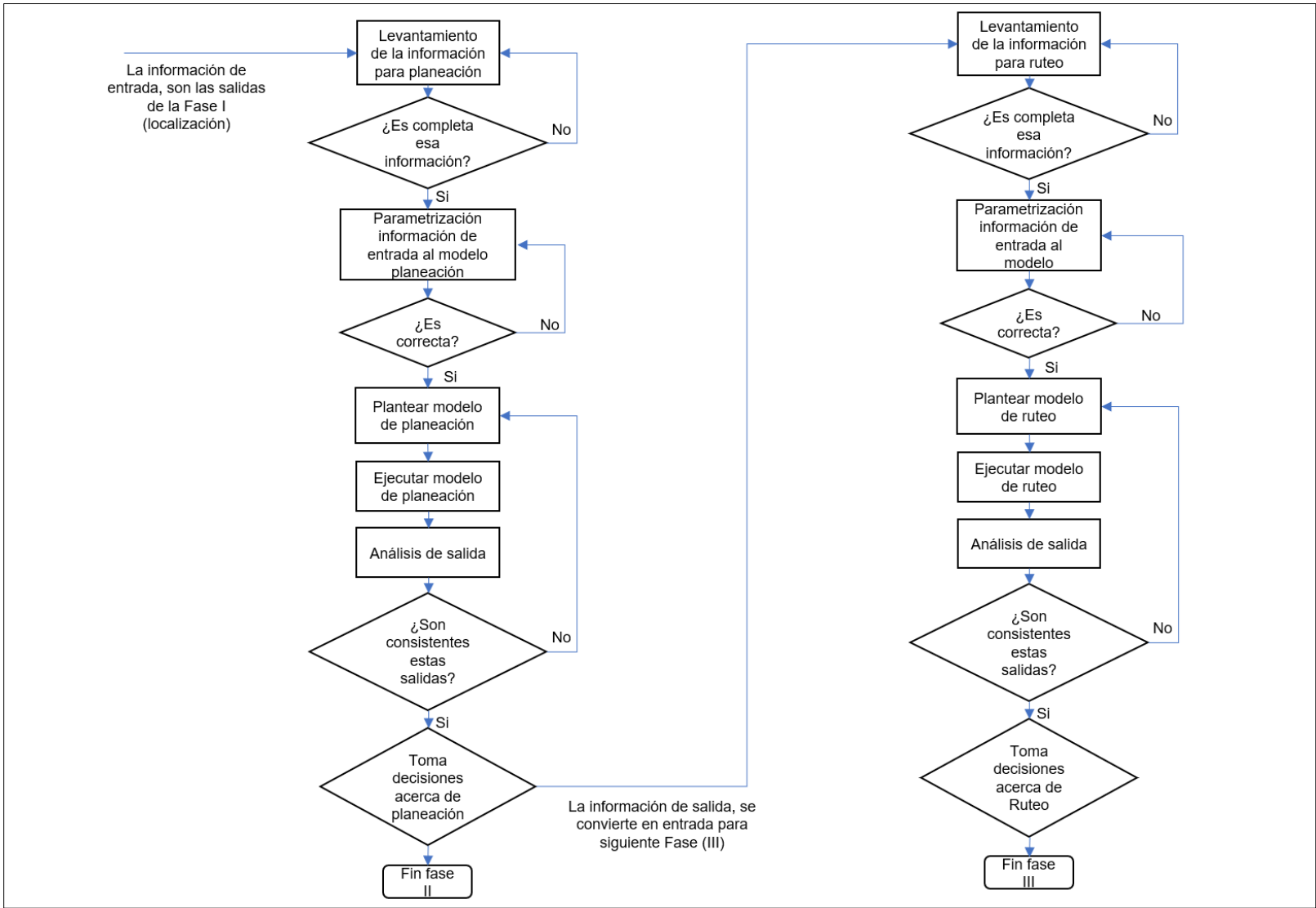
La Figura 4.5 resume en un diagrama de flujo la metodología propuesta para la solución del problema de investigación. En ella se especifica cómo las salidas de cada fase se convierten en las entradas de la siguiente fase.

Figura 4.5. Diagrama de Flujo de la Metodología de Fase I



Fuente. Elaboración propia

Figura 4.6. Diagrama de Flujo de la Metodología de Fases II y III



Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO 5

MODELO

5. MODELO

De acuerdo con lo propuesto en la metodología, se proponen tres fases que corresponden a los tres hitos de la planeación estratégica. A continuación, se planteará el modelo matemático para cada una de dichas fases. Para facilitar la comprensión, se detallarán los subíndices, luego los parámetros, seguidamente las variables y sus definiciones. Posteriormente, de acuerdo con cada fase, se hará la inclusión de ecuaciones correspondientes a función objetivo y restricciones.

5.1 Fase Estratégica

En esta fase se aplican técnicas multicriterio y de exploración de grandes conjuntos de datos para obtener información acerca de cuáles sería las mejores ubicaciones, clúster de clientes y pronóstico de demanda.

5.1.1 Localizaciones Factibles

A continuación, se presentan las técnicas de análisis multicriterio, tales como el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP). Este tipo de modelos establecen un orden priorizado para las posibles alternativas, en este caso específicos en temas de diseños de redes de distribución y cadenas de suministro, son utilizados para determinar dónde es deseable ubicar instalaciones logísticas, de acuerdo con criterios (Goepel, 2018; Peker et al., 2016; Sumrit, 2020) entre los que se encuentran: el costo de la mercancía movilizada, la distancia entre los orígenes y destinos, aspectos demográficos, variables macroeconómicas y la carga impositiva por región. Se propone un modelo de AHP con las siguientes características.

5.1.1.1 Índices

i = índice de orígenes de mercancía (puertos)

j = índice de ciudades destino (clientes)

r = índice de criterios a considerar

5.1.1.2 Parámetros

Costo de la mercancía entregada, la unidad de agregación es en unidades monetarias (\$COP)

C_j = costo de mercancía [\$COP]

d_{ij} = distancia del puerto i a la ciudad j

$l_j =$ localización potencial j

$p_{jr} =$ probabilidad de ocurrencia del criterio r en la localización j

5.1.1.3 Variables de Análisis

Se tomarán de acuerdo con lo reportado por la literatura las siguientes variables:

$H_r =$ Número de habitantes en cada ciudad j [millones de habitantes]

$PIB_r =$ Producto Interno Bruto por región [miles de millones de pesos]

$P_r =$ Porcentaje del PIB que corresponde a impuestos por región [%]

$ZF_r =$ Número de zonas francas por región

5.1.1.4 Modelo

Plantear una matriz de alternativas y criterios, donde las alternativas correspondan a las ciudades que incidan en el 80% de las entregas totales, expresados en unidades monetarias. Véase expresión [1] Matriz de alternativas y criterios.

$$A_{jr} = \begin{matrix} & d_{1j} & d_{2j} \dots & ZF_r & PIB_r & P_r & H_r \\ \begin{matrix} l_1 \\ \vdots \\ l_j \end{matrix} & \begin{bmatrix} l_1 d_1 & l_1 d_2 \dots & l_1 ZF_1 & l_1 PIB_1 & l_1 P_1 & l_1 dH_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_j d_1 & l_j d_2 \dots & l_j ZF_r & l_j PIB_r & l_j P_r & l_j dH_r \end{bmatrix} & \end{matrix} \quad jXr$$

Se calcula la matriz de probabilidades utilizando la ecuación [2] $P_{jr} = \frac{l_j \text{criterio}_r}{\sum_{j=1}^J l_j \text{criterio}_r}$ para cada

$l_j \text{criterio}_r$ y se obtiene la expresión [3] $P_{jr} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{1r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{jr} & \dots & p_{jr} \end{bmatrix}_{jXr}$ Posteriormente, calculamos

el vector de prioridades que se notará $VP_r = [p_{r1} \ p_{r2} \ p_{r3} \ p_{r4} \ p_{r5} \ p_{r6}]$. Finalmente, se realiza la multiplicación entre la matriz $|P_{jr} X VP_r|$ y se obtiene la matriz normalizada que se notará como $|N_{jr}|$. Para cada fila de la matriz normalizada, se suman las probabilidades y se obtiene un vector de resultados el cual se ordena en forma ascendente y se encuentran las ciudades con las más altas valorativas para ser consideradas como localizaciones deseables para ubicar una instalación logística, sea una plataforma Cross-Docking, un CEDI o un almacén intermedio.

5.1.2 Clúster de Clientes

En el marco teórico se expuso la importancia de las técnicas exploratorias de datos en la solución de problemas de gran talla, donde hay conjuntos de datos muy extensos y se requiere agrupar estos conjuntos en grupos representativos, que recojan los atributos similares entre ellos (Prodhon & Prins, 2014). En distribución (logística) se generan conjuntos numerosos de datos de los sistemas ERP (*Enterprises Resource Planning*), pero a las salidas generadas por los mismos no se les da un uso completo (M. Gan et al., 2018; ŠKERLIČ et al., 2016). En esta tesis se propone la aplicación de este conjunto de herramientas estadísticas y numéricas con el fin de simplificar los modelos de optimización, utilizando reducción de talla (*clusterización*) de parámetros de entrada (Maheshwari et al., 2020; Oudouar & Fellahi, 2017).

5.1.2.1 Índices

i = índice de coordenadas X

j = índice de coordenadas Y

r = índice de atributos deseables para cluster j

5.1.2.2 Parámetros

k = número de centros o k medias

d_{ij} = distancia euclídea entre los puntos $(x_0, y_0); (x_i, y_j)$

5.1.2.3 Variables de Análisis

Se tomarán de acuerdo con lo reportado por la literatura las siguientes variables:

I_j = Distancia entre las mediciones y cada centroide

$m_{i,j}$ = pendiente

$\Delta\%_{i,j}$ = razón de cambio porcentual

5.1.2.4 Algoritmo Propuesto

La propuesta de esta tesis es realizar un agrupamiento por clústeres no solamente teniendo en cuenta la cercanía geográfica entre clientes, sino también valores con similitudes entre: región, las cantidades recibidas por los clientes, las principales ciudades de entrega, los días en tránsito de la

mercancía, los meses de entrega y el medio de transporte utilizado. Una vez elegidas las variables, se calculan diferentes corridas de k medias, variando el valor del número de centros y generando un procedimiento particular para esta aplicación, que se convierte en novedoso. Se escogen varios valores de k medias, para ello se utiliza como primer valor k la raíz cuadrada del total de datos y a partir de este valor, se toman de manera arbitraria diferentes valores con el fin de generar varias corridas del algoritmo de k medias, utilizando la fórmula de la distancia euclídea [4] $d = \sqrt{\frac{(x_i - x_0)^2}{(y_i - y_0)^2}}$.

Se calcula la sumatoria total de la distancia absoluta de cada dato, con el centro del conglomerado al que ha sido asignado; el valor del indicador de las diferencias entre los valores de las variables y los centros se calcula de acuerdo con la ecuación [5] $I = \sum_{i=1}^n |x_i - k|$. Con este indicador numérico, se genera un gráfico para encontrar por el método de Elbow (Pham et al., 2005; Sprengel & Busch, 2011), el punto óptimo para el número de centros. En este método propuesto en esta tesis, se calcula la variación (pendiente) entre estos indicadores numéricos con la expresión [6] $m_i = \frac{(y_i - y_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})}$ y luego el cambio porcentual entre las pendientes (razón de cambio de las mismas), la fórmula propuesta es [7] $\Delta_{\%} \cong \frac{(m_{i-1} - m_i)}{m_i}$. Todos estos cálculos tienen como finalidad ayudar en la toma de decisiones acerca del número de clúster de clientes.

5.1.3 Pronóstico de Demanda

Los modelos convencionales de pronósticos, tales como: series de tiempo y regresiones lineales hacen fuertes suposiciones con respecto a la forma y comportamiento anterior y/o posterior de los mismos datos. En el caso de los datos provenientes de sistemas de logística y distribución, muchas veces no pueden darse por ciertos los supuestos. Dadas estas dificultades, surgen métodos de inteligencia artificial que replican operaciones del cerebro humano y el sistema nervioso, de manera numérica (Hanke & Reitsh, 1996).

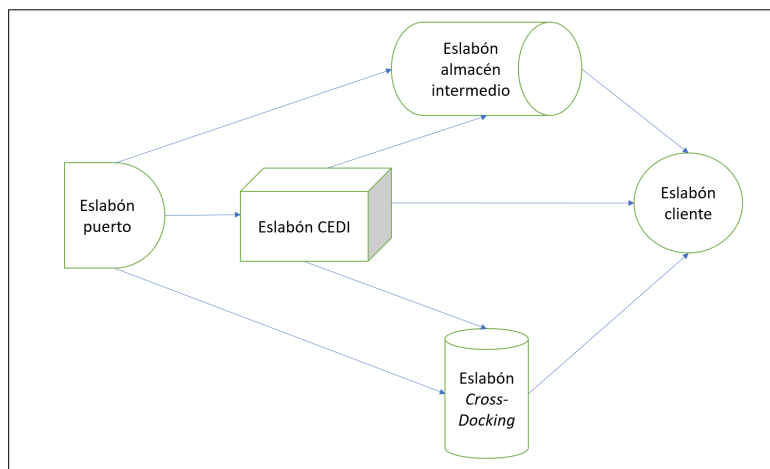
Algunos problemas que se presentan con los métodos tradicionales es la dificultad para pronosticar el comportamiento fuera del rango de datos originales (Ren et al., 2020), pues la desviación media del error tiende a crecer fuera de control, sin embargo, las redes neuronales artificiales se comportan de muy buena manera extrapolando predicciones (Olson & Mossman, 2003; Saxena et al., 2019; Villada et al., 2012).

Para esta tesis se propone realizar los pronósticos con redes neuronales, utilizando las mismas variables del clúster de clientes, con el fin de calcular la demanda agregada anual para el horizonte de planeación de 5 años.

5.1.4 Modelo Estratégico-Táctico

En esta fase se utilizarán las salidas de los modelos anteriores, además del cálculo de otros parámetros para proponer un modelo en un horizonte de planeación inferior a un año. En esta etapa, se decide cuáles instalaciones logísticas abrir, cuánto enviar por período a cada cliente, las cantidades en déficit, el cumplimiento de la promesa de servicio a través de la medición del costo total como medida de desempeño global del proceso de distribución. Los flujos factibles se presentan en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Flujos de la Red



Fuente. Elaboración propia

5.1.4.1 Supuestos del Modelo

1. Se combinan las fases estratégica y táctica debido a que el horizonte de tiempo es a 1 año y se toman decisiones con respecto a la apertura de centros de distribución, envíos y cantidades en almacén.

2. Los puertos pueden hacer envíos directos a los eslabones *Cross-Docking*, a los Centros de Distribución y a los Almacenes Intermedios. No hay envíos directos desde el puerto a los clientes finales j

3. Desde el eslabón de los *Cross-Docking* hay únicamente envíos directos al cliente final.

4. Desde el eslabón CEDI hay envíos directos al eslabón de *Cross-Docking*, almacenes intermedios y clientes finales j .

5. Los *Cross-Docking* y los CEDI tienen la misma capacidad, su diferencia es el tiempo de procesamiento de órdenes y el tiempo de permanencia en almacén, el cual debe ser de menos de 24 horas para el CD-h.

6. Desde el almacén m sólo existen flujos solamente al eslabón cliente j .

7. El costo total por minimizar será el costo de la localización, más el costo de transporte, más el costo de inventario, más el costo de manejo de materiales, más el costo de penalización por órdenes no entregados completos al cliente final y , finalmente, más el valor de la promesa de servicio (lead time ofrecido al cliente).

8. Existe una flota de vehículos con capacidad asignada para cada una de las instalaciones.

9. No existe inventario ni inicial ni final en el *Cross-Docking*.

10. Los nodos de clientes son clúster donde se la demanda es agregada.

11. El costo de manejo de materiales se compone del costo de operación por unidad de tiempo por tipo de instalación en el período p .

12. Existen restricciones presupuestales con respecto al número de terminales *Cross-Docking* y CEDIS's debido al alto costo de la inversión inicial.

5.1.4.2 Índices

$I = \{1, \dots |I|\}$ Conjunto de puertos marítimos de importación de productos

$H = \{1, \dots |H|\}$ Conjunto de centros *Cross – Docking*

$K = \{1, \dots |K|\}$ Conjunto de Centros de Distribución CEDI

$L = \{1, \dots |L|\}$ Conjunto de almacenes intermedios

$J = \{1, \dots |J|\}$ Conjunto de clúster de clientes

$P = \{1, \dots |P|\}$ Conjunto de períodos de tiempo

$M = \{1, \dots |M|\}$ Conjunto de tipo de vehículos

$T = \{\text{índice de tiempo}\}$

5.1.4.3 Conjuntos

Conjunto de nodos $N = \{I \cup H \cup K \cup L \cup J\}$

Conjunto de arcos $A = \{N \times N\}$

Conjunto de arcos factibles $AF = \{(I, H) \cup (I, K) \cup (I, M) \cup (H, J) \cup (K, H) \cup (K, M) \cup (K, J) \cup (M, J)\}$

Conjuntos de instalaciones $INS = \{I \cup H \cup K \cup L\}$

Conjunto de instalaciones a abrir $IA = \{H \cup K \cup L\}$

Conjunto de instalaciones con almacenamiento $NA = \{K \cup L\}$

Conjunto de instalaciones con operaciones $IO = \{H \cup K \cup L\}$

Conjunto de nodos que conectan al cliente $NC = \{(H, J) \cup (K, J) \cup (L, J)\}$

5.1.4.4 Parámetros

• **Demanda en cada clúster j .** La demanda se mide en unidades agregadas de producto, también está agrupada en clúster de clientes identificados con el índice j para cada período de tiempo t .

$dem_{\{j,p\}} =$ Demanda agregada del clúster j en el período $p \forall j \in J \wedge t$
 $\in P$ [unidades agregadas de producto]

• **Capacidad de la instalación.** Aplica para los nodos: puerto, *Cross-Docking*, Centro de Distribución y Almacén intermedio. Consiste en la capacidad máxima de envío o almacenamiento de la instalación.

$kap_{\{INS,p\}} =$ Capacidad de cada $\{INS\} \forall i \in I \wedge h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L$ en el período p
 $\in P$ [unidades agregadas de producto]

• **Costo fijo de apertura de cada instalación.** Aplica para los nodos: *Cross-Docking*, Centro de Distribución y Almacén. Se excluye el nodo puerto, puesto que la capacidad es fija. Consiste en los costos que implica la apertura de una instalación logística con las características de cada una.

$cf_{\{IA,p\}} =$ Costo fijo de apertura de cada $\{IA\} \forall h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L$
 en el período $p \in P$ [\$]

• **Costo fijo del flete desde cada arco factible.** Consiste en el costo fijo de cada flete, de acuerdo con los arcos factibles, depende del tipo de vehículo y del período de tiempo

$$c_{ff_{\{od,p\}}}^m = \text{Costo fijo flete desde el origen } o \text{ hasta el destino } d \forall (o, d) \\ \in AF, \text{ en el período } p \in P, \text{ con el vehículo tipo } m \in M \text{ [$/viaje]}$$

• **Distancia entre nodos.** Consiste en la distancia entre cada origen y destino en los arcos factibles.

$$dist_{\{o,d\}} = \text{distancias desde el origen } o \text{ hasta el destino } d \forall (o, d) \in AF \text{ [Km]}$$

• **Costo unitario de transporte por Km recorrido.** Consiste en el costo unitario de envío por kilómetro recorrido entre cada origen y destino en los arcos factibles, su naturaleza es variable y depende del número de viajes y de la distancia recorrida, además de cada período de tiempo.

$$c_{ut_{\{od,p\}}}^m \\ = \text{Costo unitario de envío por km recorrido desde el origen } o \text{ al destino } d \forall (o, d) \\ \in AF, \text{ en el período } p \in P \text{ con el vehículo } m \in M \left[\frac{\$}{\text{Km/unidad}} \right]$$

• **Capacidad del vehículo.** Consiste en la capacidad de cada tipo de vehículo utilizado en cada uno de los arcos factibles y está expresado en unidades agregadas.

$$kv^m = \text{capacidad vehículo tipo } m \in M \text{ [unidades agregadas]}$$

• **Costo de inventario.** Consiste en el costo unitario de tenencia de inventario en las instalaciones que conservan inventario -CEDI y Almacén intermedio-, expresado por período y por unidad agregada.

$$c_{i_{\{NA,p\}}} = \text{Costo unitario de inventario en } NA \forall k \in K \wedge l \in L \text{ en el período } p \\ \in P \left[\frac{\$}{\text{período/unidad}} \right]$$

• **Costo de operación en instalaciones.** Consiste en el costo unitario del manejo de productos en cada una de las instalaciones, las cuales dependen de las operaciones unitarias de cada una: descargue, ordenamiento en estantería (si aplica), *picking*, *packing* y cargue. Es de naturaleza variable y depende del número de unidades totales manejadas en cada almacén, por período de tiempo.

$$co_{\{IO,p\}} = \text{Costo de operación unitario en IO} \forall h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L \text{ en el período } p$$

$$\in P \quad \left[\frac{\$}{\text{período/unidad}} \right]$$

• **Tiempo de operación en instalaciones.** Consiste en el tiempo de operación unitario de manejo de productos en cada una de las instalaciones, el cual corresponde a un estándar por unidad. Depende de las operaciones unitarias realizadas en cada bodega.

$$to_{\{IO\}} = \text{T tiempo de operación unitario en IO} \forall h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L \quad \left[\frac{\text{T tiempo}}{\text{unidad}} \right]$$

• **Tiempo máximo de almacenamiento.** Consiste en el tiempo máximo que deben permanecer los productos en almacenamiento en el CEDI o el almacén intermedio.

$$\tau_{max} = \text{tiempo máximo de almacenamiento en CEDI o almacén intermedio [semanas]}$$

• **Costo de penalización por unidades faltantes.** Consiste en el costo por cada unidad que no se entregue al cliente j en el tiempo t

$$cp_{\{j,p\}} = \text{Costo de penalización por unidad no entregada al clúster } j \text{ en el período } t \forall j$$

$$\in J \wedge p \in P \quad \left[\frac{\$}{\text{unidad}} \right]$$

• **Valor monetario del tiempo de entrega.** Consiste en un estimado monetario por unidad de tiempo, utilizando cada tipo de vehículo. Se entiende como un costo asociado al lucro cesante de tener la mercancía en tránsito. Es variable y depende del tiempo de espera durante la entrega.

$$vmlt_p^m = \text{Valor monetario por unidad de tiempo de viaje en } t \text{ para el vehiculo } m \forall p$$

$$\in P \wedge m \in M \quad \left[\frac{\$}{\text{tiempo}} \right]$$

• **Promesa de servicio del tiempo de entrega.** Consiste en el tiempo de entrega ofrecido al cliente, depende de la región donde se ubique el clúster de clientes.

$$ps_j = \text{promesa de servicio (unidades de tiempo) ofrecida al cliente } j \forall j \in J \quad [\text{tiempo}]$$

Nivel de servicio al cliente

• **Consiste en el porcentaje de cumplimiento de órdenes ofrecido al cliente.** Se expresa como el cociente entre el número de unidades servidas de manera correcta y el número de unidades pedidas. Se expresa como un porcentaje.

$$ns_j = \text{Nivel de servicio del cliente } j \quad \forall j \in J = \left\{ \frac{\# \text{ unidades servidas efectivamente}}{\# \text{ unidades pedidas}} \right\} [\%]$$

• **Constante de conversión de tiempo.** Consiste en una constante para convertir a tiempo, teniendo en cuenta el tipo de vehículo y la distancia recorrida.

$$kct^m = \text{Constante para convertir a tiempo por tipo de vehículo } m \quad \forall m \in M \quad \left[\frac{\text{Tiempo}}{\text{Km}} \right]$$

• **Número de instalaciones.** Consiste en una constante de número de instalaciones a abrirse por horizonte de planeación, se aplica sobre el número de instalaciones *Cross-Docking* o CEDI's.

$$ni_{\{IA\}} = \text{número de instalaciones permitidas en el horizonte de planeación } \forall IA \\ \in IA \cap \{H \cup K\} \quad [\text{Número}]$$

5.1.4.5 Variables

• **Variable binaria de apertura de instalaciones.** Variable que toma el valor de 1 si se abre determinado tipo de instalación, de lo contrario vale 0

$$Y_{\{IA,p\}} = \text{Variable binaria de apertura de } IA \quad \forall h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L \text{ en el período } p \in P$$

• **Variable positiva de cantidades enviadas entre arcos posibles.** Variable de tipo racional positiva que indica la cantidad de producto en unidades agregadas enviadas entre el origen y destino de cada uno de los nodos de los arcos factibles.

$$X_{\{od,p\}}^m$$

= variable positiva que indica la cantidad enviada de origen o hasta el destino d |(o, d) $\in AP$ en el período $p \in P$ en el vehículo $m \in M$

• **Variable positiva de cantidades en inventario.** Variable de tipo racional positiva que indica la cantidad de producto en almacenamiento al final de cada período t en cada instalación donde se permita inventario.

$$I_{\{NA,p\}} = \text{variable positiva que indica la cantidad de inventario en } \{NA\} \quad \forall k \in K \wedge l \\ \in L \quad p \in P$$

• **Variable positiva de cantidades en déficit.** Variable de tipo racional positiva que indica la cantidad de unidades no entregadas al cliente j en cada período t

$$B_{\{j,p\}} = \text{Unidades en déficit no entregadas al cliente } j \in J \text{ en el período } p \in P$$

5.1.4.6 Función Objetivo

La función general para optimizar es Costo total de la operación logística de diseño de la red operación en los tres estadios de planeación es [8] $\mathbf{Min Z} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3 + \mathbf{F}_4 + \mathbf{F}_5 + \mathbf{F}_6 + \mathbf{F}_7$; donde \mathbf{F}_1 es el costo de localizar las instalaciones, ya sean plataformas Cross-Docking, Centros de Distribución o Almacenes intermedios (Mogale et al., 2017, 2020)

$$F_1 = \sum_{IA=\{H \cup K \cup L\}} \sum_{p \in P} cf_{\{IA,p\}} Y_{\{IA,p\}} \quad [9]$$

F_2 es el costo fijo de transporte, el cual se compone de una parte de costo fija multiplicada por el número de envíos requeridos.

$$F_2 = \sum_{m \in M} \left(\frac{1}{kv^m} \right) \sum_{od \in \{AF\}} \sum_{p \in P} cf_{\{od,p\}}^m X_{\{od,p\}}^m \quad [10]$$

F_3 es el costo variable de transporte, el cual se compone de la distancia desde el origen hasta el destino por una constante de costo unitario por Kilómetro por tipo de vehículo m por el número de unidades transportadas entre el origen y el destino en el tiempo t .

$$F_3 = \sum_{od \in \{AF\}} dist_{\{o,d\}} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} cut_{\{od,p\}}^m X_{\{od,p\}}^m \quad [11]$$

F_4 es el costo de inventario, el cual se calcula con base en el inventario final del período por el costo por unidad de inventario por unidad de tiempo. Las plataformas *Cross-Docking* no conservan inventario.

$$F_4 = \sum_{NA=\{K \cup L\}} \sum_{p \in P} ci_{\{NA,p\}} I_{\{NA,p\}} \quad [12]$$

F_5 es el costo de manejo de materiales, el cual se calcula por instalación por período de tiempo. Tiene tres elementos de cálculo: el costo de operación por unidad de producto, en cada instalación tipo h, k o l , por período t ; el tiempo de operación por unidad por tipo de instalación (h,k,l) por la

sumatoria de todas las unidades manejadas en esa instalación, ya sea las que llegan y las que salen de la misma.

$$F_5 = \sum_{IO=\{HUKUL\}} t_{O\{IO\}} \sum_{p \in P} c_{O\{IO,p\}} \sum_{od \in \{AF\}} \sum_{m \in M} X_{\{od,p\}}^m \quad [13]$$

F_6 es el costo de las unidades faltantes en los clústeres j , estas generan un costo de penalización por pérdida de mala voluntad del cliente, cláusulas de incumplimiento y sobrecostos por reprogramación de envíos. Existe un costo unitario de penalización por cada unidad no entregada en un nodo j .

$$F_6 = \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} c_{p\{j,p\}} B_{\{j,p\}} \quad [14]$$

F_7 es el valor monetario de la promesa de servicio [Lead time] (Sadjady & Davoudpour, 2012). Se calcula con base en el último tramo recorrido para llegar al cliente.

$$F_7 = \sum_{(o,d) \in \{AF \cap NC\}} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \frac{kct^m}{kv^m} vmlt_p^m dist_{\{od\}} X_{\{od,p\}}^m \quad [15]$$

5.1.4.7 Restricciones

Las ecuaciones [16] y [17] representan las restricciones de capacidad de cada instalación: para los puertos, su capacidad de envío y para los CD, CEDIS y almacenes, su capacidad de almacenamiento, que se activa si se da apertura a la localización. Como puede observarse, acá hay una combinación de variables positivas y variables binarias (Chopra & Meindl, 2013; Narasimham et al., 1996).

$$\sum_{od \in \{AF\}} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} X_{\{od,p\}}^m \leq S_{ip}, \forall i \in I \forall (o, d) \in AF \cap \{(I, H) \cup (I, K) \cup (I, M)\} \wedge \forall p \in P \quad [16]$$

$$\sum_{od \in \{AF\}} \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} X_{\{od,p\}}^m \leq cf_{\{IA,p\}} Y_{\{IA,p\}}, \forall h \in H | (o, d) \in AF \cap (H, J) \vee \forall k \in K | (o, d) \in AF \cap \{(K, H) \cup (K, M) \cup (K, J)\} \vee \forall l \in L | (o, d) \in AF \cap (M, J) \wedge \forall p \in P \quad [17]$$

El bloque de expresiones [18] a [20] corresponden a restricciones de balance de flujo con respecto a las cantidades enviadas desde CD, CEDIS y almacenes intermedios. Las cantidades de salida no pueden ser mayores que las que están disponibles para envío (Govindan et al., 2014).

$$\sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} X_{\{i,h,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} X_{\{h,k,p\}}^m - \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} X_{\{h,j,p\}}^m = 0 \quad \forall h \in H \quad [18]$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} I_{\{k,p-1\}} + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} X_{\{i,k,p\}}^m \\ - \left[\sum_{m \in M} \sum_{p < t < tmax} \sum_{h \in H} X_{\{k,h,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{p < t < tmax} \sum_{l \in L} X_{\{k,l,p\}}^m \right. \\ \left. + \sum_{m \in M} \sum_{p < t < tmax} \sum_{j \in J} X_{\{k,j,p\}}^m \right] = \sum_{p \in P} I_{\{k,p\}} \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad [19]$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} I_{\{l,p-1\}} + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} X_{\{i,l,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} X_{\{k,l,p\}}^m - \sum_{m \in M} \sum_{p < t < tmax} \sum_{j \in J} X_{\{l,j,p\}}^m \\ = \sum_{p \in P} I_{\{l,p\}} \quad \forall l \in L \end{aligned} \quad [20]$$

La restricción de ajuste de demanda:

$$\sum_{m \in M} \sum_{h \in H} X_{\{h,j,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} X_{\{k,j,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} X_{\{l,j,p\}}^m + B_{\{j,p\}} = D_{\{j,p\}} \quad \forall j \in J \wedge \forall p \in P \quad [21]$$

Restricción de las cantidades en déficit: sólo se contempla escasez en el cliente final

$$B_{\{j,p\}} \leq (1 - ns_j) \left[\sum_{m \in M} \sum_{h \in H} X_{\{h,j,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} X_{\{k,j,p\}}^m + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} X_{\{l,j,p\}}^m \right] \quad \forall j \in J \wedge \forall p \in P \quad [22]$$

Restricción por exceso de tiempo sobre la promesa de servicio (Lead Time)

$$\begin{aligned}
 & \sum_{\{h,k,l \in IO\}} t_{O_{IO}} \sum_{m \in M} \frac{1}{k\nu^m} \left[\sum_{h \in H} X_{\{h,j,p\}}^m + \sum_{k \in K} X_{\{k,j,p < t < tmax\}}^m + \sum_{l \in L} X_{\{l,j,p < t < tmax\}}^m \right] \\
 & + \sum_{od \in \{AF \cap NC\}} dist_{od \in \{AF \cap NC\}} \sum_{m \in M} \frac{kct^m}{k\nu^m} \left[\sum_{h \in H} X_{\{h,j,p\}}^m \right. \\
 & \left. + \sum_{k \in K} X_{\{k,j,p < t < tmax\}}^m + \sum_{l \in L} X_{\{l,j,p < t < tmax\}}^m \right] \leq ps_j \quad \forall j \in J \wedge \forall p \in P
 \end{aligned} \tag{23}$$

Restricción presupuestal: el número de plataformas *Cross-Docking* y CEDI's no debe exceder cierto número de instalaciones durante el horizonte de planeación debido al alto costo de acondicionamiento de los mismos. Los almacenes intermedios no tienen esta restricción.

$$\sum_{IA \in IA \cap \{HUK\}} \sum_{p \in P} Y_{\{IA,p\}} \leq ni_{\{IA\}} \tag{24}$$

Restricción para que, una vez abierta una instalación, ésta no sea cerrada:

$$\sum_{p \in P} \sum_{IA = \{HUKUL\}} Y_{\{IA,p\}} \leq \sum_{p=1 < P-1} \sum_{IA = \{HUKUL\}} Y_{\{IA,p+1\}} \tag{25}$$

Las restricciones del [26] al [29] son con respecto a la naturaleza de las variables:

$$B_{\{j,p\}} \geq 0 \tag{26}$$

$$I_{\{NA,p\}} \geq 0 \tag{27}$$

$$X_{\{od,p\}}^m \geq 0 \tag{28}$$

$$Y_{\{IA,p\}} \in \{Bin\} \tag{29}$$

5.2 Fase Operativa: Rutas, Programación y Asignación En Cada Clúster

El modelo propuesto en la sección anterior permite tomar decisiones que se enmarcan en lo estratégico y táctico. Sin embargo, con el fin de cumplir con las premisas iniciales de este trabajo, la última fase, que consiste en decisiones diarias, se corresponde con la programación y asignación de rutas en cada clúster.

Con el fin de simplificar el tiempo computacional y solventar la naturaleza *np-hard* de los problemas de tipo TSP y VRP, se propone un algoritmo del árbol de mínima extensión con una

modificación en la evaluación sobre función objetivo del mismo, con el fin de conectar la mayor cantidad de nodos, bajo restricciones de tiempo máximo de recorrido y máxima carga del vehículo.

El desarrollo de las ciencias de la computación ha generado un amplio espectro de aplicaciones para la solución de diferentes variantes del “*Minimum Spanning Tree*” o árbol de mínima extensión, muchos reportados en la literatura con diferentes aplicaciones (Gigli et al., 2020; Labbé et al., 2021; Paul et al., 2019; Pop, 2020).

5.2.1 Modelo Propuesto para Programación y Asignación Rutas

Sea $V = \{v = 0, 1, 2, \dots, V\}$ un conjunto de nodos donde 0 es el *Cross-Docking*, CEDI o Almacén intermedios. El conjunto A denota los arcos factibles que unen los nodos $A = \{(v_i, v_j)\}$. Se nota como t_{ij}^m al tiempo de recorrido entre i y j y X_{ij}^m cada uno de los arcos que unen a i y j con el vehículo m , además q_{ij}^m es la cantidad de producto a entregar por cada vehículo m .

$$\text{Función objetivo 1: } \min Z = \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} t_{(i,j)}^m X_{(i,j)}^m \quad \forall (i,j) \in A \quad [30]$$

$$\text{Función objetivo 2: } \max Z = \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} q_{(i,j)}^m X_{(i,j)}^m \quad \forall (i,j) \in A \quad [31]$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in V} X_{i,j}^m = 1 \quad \forall j \in V \setminus 0 \quad [32]$$

$$\sum_{j \in V} X_{i,j}^m = 1 \quad \forall i \in V \setminus 0 \quad [33]$$

$$\sum_{i \in V} X_{io}^m = M \quad [34]$$

$$\sum_{j \in V} X_{oj}^m = M \quad [35]$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} X_{i,j}^m \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad [36]$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij}^m X_{ij}^m \leq T_{max} \quad [37]$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} q_{ij}^m X_{ij}^m \leq Q_{max} \quad [38]$$

$$X_{i,j}^m \in \{0,1\} \forall i, j \in V \wedge m \in M \quad [39]$$

La ecuación [30] minimiza el tiempo en ruta, mientras que la ecuación [31] maximiza la cantidad de carga a entregar. Las ecuaciones [32] y [33] plantean que hay solamente un arco entrante y otro saliente en cada nodo, el cual está asociado a un cliente en un vehículo m . Las ecuaciones [34] y [35] aseguran que el número de vehículos que abandona un depósito es igual al número de entra a cada nodo. La restricción [36] asegura que los arcos deben estar conectados y que la demanda de cada cliente no puede superar la capacidad del vehículo. La ecuación [37] asegura que el tiempo en ruta debe ser inferior a un Tiempo máximo de operación del vehículo. La ecuación [38] asegura que la cantidad a entregar en la ruta debe ser menor a la capacidad del vehículo. La ecuación [39] se refiere a la naturaleza binaria de la variable X .

5.2.2 Algoritmo Propuesto para Rutas y Asignación de Vehículos

Para resolver este problema que es *np-hard*, deben relajarse algunos supuestos del *vehicle routing problem* y para esta propuesta se generan los siguientes:

1. La ruta generada consiste en un árbol extenso, que incluye a todos los nodos de la red sin lazos.
2. Cada vehículo tiene una capacidad máxima, la cual debe respetarse en la ruta generada y no puede ser mayor a un $Q_{m\acute{a}x}$.
3. Cada vehículo tiene un tiempo de operación, el cual debe respetarse en la ruta generada y no puede ser mayor a un $T_{m\acute{a}x}$.
4. La función objetivo consiste en minimizar el tiempo de recorrido en la ruta.
5. Siempre se inicia con el nodo identificado como punto de partida, sea una plataforma *Cross-Docking*, un CEDI o un almacén intermedio.
6. Las demandas en cada nodo son conocidas con antelación y deterministas.

Procedimiento de cálculo:

1. Se inicia con un conjunto de nodos conectados y un conjunto de nodos no conectados $C = \{x|x \text{ es un nodo conectado}\}$ y $\bar{C} = \{x|x \text{ es un nodo no conectado}\}$

2. Marcar el depósito origen como nodo 0

3. Iniciar conectando siempre el nodo 0

4. Evaluar cual es el siguiente nodo que conecte con el menor tiempo de recorrido t_{ij}

5. Conectar el nodo anterior al nodo 0

6. Calcular la función F1= tiempo acumulado $F1 = \sum_{ti=0}^t t_{ij}$

7. Calcular la función F2= carga acumulada $F2 = \sum_{qi=0}^q q_{ij}$

8. Si ambas funciones cumplen con el criterio de $\left\{ \begin{matrix} \sum_{ti=0}^t t_{ij} \leq T_{m\acute{a}x} \\ \sum_{qi=0}^q q_{ij} \leq Q_{m\acute{a}x} \end{matrix} \right\}$ entonces, continúe

evaluando el siguiente t_{ij} de menor valor

9. Continúe con los pasos v. a viii.

10. Criterio de parada cualquiera de las dos que suceda primero: $\left\{ \begin{matrix} \sum_{ti=0}^t t_{ij} \geq T_{m\acute{a}x} \\ \sum_{qi=0}^q q_{ij} \geq Q_{m\acute{a}x} \end{matrix} \right\}$

11. Si es así, termine de iterar e inicie desde i. con los nodos desconectados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6. RESULTADOS

Con el fin de validar la aplicabilidad en la realidad de los sistemas logísticos, de los modelos teóricos propuestos en el Capítulo 5, se utilizan datos extraídos del ERP de una importante multinacional 4PL con operaciones de distribución en toda Colombia. Por razones de confidencialidad de la información, es necesario brindar la mayor reserva sobre los datos, los cuales, para garantizar esta condición, se mantendrán en el mayor anonimato posible.

6.1 Objeto Fáctico

Como se mencionó, se tomaron datos de un sistema real que actualmente atiende la distribución a nivel nacional de artículos tecnológicos relacionados con la telefonía celular, entre los cuales hay productos con un valor unitario muy elevado como lo son celulares de todas las gamas y precios, pero también productos con un costo unitario bajo como puede ser un chip de *sim-card*, imitaciones para exhibición, cableado, aparatos de transmisión, entre otros.

El esquema actual de distribución, aunque cumple con tiempo de entrega, resulta costoso para el operador logístico, lo que compromete de manera importante el margen de utilidades. El reto consiste en proponer un nuevo diseño de red que continúe con el cumplimiento de su promesa de servicio, pero eficiente en costo, para lo cual se evalúa la posibilidad de utilizar diferentes instalaciones de almacenamiento en varios sitios del país, a fin de aprovechar los aliados logísticos del operador.

Actualmente, el esquema de distribución es el siguiente: la mercancía llega a cualquiera de los dos puertos principales (Barranquilla, Buenaventura), de allí es transportada a la capital del país, es almacenada y posteriormente, a medida que se colocan los pedidos, se contrata con terceros el transporte desde el centro de distribución hasta el cliente final. Con todo lo anterior, este es un proceso complejo y costoso puesto que los pedidos se realizan a lo largo y ancho del país, llegando si es necesario, a los 1122 municipios que lo componen. Para el análisis se tomará como año base 2020, durante el cual se tuvo demanda en 175 municipios colombianos. La propuesta de esta tesis evalúa la conveniencia o no de utilizar diferentes tipos de instalaciones con diferentes capacidades y tiempos de procesamiento de órdenes. Es así como entran a considerarse plataformas de intercambio *Cross-Docking*, centros de distribución y almacenes tradicionales de menor tamaño o intermedios, configurando una solución a la medida que ofrezca mejoras en las economías de escala.

Atendiendo a la metodología y al modelo desarrollados en esta investigación, se procede en las siguientes secciones a reportar de manera detallada las fases, formulaciones y algoritmos propuestos.

6.2 Fase Estratégica

De acuerdo con lo propuesto en el diseño metodológico, se obtuvo una base de datos de 30 variables con 351.782 observaciones, lo que representan 10'553.460 registros. Para esta fase estratégica se utilizaron los programas estadísticos: IBM SPSS ® y R que es un software libre. Para el manejo de datos y elaboración de tablas, se utilizó: Microsoft Excel ®, además por la facilidad de descargar ficheros *.csv de los dos paquetes estadísticos, los cuales son susceptibles de convertirse en archivos con extensión *.xlsx (formato MS-Excel). Véase Apéndice 1: imagen de la base de datos original (2020).

6.2.1 Localizaciones Factibles

En el modelo propuesto en esta tesis en la sección 5.1.1. se detalla cómo realizar un Análisis Jerárquico de Procesos con el fin de tomar decisiones desde un punto de vista estratégico, dada las condiciones de diferente orden en el país. A continuación, se desarrolla el modelo de localizaciones factibles a ser consideradas como potenciales sedes de instalaciones logísticas.

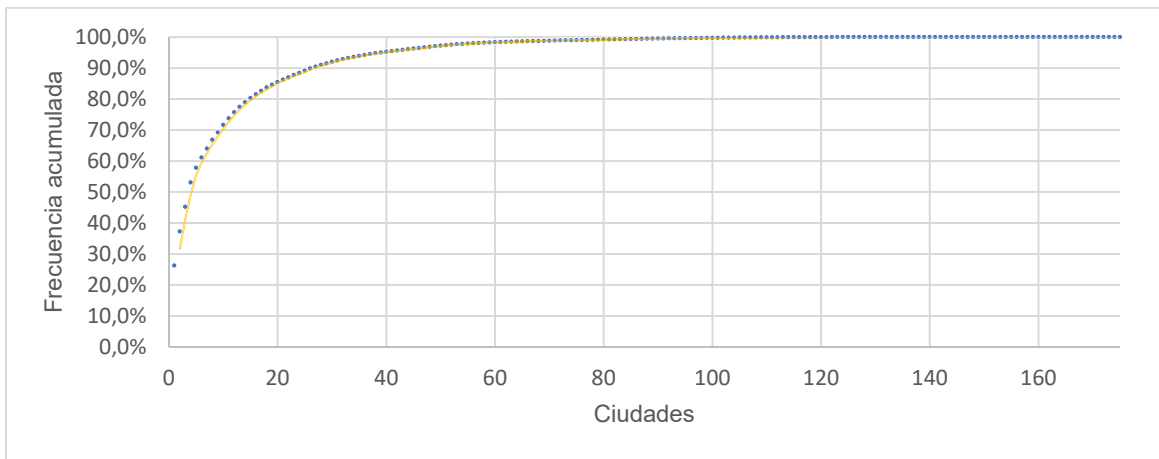
$$\begin{aligned}
 i &= \text{índice de orígenes de mercancía (puertos)} = \{Barranquilla, Buenaventura\} \\
 j &= \text{índice de ciudades destino (clientes)} = \{Abejorral, Acacías, \dots, Yumbo, Zipaquirá\} \\
 r &= \text{índice de criterios a considera} \\
 &= \left\{ \begin{array}{l} \text{Distancia desde Barranquilla, Distancia desde Buenaventura, Número de zonas} \\ \text{francas cercanas,} \\ \text{Producto Interno Bruto regional, Porcentaje PIB que corresponde a impuesto en} \\ \text{la región,} \\ \text{Número de habitantes en la ciudad de entrega} \end{array} \right\}
 \end{aligned}$$

Los puertos son ubicaciones inmodificables dado que la mercancía toda es importada y llega por estos dos lugares únicamente. El conjunto de ciudades de entrega, para el año base sobre el cual se tomaron los datos (2020), tiene una cardinalidad de 175 destinos que corresponden al 16% del universo de municipios en Colombia. Los criterios de decisión se establecieron de acuerdo con lo sugerido por la literatura consultada para esta tesis y corresponde con datos suministrados por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) y el Ministerio de Comercio Industria y Turismo

de Colombia (MINCIT). Es pertinente precisar que la información en Colombia tiene hasta 2 años de atraso en las bases de datos oficiales, en lo que se refiere a estudios sectoriales y no se encuentran todas las series históricas de muchos indicadores por Municipios, lo cual es una barrera para los investigadores.

Es necesario verificar la representatividad de estas ciudades entre los datos totales, por esta razón antes de correr el AHP, se realiza la técnica de PARETO reportada en el Apéndice 2, con el fin de encontrar el 20% de ciudades que representan el 80% de las entregas. La Figura 6.1 presenta el diagrama de Pareto correspondiente.

Figura 6.1. Diagrama de Pareto para Entregas



Fuente. Elaboración propia

Esta clasificación, basada en el valor de la mercancía entregada arroja el conjunto de ciudades a evaluar como posibles sitios de instalaciones logísticas. Este conjunto notado por extensión es el siguiente:

$$J = \left\{ \begin{array}{l} \text{Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Santa Marta, Montería,} \\ \text{Cúcuta, Sincelejo, Ibagué, Valledupar, Villavicencia y Pereira} \end{array} \right\}$$

La Tabla 6.1 presenta los datos recogidos para los criterios de análisis de la técnica aplicada.

Tabla 6.1. Datos de los Criterios de Análisis

| Ciudades | Distancia a Buenaventura | Distancia a Barranquilla | No. De Zonas Francas | PIB regional | % impuestos | No. habitantes |
|---------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------|-------------|----------------|
| BOGOTA | 507 | 1010 | 6 | 244,224 | 10,8 | 7,2 |
| MEDELLIN | 464 | 705 | 2 | 139,302 | 9,2 | 2,4 |
| CALI | 116 | 1261 | 3 | 92,563 | 10,2 | 1,8 |
| BARRANQUILLA | 1306 | 0 | 3 | 41,765 | 10,5 | 1,1 |
| CARTAGENA | 1091 | 119 | 5 | 34,089 | 11,2 | 0,9 |
| BUCARAMANGA | 808 | 593 | 1 | 57,916 | 16,4 | 0,5 |
| SANTA MARTA | 1260 | 104 | 3 | 13,42 | 5,4 | 0,5 |
| MONTERIA | 865 | 353 | 0 | 17,059 | 6,7 | 0,4 |
| CUCUTA | 998 | 684 | 1 | 15,351 | 6 | 0,6 |
| SINCELEJO | 931 | 237 | 0 | 8,228 | 5,8 | 0,3 |
| IBAGUE | 312 | 1010 | 0 | 20,726 | 7,5 | 0,5 |
| VALLEDUPAR | 1162 | 301 | 0 | 20,089 | 3,4 | 0,5 |
| VILLAVICENCIO | 596 | 1126 | 0 | 36,82 | 3,8 | 0,5 |
| BELLO | 473 | 694 | 2 | 139,302 | 9,2 | 0,5 |
| PEREIRA | 254 | 1055 | 4 | 15,517 | 9,4 | 0,4 |

Fuente. Elaboracion a partir de DANE (2021a, 2021b); PROEXPORT (2018)

La primera columna corresponde a las ciudades a evaluar como sitios logísticos potenciales. La segunda columna la distancia en kilómetros de estas ciudades al puerto de Buenaventura. La tercera, la distancia en kilómetros de estas ciudades al puerto de Barranquilla. La cuarta columna corresponde al número de zonas francas cercanas a estas ciudades, lo anterior dada la importancia de las zonas francas en Colombia como sitios que poseen una infraestructura y condiciones de incentivos a las empresas que movilizan y almacenan carga en estos lugares. La quinta columna corresponde al producto interno bruto 2019 reportado en estas ciudades por el DANE. La sexta columna es el porcentaje de cada ciudad aporta al PIB, esto como un indicador de la cantidad de impuestos que se pagan anualmente. Finalmente, la séptima columna es el número de habitantes expresado en millones.

El Apéndice 3 presenta el desarrollo del análisis AHP. Para el vector de prioridades, se utilizó el software libre *AHP-0S Decision Hierarchy*, recuperable del sitio web de su autor en el enlace <https://bpmsg.com/ahp/ahp-hierarchy.php> (Goepel, 2018) el cual consiste en el siguiente vector:

$$VP_r = [\rho_{r1} = 0,374 \quad \rho_{r2} = 0,315 \quad \rho_{r3} = 0,18 \quad \rho_{r4} = 0,06 \quad \rho_{r5} = 0,041 \quad \rho_{r6} = 0,03].$$

Una vez se cuenta con el vector de prioridades (véase la Tabla 6.2), se realiza el cálculo de las probabilidades para la matriz normalizada, de acuerdo con lo propuesto en la sección 5.1.1. de esta tesis. Los resultados finales se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Vector de Criterios Priorizados

| Criterios | Distancia Buenaventura | Distancia Barranquilla | No. Zonas Francas | PIB | % Impuestos | No. Habitantes |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------|--------------------|-----------------------|
| Prioridades | 0,374 | 0,315 | 0,18 | 0,06 | 0,041 | 0,03 |

Fuente. Elaboración propia

En cuanto a las localizaciones deseables (ciudades priorizadas), estas se sometieron a juicio de expertos con el fin de determinar en cuáles ciudades era posible establecer plataformas *Cross-Docking*, de acuerdo con las posibilidades presupuestales del operador 4PL, centros de distribución o almacenes intermedios. El índice de consistencia fue de 3,5%, calculado por el software. Es importante anotar que algunas ciudades de las priorizadas no cuentan con la suficiente flota de transporte de carga con las capacidades suficientes para operar bodegas de gran tamaño. La columna 3 de la Tabla 6.3 presenta el tipo de instalación recomendada.

Tabla 6.3. Priorización de Alternativas

| Ciudad | Total | Tipo de Instalación Recomendada |
|---------------|--------------|--|
| BOGOTA | 12% | <i>Cross-Docking</i> |
| CARTAGENA | 8% | CEDI |
| CALI | 8% | <i>Cross-Docking</i> |
| PEREIRA | 7% | Almacén Intermedio |
| BARRANQUILLA | 7% | <i>Cross-Docking</i> |
| MEDELLIN | 7% | <i>Cross-Docking</i> |
| SANTA MARTA | 7% | CEDI |
| CUCUTA | 7% | CEDI |
| BELLO | 6% | CEDI |
| BUCARAMANGA | 6% | CEDI |
| VILLAVICENCIO | 6% | Almacén Intermedio |
| VALLEDUPAR | 5% | Almacén Intermedio |
| IBAGUE | 5% | Almacén Intermedio |
| MONTERIA | 5% | Almacén Intermedio |
| SINCELEJO | 4% | Almacén Intermedio |

Fuente. Elaboración propia

6.2.2 Configuración de Clúster de Clientes

En este nivel del proceso, el primer paso fue depurar la base de datos, eliminando los registros con inconsistencias. De acuerdo con lo propuesto, se inicia con una base de datos de 30 variables con 351.782 observaciones, lo que representan 10'553.460 registros. Una vez se tuvieron los datos clasificados, según criterios como la participación de la demanda y el origen de la mercancía y los clientes, representados en 8 variables de análisis, se procedió a realizar todo el análisis descriptivo de las variables, el cual es reportado en el Apéndice 4.

Lo anterior condujo a tener disponibles 1'135.384 registros para agrupar, con número de clústeres adecuado y la pertenencia de cada elemento a los clústeres. Con base en el método y el algoritmo, propuestos en esta tesis, en la sección 5.1.2; una vez se tuvo el conjunto de datos preparado, se corrió el modelo de las *k-medias* (Universidad de Granada, 2018), usando el software libre R (González-La Rotta et al., 2018).

Con lo anterior, se realizó un conglomerado de clientes, en los que no solo se considerara la cercanía geográfica, sino también, valores con similitudes entre: la región del país a entregar, las cantidades recibidas por los clientes, las principales ciudades de entrega, los días en tránsito de la mercancía, mes y el medio de transporte utilizado.

Se calcularon diferentes corridas de *k-medias*, variando el valor del número de centros y generando un procedimiento novedoso. El primer número de *k-medias*, se obtuvo con la raíz cuadrada del total de datos y a partir de este valor, se tomaron de manera arbitraria diferentes valores con el fin de generar diferentes corridas del algoritmo de *k-medias*, utilizando la fórmula de la distancia euclídea (véase fórmula [4]); en el Apéndice 5 se pueden observar la gráfica de pertenencia para cada uno de los clústeres. Luego se calculó la sumatoria total de la distancia absoluta de cada dato con el centro del conglomerado al que ha sido asignado. Con este indicador numérico, se generó un gráfico para encontrar, a partir del método de *Elbow* (Pham et al., 2005; Sprengel & Busch, 2011), el punto óptimo para el número de centros.

La Tabla 6.4 resume el número de centros, el valor del indicador de las diferencias entre los valores de las variables y los centros, de acuerdo con la ecuación [5] $I = \sum_{i=1}^n |x_i - k|$. La tercera columna calcula la pendiente entre las parejas de valores de las columnas 1 y 2. Dicha pendiente

se calculó con la expresión [6] $m_i = \frac{(y_i - y_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})}$. Una vez obtenida la pendiente, se calculó el cambio porcentual entre cada una de las pendientes, utilizando la expresión [7] $\Delta\% \cong \frac{(m_{i-1} - m_i)}{m_i}$.

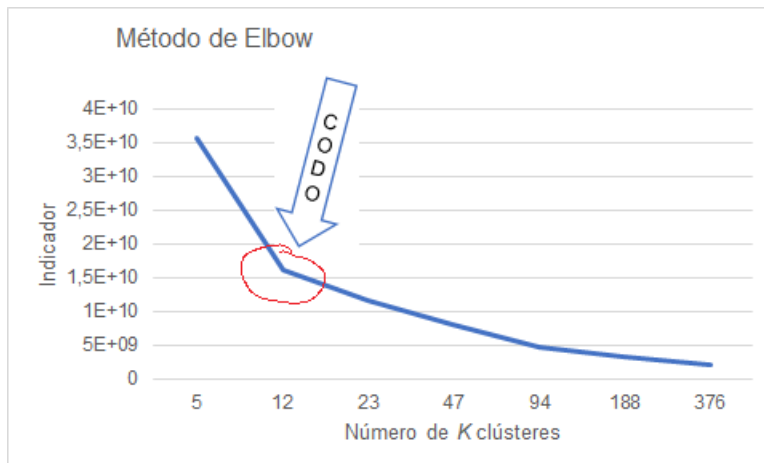
Tabla 6.4. Número de K-medias

| No. K-medias | Indicador [5] | Pendiente [6] | Cambio porcentual [7] |
|--------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 5 | 35810311935 | -2795556196 | 6% |
| 12 | 16241418564 | -418933774 | 2% |
| 23 | 11633147050 | -153231575 | 1% |
| 47 | 7955589245 | -70618564 | 4% |
| 94 | 4636516725 | -15149585 | 2% |
| 188 | 3212455720 | -5772852 | 2% |
| 376 | 2127159603 | 5657339 | NA |

Fuente. Elaboración propia, utilizando SPSS®

Todos estos cálculos tienen como finalidad ayudar en la toma de decisiones acerca del número de clúster de clientes (Oudouar & Fellahi, 2017). En primer lugar, en la Figura 6.2, se puede observar el indicador de distancia vs cada uno de los números de centros y se busca aquel valor que la gráfica represente un codo, en este caso en el valor $k=12$.

Figura 6.2. Indicador de Distancia



Fuente. Elaboración propia, utilizando R ®

Con el fin de aportar más elementos de juicio para esta decisión, se precisa tener en cuenta el cambio porcentual de la pendiente, calculado en la ecuación 7, y con ello, se puede observar que

el cambio entre $k=5$ y $k=12$ es de 4% [6%-2%], frente al 1% [2%-1%] que ocurre entre $k=12$ y $k=23$, que gráficamente parecería que también presenta un “codo”. Este aporte es novedoso y no ha sido considerado en algún estudio que da cuenta la literatura consultada, como ya se refirió en la sección 5.1.2. Una vez se eligió el número de clúster de clientes $k=12$, se procedió a identificar su ubicación geográfica, utilizando la herramienta *Google Maps*®. Véase la conformación de los doce clústeres en el Apéndice 6.

6.2.3 Cálculo de Centroides

Es importante calcular los centroides de los clústeres, para posteriormente parametrizar la información del modelo de programación lineal entera. Para encontrar estos centroides se utilizó la fórmula de la distancia euclídea, optimizando (minimizando) con el complemento *Solver de Excel*® dicha distancia desde cada ubicación hasta el centro. Véase Apéndice 7 para la elaboración de los centroides de los doce clústeres.

6.2.4 Pronóstico de Demanda

Para calcular los pronósticos y de acuerdo con lo propuesto en la metodología, se hizo una red neuronal de multicapa, en el software IBM SPSS® donde las variables de entrada fueron: canal de distribución, familia de productos (grupo), días de tránsito, origen de la mercancía, código del cliente, código del artículo, costo de la mercancía. La Tabla 6.5 presenta el resumen de procesamiento de casos, donde se especifican los porcentajes de los datos dejados a entrenamiento de la red, las pruebas y la reserva. Con todo esto, se realizó la primera ejecución del modelo. La tabla 14 muestra la importancia de las variables independiente de la predicción de la variable cantidades pedidas, que es la que se pronostica.

Tabla 6.5. Resumen de Procesamiento de Casos

| Aspecto | | N | Porcentaje |
|----------|---------------|--------|------------|
| Muestra | Entrenamiento | 211085 | 60,0% |
| | Pruebas | 105504 | 30,0% |
| | Reserva | 35197 | 10,0% |
| Válido | | 351786 | 100,0% |
| Excluido | | 1 | |
| Total | | 351787 | |

Fuente. Elaboración propia

Tabla 6.6. Importancia de las Variables Independientes

| Variables | Importancia | Importancia normalizada |
|-----------------------|-------------|-------------------------|
| Canal de distribución | ,141 | 36,4% |
| Familia de producto | ,125 | 32,3% |
| Días en tránsito | ,075 | 19,3% |
| Origen | ,115 | 29,8% |
| Código cliente | ,017 | 4,5% |
| Código artículo | ,140 | 36,2% |
| Costo mercancía | ,387 | 100,0% |

Fuente. Elaboración propia

Debido a que el error global de la red arrojó un valor muy alto (0.5), se decidió eliminar las variables código cliente y días en tránsito, que aportan poco valor de importancia normalizada. Se realizó entonces, una segunda ejecución del algoritmo, pero el error relativo continuó por el orden de 0.4, por tanto, se decidió eliminar la variable canal de distribución debido a que, en esta segunda ejecución, la importancia es del 12% y se consideró baja. Se realizó una tercera ejecución de la red neuronal y el error relativo baja a 0.17 el cual es tolerable y a pesar del presupuesto, que es posible que influya de manera importante en la acumulación de los inventarios “aguas arriba”, es el valor menor obtenido dada la variabilidad de los datos de ingreso. La Tabla 6.7 define los parámetros del modelo final, con el cual se generan los pronósticos de la demanda agregada anual del operador logístico.

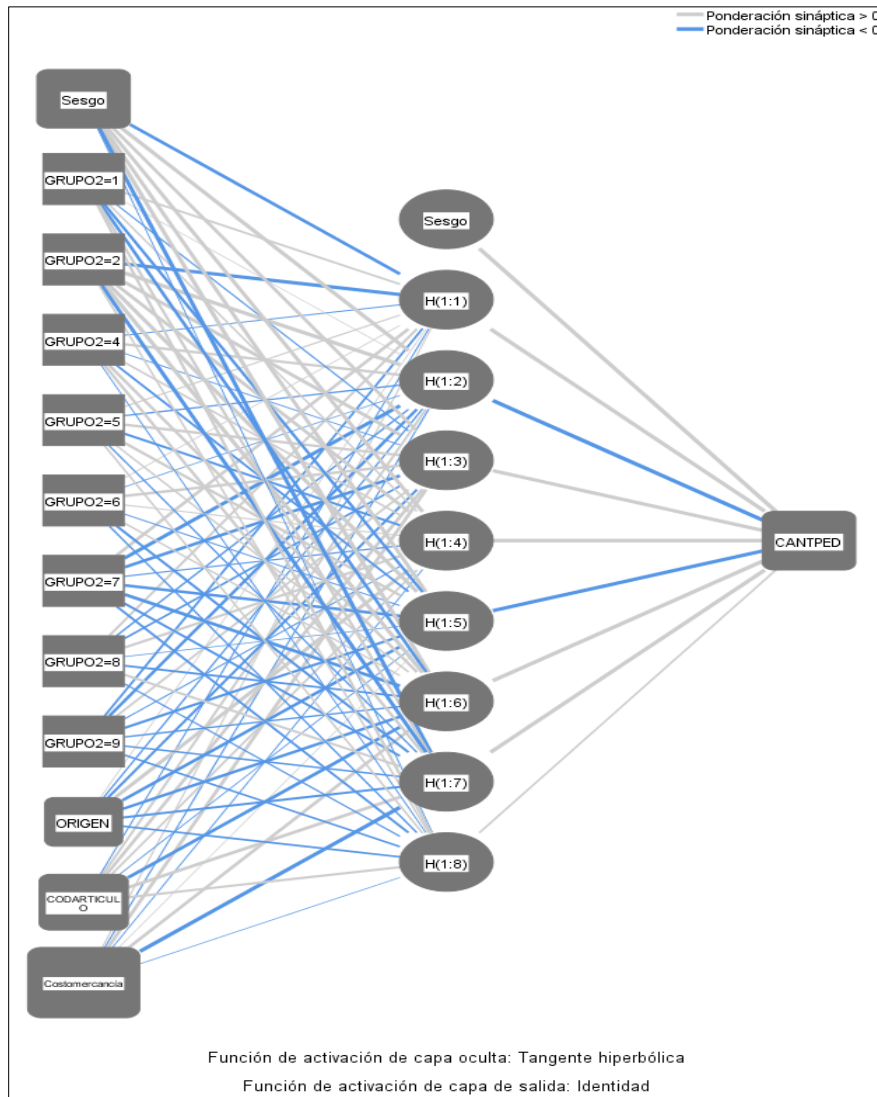
Tabla 6.7. Resumen del Modelo

| | | |
|--|----------------------------|---|
| Entrenamiento | Error de suma de cuadrados | 25484,628 |
| | Error relativo | 0,241 |
| | Regla de parada utilizada | Se ha superado el número máximo de épocas (100) |
| | Tiempo de entrenamiento | 0:00:26,70 |
| Pruebas | Error de suma de cuadrados | 6882,002 |
| | Error relativo | 0,177 |
| Reserva | Error relativo | 0,177 |
| Variable dependiente: Cantidades Pedidas | | |

Fuente. Elaboración propia

La Figura 6.3 muestra el modelo de la red neuronal propuesta para los pronósticos de demanda del primer año. Los resultados de los pronósticos se presentan en el Apéndice 8.

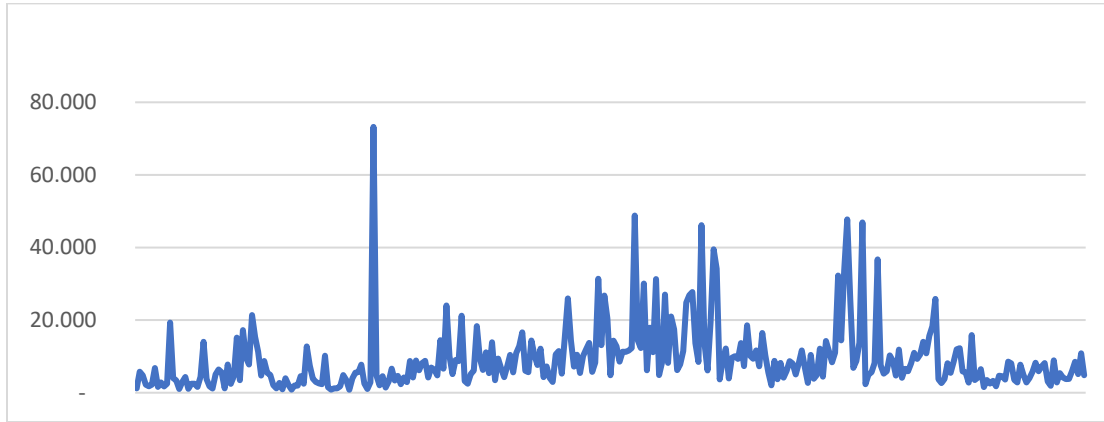
Figura 6.3. Diagrama de la Red Neural de Pronóstico Demanda



Fuente. Elaboración propia

Para finalizar el análisis estratégico, se consultó la base de datos del DANE con respecto al comercio internacional, específicamente el nivel de importaciones, analizando la serie histórica entre 1995 y 2021 mensual, con el fin de determinar el crecimiento porcentual esperado de las importaciones de otros bienes. En este caso se estimó un crecimiento del 46%. La Figura 6.4 presenta la gráfica de dicha serie, con un comportamiento muy variable en el tiempo.

Figura 6.4. Colombia Importaciones Totales Según Grupos de Productos OMC a Partir de la Agregación CUCI Rev.3



Fuente. Elaboración a partir de DANE (2021c)

De acuerdo con lo anterior, la Tabla 6.8 presenta los estimados de demanda de acuerdo con el crecimiento pronosticado, en el Apéndice 9 se puede observar estos cálculos por clúster.

Tabla 6.8. Pronóstico de demanda agregada en COP

| | | <i>Año 0</i> | <i>Año 1</i> | <i>Año 2</i> | <i>Año 3</i> | <i>Año 4</i> | <i>Año 5</i> |
|------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <i>J</i> ₁ | Dosquebradas | 4,35E+10 | 4,48E+10 | 4,61E+10 | 4,75E+10 | 4,89E+10 | 5,04E+10 |
| <i>J</i> ₂ | Cota | 2,43E+11 | 2,50E+11 | 2,58E+11 | 2,65E+11 | 2,73E+11 | 2,81E+11 |
| <i>J</i> ₃ | Sn Andrés Islas | 1,79E+09 | 1,85E+09 | 1,90E+09 | 1,96E+09 | 2,02E+09 | 2,08E+09 |
| <i>J</i> ₄ | Abrego | 2,11E+10 | 2,17E+10 | 2,24E+10 | 2,30E+10 | 2,37E+10 | 2,44E+10 |
| <i>J</i> ₅ | San Juan (Guajira) | 2,31E+10 | 2,37E+10 | 2,45E+10 | 2,52E+10 | 2,60E+10 | 2,67E+10 |
| <i>J</i> ₆ | Santo Tomás | 1,35E+11 | 1,39E+11 | 1,43E+11 | 1,47E+11 | 1,51E+11 | 1,56E+11 |
| <i>J</i> ₇ | Túquerres | 1,15E+10 | 1,19E+10 | 1,22E+10 | 1,26E+10 | 1,30E+10 | 1,33E+10 |
| <i>J</i> ₈ | San Gil | 4,53E+10 | 4,66E+10 | 4,80E+10 | 4,95E+10 | 5,09E+10 | 5,25E+10 |
| <i>J</i> ₉ | Valle Aburrá | 1,18E+11 | 1,21E+11 | 1,25E+11 | 1,29E+11 | 1,32E+11 | 1,36E+11 |
| <i>J</i> ₁₀ | Sahagún | 5,16E+10 | 5,31E+10 | 5,47E+10 | 5,64E+10 | 5,81E+10 | 5,98E+10 |
| <i>J</i> ₁₁ | Puerto Tejada | 8,15E+10 | 8,39E+10 | 8,65E+10 | 8,91E+10 | 9,17E+10 | 9,45E+10 |
| <i>J</i> ₁₂ | Arauca | 1,28E+07 | 1,31E+07 | 1,35E+07 | 1,39E+07 | 1,44E+07 | 1,48E+07 |
| | Total | 7,74E+11 | 7,98E+11 | 8,21E+11 | 8,46E+11 | 8,71E+11 | 8,98E+11 |

Fuente. Elaboración propia

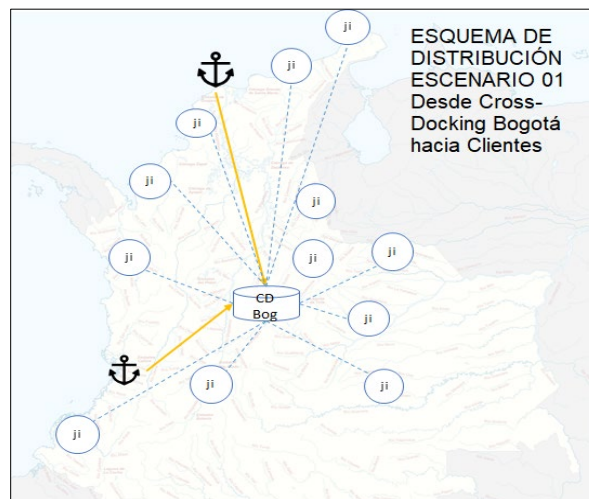
Con esto culminó la fase estratégica propiamente dicha y se dió paso a la fase estratégica-táctica, en la que se utilizó esta información de entrada y otros parámetros con el fin de proponer el modelo de localización de instalaciones.

6.3 Fase Estratégica-Táctica

Colombia es un país que, debido a su atraso regional en infraestructura vial, aún tiene muchos retos para lograr la conectividad entre los centros de producción y los centros de consumo (Díaz, 2019; Legiscomex, 2019), por ello, al avanzar en el diseño de una red de distribución, se debe tomar en cuenta la mayor cantidad de variables de la realidad, con el fin de tomar decisiones que permitan solventar este aspecto coyuntural.

Como se dijo en la sección 5.2. el modelo de programación entera mixta propuesto tiene un amplio espectro de decisión, puesto que permite encontrar medidas de desempeño en el estadio a largo y mediano plazo. Para validar el modelo teórico y su aplicabilidad práctica, se tomaron los valores de la fase anterior: localizaciones deseables, clúster de clientes y pronósticos de demanda, como son insumos de entrada para la formulación sugerida. También fue necesario parametrizar la información de costos y tiempos para el ingreso al modelo (Véase Apéndice 10: parámetros de entrada). La programación de este se realizó en GAMS® (Véase Apéndice 11 código GAMS® de modelo de programación lineal entera mixta). En una primera ejecución del modelo, se ingresaron los datos actuales: es decir, en el escenario en el que desde los dos puertos Barranquilla y Buenaventura, se envía a Bogotá y desde allí a todos los puntos del país. La Figura 29 presenta un esquema de dicha distribución actual.

Figura 6.5. Esquema de Dicha Distribución Actual



Fuente. Elaboración propia

Al realizar el modelo 1, situación actual, (véase Apéndice 12, con los resultados detallados obtenidos de la ejecución de este), la Tabla 6.9 muestra las medidas de desempeño propuestas.

Tabla 6.9. Medidas de Desempeño Situación Actual

| Aspecto para observar | Modelo Actual |
|-----------------------------|---------------------|
| Costo de la distribución | \$ 8.755.909.845,69 |
| Utilización de la capacidad | 86% |
| Número de instalaciones | 1 |
| Déficit (acumulado) | 71,4 |
| Tiempo de entrega (días) | 7,949 |

Fuente. Elaboración propia

El costo de la distribución se refiere a la función a optimizar, en ella se consideraron los costos de transporte, instalaciones, déficit e inventario. La utilización de la capacidad se refiere al nivel de ocupación de las instalaciones, que para este caso la operación se restringe a 1 almacén tipo *Cross-Docking* con base en Bogotá. Como ya se ha dicho, no se maneja inventario, sin embargo, se presenta déficit en algunos puntos de entrega, como se pudo detallar en el Apéndice anterior y se maneja un nivel de servicio de 92%, con un tiempo de entrega promedio de 7,949 días. Es pertinente aclarar que se está abordando un horizonte de planeación a largo plazo de 5 años y en la medida de desempeño de tiempo de entrega un período de días, lo cual da cuenta de la versatilidad del modelo.

Posteriormente se ejecutó el modelo con todas las posibilidades de la apertura de las diferentes instalaciones tipo *Cross-Docking*, CEDI's y Almacenes intermedios. Los resultados pueden visualizarse gráficamente en la Figura 6.6 que presenta la red de distribución propuesta.

Figura 6.6. Red de Distribución Propuesta por el Modelo



Fuente. Elaboración propia

Los resultados arrojaron lo que se resume en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Resultados Obtenidos Propuesta

| Aspecto para observar | Modelo Propuesto |
|-----------------------------|---------------------|
| Costo de la distribución | \$ 6.847.629.320,43 |
| Utilización de la capacidad | 99,5% |
| Número de instalaciones | 4 |
| Déficit (acumulado) | 71,4 |
| Tiempo de entrega (días) | 7,015 |

Fuente. Elaboración propia

Como puede observarse, existe una disminución de un 22% del costo de la distribución (reducción de \$ 1.908.280.525,26) entre el modelo actual y el propuesto. Se propone abrir 4 ubicaciones: 1 *Cross-Docking* en Bogotá, 1 *Cross-Docking* en Medellín, 1 almacén intermedio en Pereira y 1 almacén intermedio en Villavicencio, con los que se atendería la demanda del país. De acuerdo a los resultados del modelo propuesto, no se haría apertura de ningún CEDI y a pesar de la necesidad de abrir más instalaciones, el costo se reduce. En ambos modelos el nivel de déficit se mantiene igual, se cumple con la demanda, pero en el segundo modelo, el tiempo de entrega se reduce en un 12% en promedio. El nivel de servicio se mantiene en ambos casos en un 92%.

La red resultante como ya se mencionó es bastante compacta, puesto que abre solamente cuatro instalaciones: dos instalaciones *Cross-Docking* y dos almacenes intermedios y de estas se abastece todos doce los clústeres del país. En la Tabla 6.11 se presenta el envío de mercancía de los dos puertos a las instalaciones mencionadas.

Tabla 6.11. Envío de Mercancías desde los Puertos Hasta Almacenes

| | $h_2 = \text{C-D Bogotá}$ | $h_4 = \text{C-D Medellín}$ | $l_3 = \text{Pereira}$ | $l_6 = \text{Villavicencio}$ |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| $i_1 = \text{Barranquilla}$ | \$144,291 XE10 | \$17,333 XE10 | \$0 | \$0 |
| $i_2 = \text{Buenaventura}$ | \$148,166 XE10 | \$82,281 XE10 | \$16,602 XE10 | \$20,753 XE10 |

Fuente. Elaboración propia

En cuanto a los mercados atendidos desde almacenes a centroides de clientes, se tiene el panorama mostrado en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Envío de Mercancías desde Almacenes Hasta Destinos (Cantidades en COP E+10)

| | j_1 | j_2 | j_3 | j_4 | j_5 | j_6 | j_7 | j_8 | j_9 | j_{10} | j_{11} | j_{12} |
|------------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| $h_2 = C-D$ Bogotá | 3,61 | 137,78 | 1,04 | | 9,65 | 72,51 | 6,47 | 28,7 | | 21,9 | 10,653 | 0,006 |
| $h_4 = C-D$ Medellín | 6,82 | | | 10,73 | 4,42 | | | | 59,9 | 7,03 | 10,7 | |
| $l_3 = Pereira$ | 14,04 | | | | | | | | | | 2,57 | |
| $l_6 = Villavicencio$ | | | | | | | | | | | 20,7 | |
| TOTALES (X E⁺¹⁰) | 24,46 | 137,78 | 1,04 | 10,73 | 14,07 | 72,51 | 6,47 | 28,71 | 59,92 | 29,02 | 44,67 | 0,006 |

Fuente. Elaboración propia

En esta tabla se puede observar que se cumpliría con los requerimientos de demanda sugeridos por el modelo, no obstante, es pertinente mencionar que el modelo cumple con todas las restricciones de tiempos de entrega, capacidades de las instalaciones y niveles de servicio, además de las cantidades de escasez permitidas en cada clúster de cliente.

6.4 Fase Operativa: Rutas, Programación y Asignación En Cada Clúster

En esta fase se aplicó el algoritmo de mínima expansión para cada uno de los 12 clúster. Se hace la salvedad que los clústeres 3 y 12, sólo constan de un punto de entrega y no es necesario realizarlos. Para resultados detallados, pueden consultarse en los Apéndices 13 a 22, donde se muestran los resultados de cada ruteo.

En esta etapa, se aplicó el algoritmo propuesto en la sección 5.3.2., para la solución de todos los modelos de ruteo. Para su solución se aplicó el código en R que se presenta en los Apéndices (13 a 22). La información de entrada fue la que se parametrizó en la sección de metodología. Para la asignación del número de vehículos según su capacidad y el cumplimiento de demanda por cada clúster, una vez encontrados los arcos conexos en R, se procedió a aplicar un modelo de programación lineal en *solver* de Excel® con el fin de simplificar la talla de los problemas y la velocidad de computación, como otro importante aporte de esta tesis. Se reportan los resultados resumidos a continuación en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13. Resultados Ruteo por Clústeres

| | COSTO FIJO AGREGADO PARA TODOS LOS PERÍODOS (PROMEDIO) | COSTO VARIABLE AGREGADO PROMEDIO POR CLÚSTER POR KM RECORRIDO | DEMANDA AGREGADA (\$COP) A ENTREGAR POR CLÚSTER (10 MILLONES) | COSTO ANUAL DEL RUTEO EN TODO EL CLÚSTER (DESPUÉS DE APLICADO EL MODELO) | CANTIDAD DE VEHÍCULOS TIPO 01 REQUERIDOS (OPTIMIZANDO Q1*) | CANTIDAD DE VEHÍCULOS TIPO 02 REQUERIDOS (OPTIMIZANDO Q2*) | CANTIDAD DE VEHÍCULOS TIPO 03 REQUERIDOS (OPTIMIZANDO Q3*) |
|----------------|--|---|---|--|--|--|--|
| CLÚSTER 01 | \$ 1.812.948 | \$ 600 | \$ 244.597.970 | \$ 3.938.277.287 | 679 | 1 | 1 |
| CLÚSTER 02 | \$ 3.631.987 | \$ 931 | \$ 1.377.794.569 | \$ 4.201.123.623 | 600 | 250 | 150 |
| CLÚSTER 03 | \$ 513.495 | \$ 458 | \$ 10.439.606 | \$ 55.439.799.762 | 10 | 46 | 0 |
| CLÚSTER 04 | \$ 2.003.778 | \$ 604 | \$ 107.324.188 | \$ 30.035.473.632 | 298 | 0 | 0 |
| CLÚSTER 05 | \$ 1.143.391 | \$ 715 | \$ 140.696.092 | \$ 2.148.447.007 | 382 | 15 | 10 |
| CLÚSTER 06 | \$ 1.914.027 | \$ 830 | \$ 725.126.455 | \$ 3.136.454.676 | 600 | 500 | 4824 |
| CLÚSTER 07 | \$ 1.477.520 | \$ 871 | \$ 64.749.317 | \$ 1.724.241.059 | 180 | 0 | 0 |
| CLÚSTER 08 | \$ 1.176.364 | \$ 687 | \$ 287.058.233 | \$ 2.712.490.626 | 500 | 714 | 0 |
| CLÚSTER 09 | \$ 1.624.454 | \$ 999 | \$ 599.223.738 | \$ 4.406.588.029 | 200 | 3515 | 0 |
| CLÚSTER 10 | \$ 1.372.043 | \$ 952 | \$ 290.184.257 | \$ 5.183.562.727 | 600 | 495 | 0 |
| CLÚSTER 11 | \$ 987.408 | \$ 846 | \$ 446.730.094 | \$ 4.569.259.205 | 500 | 1778 | 0 |
| CLÚSTER 12 | \$ 939.286 | \$ 732 | \$ 60.000 | \$ 45.552.678.662 | 0 | 0 | 1 |
| TOTALES | | | | \$ 163.048.396.295 | 4549 | 7313 | 4985 |

Fuente. Elaboración propia

6.5 Comparación Escenarios Actual Vs Propuesta

Si se establece una comparación de la situación actual con respecto a la propuesta, en cuanto a las tres medidas de desempeño propuestas, (costo de la operación logística, tiempo de entrega al cliente y nivel de servicio), se puede resumir dicha disparidad en la Tabla 6.14, en la que se puede observar las mediciones obtenidas.

Tabla 6.14. Resultados Comparación Escenarios Actual vs Propuesta

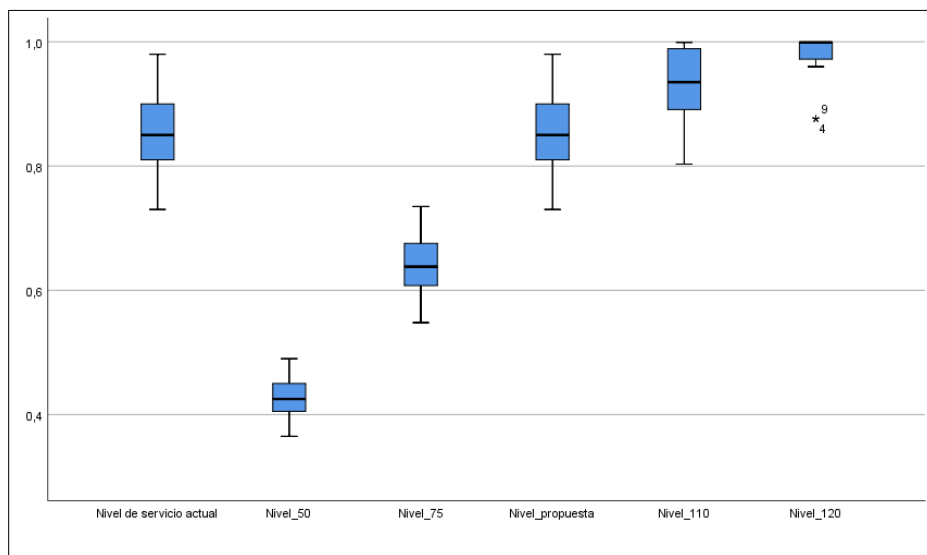
| | Actual | Propuesto | Resumen |
|---------------------------------|------------------|------------------|--|
| Costo de la operación logística | \$ 8.755.909.845 | \$ 6.847.629.320 | Disminuye en un 22% en el modelo propuesto |
| Tiempo de entrega al cliente | 7,949 | 7,015 | Disminuye en un 12% en el modelo propuesto |
| Nivel de servicio | 92% | 92% | Se mantiene igual |

Fuente. Elaboración propia

Una vez se estableció el diseño experimental para el análisis de salida, donde se combina el parámetro “nivel de servicio” para generar diferentes escenarios, y con el propósito contrastar estadísticamente los resultados obtenidos de acuerdo con el objetivo específico 5, se tomaron dichas respuestas de las diferentes ejecuciones del modelo formulado en GAMS® con respecto a cambios en los niveles de servicio en los 12 clústeres. Con éstos datos, se realizó un análisis descriptivo sencillo que puede observarse en el Apéndice 23.

La Figura 6.7 presenta el diagrama de caja y bigotes de los resultados de los experimentos, donde se muestran los resultados de las ejecuciones del modelo actual (escenario 0), de la simulación a un nivel de servicio al 50% del actual (escenario 1), a un 75% del nivel actual (escenario 2), al nivel de servicio obtenido en la propuesta (escenario 3), a un nivel del 110% (escenario 4) y finalmente a un 120% de nivel de servicio (escenario 5), con el fin de conocer la respuesta del costo y el tiempo de entrega, al realizar las experimentaciones del caso en GAMS®. Puede observarse que cuando el nivel de servicio está cercano al 100% (escenario 5) en cada uno de los 12 clústeres, empiezan a presentarse puntos fuera de control.

Figura 6.7. Diagrama de Cajas y Bigotes Análisis de Niveles de Servicio



Fuente. Elaboración propia

Una vez se realizaron los análisis descriptivos, se procedió a hacer pruebas de pareadas de medias, utilizando el estadístico T de *Student*, a través del Software SPSS, con el fin de contrastar si verdaderamente existen diferencias significativas entre estos niveles de servicio y de esta manera poder garantizar la consistencia de los resultados que se obtuvieran en las diferentes ejecuciones del modelo. La Tabla 6.15 presenta los resultados obtenidos. Se puede ampliar esta información en el Apéndice 23.

Tabla 6.15. Resultados Test de Comparación de Medias

| | | Prueba de muestras emparejadas | | | | | | | |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|--|----------|---------|----|------------------|
| | | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) |
| | | Media | Desv. Desviación | Desv. Error promedio | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | | Inferior | Superior | | | |
| Par 1 | Nivel de servicio actual - Nivel_50 | ,42542 | ,03769 | ,01088 | ,40147 | ,44936 | 39,104 | 11 | ,000 |
| Par 2 | Nivel de servicio actual - Nivel_75 | ,21242 | ,01893 | ,00547 | ,20039 | ,22445 | 38,866 | 11 | ,000 |
| Par 4 | Nivel de servicio actual - Nivel_110 | -,07542 | ,01974 | ,00570 | -,08796 | -,06288 | -13,237 | 11 | ,000 |
| Par 5 | Nivel de servicio actual - Nivel_120 | -,12317 | ,04538 | ,01310 | -,15200 | -,09433 | -9,401 | 11 | ,000 |
| Par 6 | Nivel_50 - Nivel_75 | -,21300 | ,01876 | ,00541 | -,22492 | -,20108 | -39,338 | 11 | ,000 |
| Par 7 | Nivel_50 - Nivel_propuesta | -,42542 | ,03769 | ,01088 | -,44936 | -,40147 | -39,104 | 11 | ,000 |
| Par 8 | Nivel_50 - Nivel_110 | -,50083 | ,03400 | ,00981 | -,52243 | -,47923 | -51,032 | 11 | ,000 |
| Par 9 | Nivel_50 - Nivel_120 | -,54858 | ,02690 | ,00776 | -,56567 | -,53149 | -70,657 | 11 | ,000 |
| Par 10 | Nivel_75 - Nivel_propuesta | -,21242 | ,01893 | ,00547 | -,22445 | -,20039 | -38,866 | 11 | ,000 |
| Par 11 | Nivel_75 - Nivel_110 | -,28783 | ,02040 | ,00589 | -,30080 | -,27487 | -48,866 | 11 | ,000 |
| Par 12 | Nivel_75 - Nivel_120 | -,33558 | ,03214 | ,00928 | -,35600 | -,31516 | -36,169 | 11 | ,000 |
| Par 13 | Nivel_propuesta - Nivel_110 | -,07542 | ,01974 | ,00570 | -,08796 | -,06288 | -13,237 | 11 | ,000 |
| Par 14 | Nivel_propuesta - Nivel_120 | -,12317 | ,04538 | ,01310 | -,15200 | -,09433 | -9,401 | 11 | ,000 |
| Par 15 | Nivel_110 - Nivel_120 | -,04775 | ,03292 | ,00950 | -,06866 | -,02684 | -5,025 | 11 | ,000 |

Fuente. Elaboración propia

Es importante anotar aquí, que en todas las parejas se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, es decir que en todos los casos se suponen diferencias entre los niveles de servicio. Los resultados de los algoritmos (medidas de desempeño) de costo total logístico y tiempo de respuesta también presentan diferencias, lo cual apoya desde la estadística, la hipótesis de que el nivel de servicio tiene un punto óptimo en el que afecta positivamente el costo de distribución y el tiempo de respuesta.

Una vez se culminó el paso anterior y con el fin de avanzar en el análisis de escenarios que sustentan la experimentación de las hipótesis, se realizaron diferentes ejecuciones del modelo variando el nivel de servicio, esto con el fin de comparar los niveles de servicio versus: costo total de la distribución, el tiempo de entrega, el nivel de inventario en bodegas, el número de instalaciones propuestas, el nivel máximo de déficit permitido, el nivel de servicio (Unidades déficit/demanda). Otra medida que también se calculó fue la relación Beneficio/Costo, obtenida a partir de las utilidades obtenidas vs precio de venta. La Tabla 6.16 presenta todas las salidas de las diferentes ejecuciones del modelo y las diferentes medidas de desempeño obtenidas.

Tabla 6.16. Salidas Diferentes Ejecuciones del Modelo con Diferentes Parámetros

| Nivel de servicio (para las fronteras de Pareto) | 50% | 75% | Propuesta | Actual | 10% mejora | 20% mejora |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| Costo total (en 10 Mill de COP) | \$ 539,89 | \$ 598,42 | \$ 684,76 | \$ 875,59 | \$ 741,24 | \$ 783,91 |
| Tiempo total entrega al cliente (en días) | 4,77 | 4,67 | 7,95 | 7,02 | 8,52 | 7,58 |
| Inventario (en 10 Mill de COP) | \$ 195,08 | \$ 0 | \$ 64,098 | \$ 0 | \$ 0 | \$ 53,67 |
| Precio de Venta (en 10 Mill de COP) | \$ 632,26 | \$ 728,10 | \$ 858,80 | \$ 858,80 | \$ 919,43 | \$ 972,978 |
| Instalaciones de almacenamiento propuestas | 8 | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 |
| Déficit (Máximo nivel escasez en 10 Mill de COP) | \$ 184,71 | \$ 136,79 | \$ 71,44 | \$ 71,44 | \$ 41,12 | \$ 14,35 |
| Nivel de servicio | 71% | 81% | 92% | 92% | 96% | 99% |
| Relación beneficio / costo | 1,17 | 1,22 | 1,25 | 0,98 | 1,24 | 1,24 |

Fuente. Elaboración propia

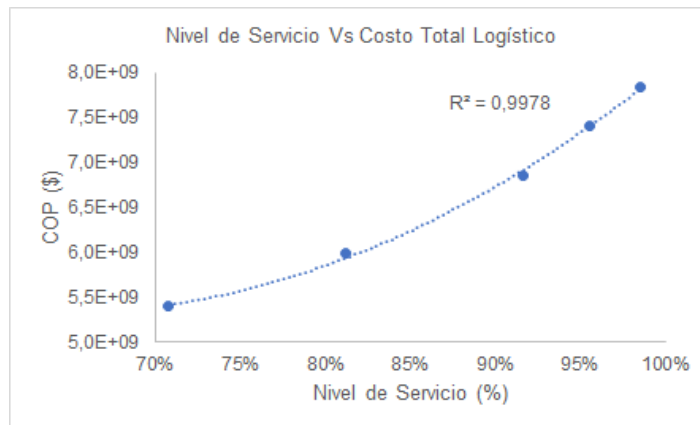
Gráficamente es más fácil evidenciar las relaciones entre los niveles de servicio y las medidas de desempeño a estudiar en esta tesis. En la Tabla 6.17 se resumen los resultados de los diferentes niveles de servicio vs el costo logístico. En la Figura 6.8 está la gráfica que representa lo resumido en la tabla. Puede observarse con una correlación relativamente alta (99%) que se estableció una relación polinómica de grado 2 entre estas dos variables, lo cual es consistente con la teoría de costos.

Tabla 6.17. Resultados Niveles de Servicio vs. Costo Logístico

| Nivel de servicio | Costo Total |
|-------------------|-------------|
| 71% | 5,4E+09 |
| 81% | 6,0E+09 |
| 92% | 6,8E+09 |
| 96% | 7,4E+09 |
| 99% | 7,8E+09 |

Fuente. Elaboración propia

Figura 6.8. Gráfica Nivel de Servicio vs Costo Total Logístico



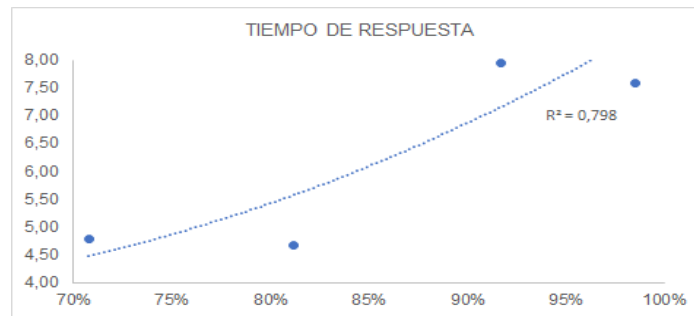
Fuente. Elaboración propia

Tabla 6.18. Resultados Nivel de Servicio vs Tiempo de Respuesta

| Nivel de Servicio | Tiempo de Respuesta |
|-------------------|---------------------|
| 71% | 4,77 |
| 81% | 4,67 |
| 92% | 7,95 |
| 96% | 8,52 |
| 99% | 7,58 |

Fuente. Elaboración propia

Figura 6.9. Nivel de Servicio vs Tiempo de Respuesta



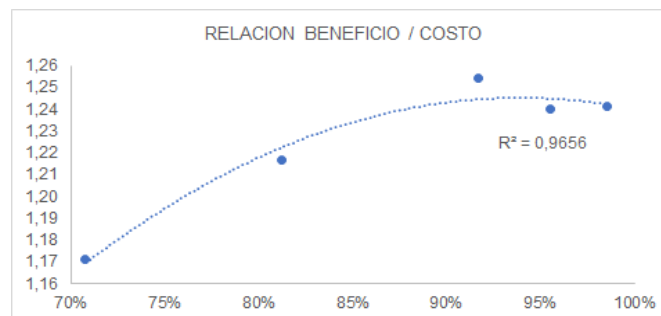
Fuente. Elaboración propia

Tabla 6.19. Resultados Nivel de Servicio vs Relación Beneficio/Costo

| Nivel de servicio | Relación Beneficio/Costo |
|-------------------|--------------------------|
| 71% | 1,17 |
| 81% | 1,22 |
| 92% | 1,25 |
| 96% | 1,24 |
| 99% | 1,24 |

Fuente. Elaboración propia

Figura 6.10. Gráfica Nivel de Servicio vs Relación Beneficio/Costo



Fuente. Elaboración propia

En cuanto al comportamiento del costo logístico vs el nivel de servicio, tiempo de respuesta y relación beneficio/costo, se pudo establecer que, en los tres casos se trata de polinomios de segundo grado, donde el punto de inflexión es el nivel de servicio para un 92%, que es el punto donde se debe mantener éste para equilibrar los costos y tener niveles de respuesta adecuados al cliente. Es importante anotar que a este nivel se tiene un inventario “0”.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta sección contiene el análisis y discusión de los resultados de la tesis doctoral. Se muestran las relaciones con la literatura, así como la coherencia entre los objetivos propuestos, las hipótesis formuladas y los hallazgos respectivos. con el fin de soportar las evidencias de este estudio en cuanto al diseño de las redes de distribución.

7.1 Localización de Instalaciones Logísticas

Para este apartado, es importante recordar que en la hipótesis general de la presente tesis se planteó la relación entre la formulación de un modelo que integre las etapas estratégica, táctica y operativa del diseño de redes de distribución y su incidencia en las medidas de desempeño de la red, entendidas como el costo logístico de la distribución, el cumplimiento de los niveles de servicio y el tiempo de respuesta al cliente.

Si se atiende al objetivo específico 1, es de notable interés observar que el estado del arte permitió una síntesis de literatura, en la que diferentes autores postulan distintos modelos que plantean variados escenarios propuestos desde los estratégico-táctico, en combinaciones de planeación de demanda y nuevos proveedores (Bortolini et al., 2019; Das, 2011; Das & Sengupta, 2009) y lo táctico-operativo, mediante modelos multi períodos para inventarios y entregas de mercancías (Keskin et al., 2010; Mogale et al., 2017; Stinson et al., 2020).

Los resultados de la investigación de esta tesis doctoral permiten plantear una metodología que logra integrar estos tres estadios simultáneamente, con el fin de diseñar la red de distribución y posibilitar su planeación, programación y operación. En concordancia con los resultados obtenidos, el modelo estratégico arroja que las posibles localizaciones para ubicar las instalaciones logísticas pueden ser: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Bucaramanga, Santa Marta, Montería, Cúcuta, Sincelejo, Ibagué, Valledupar, Villavicencio y Pereira y los criterios a evaluar en las mismas sería: Distancia a cada uno de los puertos, número de zonas francas cercanas, Producto Interno Bruto, Porcentaje del PIB destinado a impuestos en la región y número de habitantes en la ciudad de entrega. Aplicando un modelo de AHP y el criterio de expertos, se priorizaron las ciudades y se etiquetaron si fuera convenientes como *Cross-Docking*, Centro de Distribución o Almacén Intermedio.

Se afirma que, en el proceso de diseño de redes de distribución, el nivel estratégico alcanza decisiones mayores a un año y comprende decisiones tales como: la selección de proveedores, número y tamaño de instalaciones (Bertazzi et al., 2020; Escobar, 2012; Escobar et al., 2013); sin embargo, en esta tesis doctoral, se busca abordar un nivel estratégico enmarcado en la globalidad del contexto económico del país, involucrando variables como las que se enuncian y escogen para el modelo estratégico de localización; esto con el fin de que los modelos aborden aún más la volatilidad y la complejidad de los mercados de las economías emergentes como la colombiana. No hay que perder de vista que la aplicación práctica de esta tesis se realizó en un operador logístico de cuarta generación, quien tiene la posibilidad de rentar, alquilar o subarrendar espacios de almacenamiento, compartiendo recursos con competidores, generando ahorros que pueden redundar en mejores tarifas para sus clientes y a su vez, mejores precios para los consumidores finales de los productos, al reducir el margen de los costos logísticos inmersos en los mismos.

Al analizar los resultados obtenidos en este proceso estratégico, se observa que es completamente pertinente integrar este tipo de variables macroeconómicas a la planeación a largo plazo de las instalaciones; puesto que, a través de diferentes técnicas de análisis y modelamiento, se posibilita realizar proyecciones más ajustadas a la realidad de las redes de distribución, facilitando así la programación táctica y operativa.

7.2 Planeación de la Demanda

Una de las actividades determinante en cualquier cadena de suministros es planeación de la demanda; resulta estratégica, puesto que se convierte en factor primordial del diseño de la red de distribución, al ser una de las primeras actividades a realizarse en una cadena de suministros de enfoque empujar, como es este caso, donde a partir de un pronóstico de ésta, se busca que el cliente la absorba. En este caso, al tener dispersos tantos puntos de entrega, se hace necesario encontrar alguna técnica para concentrar esos clientes en clústeres donde la gestión de la demanda sea más simplificada. Es sí como el modelo sugiere, agruparlos geográficamente y mediante otro tipo de variables en clústeres (Baranowski et al., 2015; Bosona & Gebresenbet, 2011; Cao & Glover, 2010; Fu & Yin, 2012; González-La Rotta et al., 2018; Universidad de Granada, 2018; Joseph & Bryson, 1998; Juozapaitis & Palsaitis, 2017; Liao & Wang, 2019; Liu, 1999; Mesa-Arango & Ukkusuri, 2015; Oudouar & El Fellahi, 2017; Pham et al., 2005; Rivera et al., 2016; Shalini & Singh, 2018; Škerlić et al., 2016).

Mediante la técnica del “codo” se pudo optimizar el número de estos en $j=12$ y se disminuyó la dimensionalidad del modelo a formular en la siguiente etapa de este. Para cada clúster se calculó un centroide, como punto representativo de este. Posteriormente, se aplicó un pronóstico de demanda utilizando métodos de aprendizaje como son las redes neuronales (Villada et al., 2012), con el fin de establecer un estimado del crecimiento para los siguientes 5 años, con el fin de establecer los parámetros de entrada del modelo estratégico de diseño de redes de distribución, en lo concerniente a cantidades y comportamiento de la demanda (Ahmadi-Javid & Hoseinpour, 2015; Bertazzi et al., 2014; Boulaksil et al., 2019; Fazayeli et al., 2018; Ren et al., 2020; Zhang et al., 2019). De acuerdo con lo obtenido en los resultados y comparado con la literatura consultada, se encuentran ventajas en simplificar el número de puntos de entrega en estas metodologías de aglomeración (clúster) y utilizar métodos de pronóstico alternativos a las series de tiempo, particularmente en tipos de productos donde no es posible utilizarlas debido a las restricciones sobre el número de datos o a las características propiamente dichas de los datos.

Como ventajas principales de esta combinación de técnicas se pueden enunciar, además de la reducción de la talla de los conjuntos numéricos, la similitud de los grupos configurados; no solamente en lo que tiene que ver con la cercanía geográfica (Juozapaitis & Palsaitis, 2017), sino también en lo que atañe con características en cuanto a variables económicas y de mercado se refiere. El modelo agrupa por preferencias de: entrega, calidad, mezcla de productos, cantidades, entre otros. Lo anterior resulta beneficioso en un país como Colombia, diverso culturalmente y delimitado por regiones con gustos y preferencias que marcan la pauta en cuanto a ventas se refiere. La planeación de las redes distribución puede convertirse en una ventaja para los consumidores finales (Boulaksil et al., 2019) y esto puede lograrse a través de estas técnicas de agrupación y pronóstico.

Con respecto a las técnicas de pronóstico, en esta tesis, aunque no era uno de sus objetivos a demostrar; se logran hacer evidentes las ventajas de utilizar técnicas de pronóstico provenientes de la inteligencia artificial (Nie, 2018; Olson & Mossman, 2003), ya que no se requieren datos históricos como las series de tiempos. Es de anotar que este tipo de productos que tienen algún componente de obsolescencia programada, como lo son los teléfonos inteligentes, donde su vida útil es diferente a la de un bien de consumo tradicional, requieren de técnicas alternativas para anticiparse a las cantidades y cualidades de las demandas. Las redes neuronales presentan ventajas

pues el aprendizaje es sobre los mismos datos y no sobre tendencias y estacionalidades propias de los modelos de series de tiempo ya mencionados.

7.3 Hibridación de Instalaciones Logísticas

Si se tiene en cuenta la hipótesis uno de esta tesis que define que el utilizar diferentes tipos de instalaciones y combinar diferentes estrategias de almacenamiento y variando la capacidad de estas, impactan de manera positiva el costo logístico y la rapidez en la entrega, ambas medidas de desempeño del sistema propuesto, se logró establecer que, la combinación de instalaciones de almacenamiento tradicional (Gan et al., 2018; Hu, 2019; Hua et al., 2016; Kuo, 2011; Li & Wei, 2018; Nie, 2018; Yu et al., 2020; Zhuge et al., 2016) y tipo *Cross-Docking* (Bhangu et al., 2019; Deng & Qu, 2020; Hasani-Goodarzi & Zegordi, 2016; Mousavi et al., 2019; Mousavi, Tavakkoli-Moghaddam, & Jolai, 2013; Mousavi & Vahdani, 2016), resulta un aporte novedoso de la tesis. A lo largo de la consulta bibliográfica realizada, se encuentran diferentes diseños de redes de distribución que utilizan estrategias de un solo tipo de instalaciones. Se realizan diferentes hibridaciones, pero de técnicas para el modelamiento y/o la solución de modelos de localización de almacenes tipo tradicionales o con concepto de almacenamiento cero, pero no de manera simultánea (Fakhrzad & Sadri-Esfahani, 2014; Mousavi, Nadizadeh & Hosseini Nasab, 2014; Pichka et al., 2018; Prodhon, 2011; Zhang et al., 2014). Los resultados permitieron definir que la mejor combinación de instalaciones resulta en *Cross-Docking* con almacenes regionales, posiblemente esto se explique por el atraso en la red de infraestructura carretable del país (Baquero et al., 2020), que hace indispensable mantener almacenes con inventario por políticas de servicio. Estas instalaciones atienden aquellas poblaciones ubicadas en sitios del país alejados, donde el tiempo de respuesta es mayor a 7 días, como lo arroja el modelo matemático aplicado, cumpliendo la promesa de servicio ofrecida.

La premisa principal a considerar en este apartado consiste en resaltar la importancia e impacto positivo en cuanto a la relación beneficio/costo de hibridar por lo menos dos tipos de instalaciones logísticas en una red de distribución, la cual se muestra de 1,25 en la propuesta del modelo frente a un 0,98 actual; a fin de mejorar por una parte, los niveles de servicio y capacidad de respuesta y por otra parte, el costo de la distribución, el cual disminuye en un 22% con la propuesta; esto atiende a un entorno de cadenas de suministro con múltiples objetivos, donde el centro del proceso es el consumidor, sin descuidar las métricas para el operador.

Se hace insistencia en no perder de vista que la aplicación práctica se hace en un operador logístico de cuarta generación (4PL) que tiene por ventaja la flexibilidad en cuanto al diseño y rediseño de su red de distribución, además de las posibles economías de escala a las cuales pueda hacerse debido a la cooperación de recursos inclusive con sus mismos competidores.

Sin embargo, se hace necesario, como se hizo en la aplicación práctica de esta tesis, hacer un análisis del comportamiento de los costos y hasta dónde es posible brindar un nivel de servicio y una capacidad de respuesta para los clientes, que no comprometa la estabilidad financiera de la compañía. Por esto la insistencia en las medidas de desempeño logísticas y el costo asociado a su cumplimiento.

7.4 Impacto en las Medidas de Desempeño

El modelo matemático formulado arroja los resultados de las variables bajo las condiciones programadas en el mismo: múltiples períodos (5 años), diferentes objetivos de acuerdo con los niveles de servicio, reducción de costos y de tiempos de operación; tipos de instalaciones, nivel de inventarios o déficit si es del caso, y, en concordancia con el objetivo específico 2, considera todas las etapas de planeación, lo que se constituye en un aporte importante, en comparación a otros autores consultados para la presente tesis, que solamente abordan un aspecto o dimensión (Ekren & Ornek, 2015; Jouzdani et al., 2013; Mogale et al., 2020; Mousavi et al., 2014; Sadeghi et al., 2016; Salema et al., 2010; Xiao & Rao, 2016).

Con respecto al modelamiento matemático de la red de distribución, es importante resaltar el énfasis que se hace sobre las medidas de desempeño en el costo de la operación logística, también sobre los niveles de servicio y sobre el tiempo de entrega; esto es un aspecto que no se observa en otros trabajos consultados, donde solamente se hace el análisis de sensibilidad a una sola medida de desempeño (Berman & Wang, 2006; Jaillet et al., 2002b, 2002a; Makarova et al., 2017; Mouloua & Oulamara, 2007). En los sistemas logísticos reales es conocido que el cliente exige además de costo, un diferencial importante sobre la calidad y el servicio; representado como tiempo y oportunidad en la entrega. En la aplicación puntual para esta tesis se observa que el nivel de servicio óptimo se obtiene en el 92%, para el cual el costo de distribución es mínimo, se abren el mínimo de instalaciones, se da el mínimo tiempo de respuesta, el inventario es cero y se maneja un déficit mínimo. El modelo consigue integrar la gestión de distribución y la de inventarios tal como lo sugiere la hipótesis 2 al especificar las cantidades de envío y las cantidades a ser

conservadas en las instalaciones, si es del caso, o si se presenta déficit y esta información se da por período de planeación. En un comienzo, según lo reportado por la teoría, no era muy claro poder incluir en la misma formulación tantos parámetros y variables con diferentes temporalidades, sin embargo, los resultados reportan la viabilidad de esta propuesta.

7.5 Diseño de Rutas de Entrega a Clientes

La hipótesis tres de esta tesis define que es posible formular métodos alternativos a los tradicionales, que avancen en la optimización en cuanto a la solución de modelos logísticos propuestos. Estos métodos alternativos resultan menos costosos en términos computacionales y bastantes eficientes en términos de respuesta. Lo anterior permite en especial, argumentar las ventajas de los algoritmos heurísticos y de las aplicaciones disponibles de software libre utilizadas en esta tesis y que están disponibles como recursos en la web.

El ruteo de vehículos es una de las aplicaciones específicas en logística que más literatura ha aportado en los últimos años (Bertazzi & Speranza, 2012; Erdoğan & Miller-Hooks, 2012; Gendreau, 2010b; Mes et al., 2014), los métodos de solución al problema han abarcado diferentes soluciones que van desde problemas de talla pequeña (menos de 50 puntos de entrega), mediante optimización, hasta muchos puntos de entrega mediante metaheurísticas.

En esta tesis, se abordó la distribución desde los estadios de planeación a largo, mediano y corto plazo, variables que obligadamente involucran rutas, por lo tanto, debió abordarse de manera propositiva el problema de ruteo de vehículos. De acuerdo con lo sugerido en la hipótesis de investigación 3 y los objetivos específicos 3 y 4 de la presente tesis doctoral, se aplicó para cada clúster de clientes, un árbol de mínima expansión, utilizando el software libre R, conectando de esta manera los puntos de entrega, simplificando de esta manera de manera importante la complejidad de los cálculos. Es así como de un posible modelo con 176 nodos, lo cual fácilmente se traduciría en más de $9,58 \times 10^{52}$ iteraciones, se simplifica a 12 subproblemas (12 clúster), en los cuales, al aplicar este árbol de mínima expansión, se obtienen unas conexiones de mínimo costo, que se re optimizan en rutas de atención a clientes. Es importante anotar que posteriormente se aplica un modelo de optimización para encontrar el número de vehículos mínimo con las respectivas restricciones de carga, con un costo total de ruteo de \$163.048'396.295 COP y 4549 Vehículos de tipo 1; 7313 vehículos tipo 2 y 4985 vehículos tipo 3.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Colombia es un país con profundos retos de diferente orden en materia logística tales como: la falta de diversificación en sus modos de transporte, la deficiente infraestructura vial, su geografía quebrada, entre otros. Estos son factores que dificultan la conexión entre centros de producción y centros de consumo, incrementando las brechas económicas y la falta de productividad sectorial. Por estas y otras razones es que los operadores logísticos deben estar en constante búsqueda de modelos y formulaciones enriquecidas cuyas soluciones propendan por generar eficiencias en costo y tiempo de entrega, frente a las realidades coyunturales de ausencia de una política pública de infraestructura y transporte coherente y a largo plazo en el país.

El estado del arte de las redes de distribución apunta hacia el diseño de redes que utilicen instalaciones con criterios de eficiencia en múltiples dimensiones: costo, emisiones, utilización de energía, utilización de recursos e impacto sobre la salud de las personas. Estas son tendencias hacia las que es importante direccionar las investigaciones futuras, una logística sostenible entendida en sus tres pilares: lo económico, ambiental y social. Por otra parte, en cuanto al planteamiento de modelos y representaciones de la realidad de los sistemas, se observa que cada vez este tipo de formulaciones son más robustas puesto que incluyen mayor cantidad de variables y parámetros de tipo aleatorio o en algunos casos estocástico, lo cual es consistente con el día a día de las operaciones logísticas. Es importante anotar que paralelo al desarrollo de las ciencias de la computación y el análisis de datos, es posible solucionar modelos de gran talla, y permite mayores avances en el campo de la distribución y la logística, lo que favorece las medidas de desempeño tales como: costo, rapidez y nivel de servicio.

Las técnicas de análisis de grandes conjuntos de datos permiten explorar datos provenientes de la realidad de los sistemas logísticos y encontrar patrones de asociación y de comportamiento numérico, que se convierten en ventajas con el fin de reducir la talla de diferentes modelos. Es así como las técnicas de reducción de dimensiones, como la de las *k-medias* utilizada en este trabajo, permiten formar grupos de clientes no solamente por su cercanía geográfica, sino también por similitudes en el tipo de productos a solicitar, en las cantidades, en las fechas de entrega, entre otros aspectos que son relevantes en el quehacer diario de la distribución de productos. Así mismo, este tipo de técnicas permiten extraer desde los sistemas de gestión empresarial o *ERP's* diferentes

conjuntos de datos que alimenten directamente estos modelos y clusterizar clientes, facilitando de esta manera la gestión de la demanda.

Agrupar primero y localizar instalaciones en una segunda fase de modelamiento, permite proponer modelos de optimización, debido a la reducción de talla, que redundan en reducción de tiempo computacional. Como estrategia de eficiencia, este trabajo propone también agregar los productos por familias y manejar en vez de unidades físicas, unidades monetarias. Se recomienda mantener una información actualizada de todos los parámetros de costos referentes a la operación de distribución, tales como: costos fijos y variables de instalaciones, de mantenimiento de inventarios, de transporte y de manejo de materiales.

La hibridación de instalaciones (*Cross-Docking*, Almacenes intermedios) permite generar economías en redes de distribución para afrontar ineficiencias como las que se presentan en Colombia, debido a la falta de una red multimodal de transporte. Las instalaciones *Cross-Docking* aportan rapidez y niveles bajos de inventario, mientras que los almacenes intermedios ubicados a nivel regional proporcionan niveles de servicio en poblaciones lejanas donde de otra manera, se demorara en promedio más de 7 días la entrega de mercancías. Esta estrategia no ha sido desarrollada en los trabajos consultados para esta tesis, es por esto que resulta interesante como aporte al desarrollo logístico del país. Así mismo resultaría interesante, como proyección para trabajos futuros, pensar en otras estrategias de cooperación y compartir recursos de almacenamiento y transporte con otros operadores logísticos 3PL, con el fin de aprovechar disminuciones en tarifas y fletes unitarios.

Se concluye que la planeación de redes de distribución debe modelarse las tres etapas: a largo, mediano y corto plazo. Estas representaciones deben desplegarse en respuestas cuyas salidas alimenten a las siguientes etapas de planeación. Este enfoque de solución permite ajustarse a los contextos de los sistemas logísticos y adicionar variables y parámetros provenientes de la realidad. A través de la aplicación práctica realizada en esta tesis se demuestra que pese a las prevenciones a priori, es posible manejar diferentes temporalidades en las formulaciones y obtener diferentes respuestas en los modelos para diferentes períodos de tiempo, de acuerdo con el tipo de variable sobre la que se quieren obtener resultados. En este caso se obtuvieron cantidades a entregar para cada año y tiempos de entrega de acuerdo con las promesas de servicio (en días), esto da muestras de la versatilidad del modelo. También se extrajo información referente a cantidades en déficit en

algunos períodos y en otros casos cantidades en inventario para algunas instalaciones y períodos. Lo anterior indica las potencialidades del modelo para arrojar diferente tipo de información en diferentes etapas de planeación.

Las medidas de desempeño de una red de distribución además del costo logístico, pueden ser el tiempo de respuesta y el nivel de servicio, esto de manera simultánea. De hecho, existe una relación matemática demostrable entre estas tres magnitudes, la cual es polinómica de segundo grado. De acuerdo con la literatura consultada para la presente tesis, el número de instalaciones que componen la red tiene incidencia directa sobre el comportamiento de estas variables mencionadas. Existe un número óptimo de instalaciones que permite que se equilibren los costos de distribución, que se alcancen los niveles de servicio y que se cumpla con la promesa de servicio; más allá de este punto, se logró demostrar en el análisis de los escenarios del presente trabajo que los costos no se comportan según lo esperado, tampoco el tiempo de respuesta. Es pertinente acotar que un nivel de servicio más allá de este punto óptimo tampoco es rentable en términos de indicadores económicos para la operación.

En cuanto a la etapa operativa o lo referente al ruteo de vehículos, se concluye que el algoritmo de conectar nodos o puntos de entrega mediante el árbol de mínima expansión funciona para el ruteo de vehículos, siempre y cuando el circuito se re-optimice posteriormente, minimizando el número y tipo de vehículos que harán las rutas en cada clúster, teniendo como restricciones la capacidad de los vehículos y las cantidades a entregar en cada punto de entrega.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adelman, D. (2004). A Price-Directed Approach to Stochastic Inventory / Routing. *Operations Research*, 52(4), 499–514. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0114>
- Agustina, D., Lee, C. K. M., & Piplani, R. (2014). Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 152, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.01.002>
- Ahmadi-Javid, A., & Hoseinpour, P. (2015). A location-inventory-pricing model in a supply chain distribution network with price-sensitive demands and inventory-capacity constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 82, 238–255. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.06.010>
- Akoka, J., Comyn-Wattiau, I., & Laoufi, N. (2017). Research on Big Data – A systematic mapping study. *Computer Standards and Interfaces*, 54(January 2017), 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.01.004>
- Alharthi, A., Krotov, V., & Bowman, M. (2017). Addressing barriers to big data. *Business Horizons*, 60(3), 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.01.002>
- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.018>
- Arango, M. D., Zapaa, J. A., & Adarme, W. (2011). Aplicación del modelo de inventario manejado por el vendedor en una empresa del sector alimentario colombiano. *Revista EIA*, 15, 21–32.
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 41(3), 382–391. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0188>
- Archetti, C., & Peirano, L. (2020). Air intermodal freight transportation: The freight forwarder service problem. *Omega (United Kingdom)*, 94(xxxx), 102040. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.02.009>

- Archibald, T., Black, D., & Glazebrook, K. (2009). *Indexability and index heuristics for a simple class of inventory routing problems*. 57(2), 314–326.
<https://doi.org/10.1287/opre.1070.0505>
- Babazadeh, R., Jolai, F., Razmi, J., & Pishvaei, M. S. (2014). Developing a robust programming approach for the responsive logistics network design under uncertainty. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, 21(1), 1–17.
- Ballou, R. (2004a). *Logística. Administración de la cadena de suministro*.
- Ballou, R. (2004b). *Logística. Administración de la cadena de suministro*.
- Baniamerian, A., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2019). Modified variable neighborhood search and genetic algorithm for profitable heterogeneous vehicle routing problem with cross-docking. *Applied Soft Computing Journal*, 75, 441–460.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.11.029>
- Baquero, G., Zamudio, A., & Cadenas, C. (2020). INFRAESTRUCTURA LOGÍSTICA: UN BENCHMARKING ENTRE COLOMBIA VS MÉXICO. *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA*, 24(102), 66–73.
<https://www.uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/344/626>
- Baranowski, S., Busko, E., Shishlo, S., Usevich, W., Androsik, J., Mistseiko, M., Tanaś, W., & Szymanek, M. (2015). Formation Mechanism of Logistics Cluster in Belarus. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 7, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.022>
- Bard, J. (University of T., Huang, L. (University of T., Jaillet, P. (University of T., & Dror, M. (University of A. (1998). A Decomposition Approach to the Inventory Routing Problem with Satellite Facilities. *Transportation Science*, 32(2), 189–203.
- Bartolacci, M. R., LeBlanc, L. J., Kayikci, Y., & Grossman, T. A. (2012). Optimization modeling for logistics: Options and implementations. *Journal of Business Logistics*, 33(2), 118–127. <https://doi.org/10.1111/j.0000-0000.2012.01044.x>
- Bastian, C., & Rinnooy, A. (1992). The stochastic vehicle routing problem revisited. *European Journal of Operational Research*, 56(3), 407–412.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90323-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90323-2)

- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Kedia, P., Mack, R. G., Prutzman, P. J., Bell, J., & Prutzman, J. (1983). of Industrial Gases Improving the Distribution with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, 13(6), 4–23.
- Belle, V., Belle, J. Van, Germain, B. Saint, Philips, J., Valckenaers, P., Cattrysse, D., Van Belle, J., Germain, B. Saint, Philips, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2013). Cooperation between a holonic logistics execution system and a vehicle routing scheduling system. In T. Marcos (Ed.), *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 46, Issue 7). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00051>
- Berman, O., & Larson, R. C. (2001). Deliveries Problem in an Inventory / Routing Stochastic Using Programming Dynamic. *Transportation Scienc*, 35(2), 192–213.
- Berman, O., & Wang, Q. (2006). Inbound logistic planning: Minimizing transportation and inventory cost. *Transportation Science*, 40(3), 287–299. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0130>
- Bersani, C., Minciardi, R., & Sacile, R. (2010). Economic and Risk Implications in the Distribution of Petrol Products to Service Stations under Retailer Managed and Vendor Managed Inventories. *International Journal of Sustainable Transportation*, 4(3), 129–153. <https://doi.org/10.1080/15568310802470117>
- Bertazzi, L. (2008). Analysis of Direct Shipping Policies in an Inventory-Routing Problem with Discrete Shipping Times. *MANagement Science*, 54(4), 748–762. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0768>
- Bertazzi, L., Bosco, A., & Laganà, D. (2014). Managing stochastic demand in an Inventory Routing Problem with transportation procurement. *Omega*. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.09.010>
- Bertazzi, L., Laganà, D., Ohlmann, J. W., & Paradiso, R. (2020). An exact approach for cyclic inbound inventory routing in a level production system. *European Journal of Operational Research*, 283(3), 915–928. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.060>
- Bertazzi, L., Paletta, G., & Speranza, M. G. (2002). Deterministic Order-Up-To Level Policies in an Inventory Routing Problem. *Transportation Science*, 36(1), 119–132. <https://doi.org/10.1287/trsc.36.1.119.573>

- Bertazzi, L., & Speranza, M. G. (2012). Inventory routing problems: an introduction. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(4), 307–326. <https://doi.org/10.1007/s13676-012-0016-7>
- Bhangu, M. S., Anand, R., & Kumar, V. (2019). Lagrangian relaxation for distribution networks with cross-docking centre. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 18(1–2), 52–68. <https://doi.org/10.1504/IJISTA.2019.097747>
- Bieniek, M. (2015). A note on the facility location problem with stochastic demands. *Omega (United Kingdom)*, 55, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.02.006>
- Birim, Ş. (2016). Vehicle Routing Problem with Cross Docking: A Simulated Annealing Approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 235(October), 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.010>
- Bortolini, M., Galizia, F. G., Gamberi, M., Mora, C., & Pilati, F. (2019). Enhancing stock efficiency and environmental sustainability goals in direct distribution logistic networks. *International Journal of Advanced Operations Management*, 11(1–2), 8–25. <https://doi.org/10.1504/IJAOM.2019.098518>
- Bosona, T. G., & Gebresenbet, G. (2011). Cluster building and logistics network integration of local food supply chain. *Biosystems Engineering*, 108(4), 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.001>
- Boulaksil, Y., Fransoo, J. C., Blanco, E. E., & Koubida, S. (2019). Understanding the fragmented demand for transportation – Small traditional retailers in emerging markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 130, 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.003>
- Bramel, J., & Simchi-Levi, D. (1995). A Location Based Heuristic for General Routing Problems. *Operations Research*, 43(4), 649–660. <https://doi.org/10.1287/opre.43.4.649>
- Buijs, P., Vis, I. F. A., & Carlo, H. J. (2014). Synchronization in cross-docking networks: A research classification and framework. *European Journal of Operational Research*, 239(3), 593–608. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.012>
- Cáceres, J. de J. (2013). *Randomized Algorithms for Rich Vehicle Routing Problems : From a Specialized Approach to a Generic Methodology* (Issue July). Universitat Oberta de Catalunya.

- Campbell, A. M., & Savelsbergh, M. W. P. (2004). A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 38(4), 488–502.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0054>
- Cao, B., & Glover, F. (2010). Creating balanced and connected clusters to improve service delivery routes in logistics planning. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 19(4), 453–480. <https://doi.org/10.1007/s11518-010-5150-x>
- Cárdenas-Barrón, L. E., Treviño-Garza, G., & Wee, H. M. (2012). A simple and better algorithm to solve the vendor managed inventory control system of multi-product multi-constraint economic order quantity model. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3888–3895.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.057>
- Cetinkaya, S., & Lee, C. (2014). Stock Replenishment and Shipment Scheduling for Inventory Systems. *Management Science*, 46(2), 217–232.
- Chan, L. M. a., Federgruen, a., & Simchi-Levi, D. (1998). Probabilistic Analyses and Practical Algorithms for Inventory-Routing Models. *Operations Research*, 46(1), 96–106.
<https://doi.org/10.1287/opre.46.1.96>
- Chang, K., Zhou, H., Chen, G., & Chen, H. (2017). Multiobjective Location Routing Problem considerin Uncertain Data after Disasters. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017, 7.
- Chase, R., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2009). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros*.
- Chen, J.-M., Lin, I.-C., & Cheng, H.-L. (2010). Channel coordination under consignment and vendor-managed inventory in a distribution system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 831–843.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.05.007>
- CHEN, K. H., Liao, C. N., & Wu, L. C. (2014). A Selection Model to Logistic Centers Based on TOPSIS and MCGP Methods : The Case of Airline Industry. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, 2014, 10.
<https://doi.org/10.1155/2014/470128>

- Chien, T. , Balakrishnan, A., Wong, R. (1989). An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, 23(2), 67–77.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2007). *Supply Chain Management*.
- CHOPRA, S., & MEINDL, P. (2013). *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, Planeación y Operación* (PEARSON EDUCACIÓN, Ed.; Tercera).
- Christiansen, M., & Nygreen, B. (1998). A method for solving ship routing problems with inventory constraints. *Annals of Operations Research*, 81, 357–378.
<https://doi.org/10.1023/A:1018921527269>
- Christou, I. T. (2012). Quantitative Methods in Supply Chain Management. In *Springer* (Vol. 1). Springer. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Coelho, L. C., Cordeau, J.-F. F., & Laporte, G. (2012). The inventory-routing problem with transshipment. *Computers and Operations Research*, 39(11), 2537–2548.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.020>
- Coelho, L. C., Laporte, G., & Cordeau, J. (2012). *Thirty Years of Inventory-Routing* (September).
- Contardo, C., & Cotardo, C. A. (2005). *Formulación y Solución de un Problema de Ruteo de Vehículos con Demanda Variable en Tiempo Real, Traspardos y Ventanas de Tiempo*. Universidad Santiago de Chile.
- Cortés, M., Aceves, R. (2007). Solución al problema de asignación-distribución. *XVIII Semana Regional de Investigación y Docencia En Matemáticas*, 20, 51–57.
- Costantino, N., Dotoli, M., Falagario, M., Fanti, M. P., & Mangini, A. M. (2012). A model for supply management of agile manufacturing supply chains. *Int. J. Production Economics*, 135(8), 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.021>
- Council of Supply Chain Management Professionals CSCMP. (2013). *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT TERMS and GLOSSARY*. <https://cscmp.org/>
- Creswell, J. (2009). *Research Design. Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications, Inc.

- Dai, Z., Aqlan, F., Gao, K., & Zhou, Y. (2019). A two-phase method for multi-echelon location-routing problems in supply chains. *Expert Systems with Applications*, *115*, 618–634. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.050>
- Danloup, N., Goncalves, G., & Allaoui, H. (2012). Comparative study of some heuristics for the cross-docking problem. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 45, Issue 6 PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00199>
- Das, K. (2011). Integrating effective flexibility measures into a strategic supply chain planning model. *European Journal of Operational Research*, *211*(1), 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.12.006>
- Das, K., & Sengupta, S. (2009). A hierarchical process industry production-distribution planning model. *International Journal of Production Economics*, *117*(2), 402–419. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.12.003>
- Daskin, M., Coullard, C., & Shen, Z.-J. (2002). An Inventory-Location Model : Formulation , Solution. *Annals of Operations Research*, 83–106.
- De Rosa, V., Gebhard, M., Hartmann, E., & Wollenweber, J. (2013). Robust sustainable bi-directional logistics network design under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, *145*(1), 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.033>
- De Rosa, V., Hartmann, E., Gebhard, M., & Wollenweber, J. (2014). Robust capacitated facility location model for acquisitions under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, *72*, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.009>
- Deng, X., & Qu, S. (2020). Cross-docking center location selection based on interval multi-granularity multicriteria group decision-making. *Symmetry*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/SYM12091564>
- Díaz, C. (2019). Pavimentar el camino de la infraestructura. *DINERO*.
- Disney, S., & Lambrecht, M. (2007). *On Replenishment Rules, Forecasting, and the Bullwhip Effect in Supply Chains*.
- Dolgui, A., & Proth, J.-M. (2010). Supply Chain Engineering. In *Springer* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Donath, B., Mazel, J., Dubin, C., & Patterson, P. (2002). *The IOMA Handbook of Logistics and Inventory Management*.
- Dondo, R., & Cerdá, J. (2013). A sweep-heuristic based formulation for the vehicle routing problem with cross-docking. *Computers and Chemical Engineering*, *48*, 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.09.016>
- Dondo, R., & Cerdá, J. (2014). A monolithic approach to vehicle routing and operations scheduling of a cross-dock system with multiple dock doors. *Computers and Chemical Engineering*, *63*, 184–205. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.12.012>
- Dondo, R., & Cerdá, J. (2015). The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. *Computers & Chemical Engineering*, *76*, 42–62. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.003>
- Dondo, R., Méndez, C. a., & Cerdá, J. (2011). The multi-echelon vehicle routing problem with cross docking in supply chain management. *Computers and Chemical Engineering*, *35*(12), 3002–3024. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.028>
- Du, T., Wang, F. K., & Lu, P. Y. (2007). A real-time vehicle-dispatching system for consolidating milk runs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *43*(5), 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.03.001>
- Ducret, R., Lemarié, B., & Roset, A. (2016). Cluster Analysis and Spatial Modeling for Urban Freight. Identifying Homogeneous Urban Zones Based on Urban Form and Logistics Characteristics. *Transportation Research Procedia*, *12*(June 2015), 301–313. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.067>
- Ekren, B. Y., & Ornek, M. A. (2015). Simulation Modelling Practice and Theory Determining optimum (s , S) levels of floor stock items in a paint production environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *57*, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.009>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *48*(1), 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Escobar, J. W. (2012). Rediseño de una red de distribución con variabilidad de demanda usando la metodología de escenarios Redesign of a supply chain with the variability of the demand

by using the methodology based on scenarios. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 21(32), 9–19.

- Escobar, J. W., Bravo, J. J., & Vidal, C. J. (2013). Optimización de una red de distribución con parámetros estocásticos usando la metodología de aproximación por promedios muestrales Supply chain optimization with stochastic parameters by using the sample average approximation method. *Ingeniería y Desarrollo*, 31(1).
- Espinal, A. A. C., Montoya, R. A. G., & Arenas, J. A. C. (2010). Warehouse management and information and communication technology. *Estudios Gerenciales*, 26(117), 145–171. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(10\)70139-X](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(10)70139-X)
- Fakhrzad, M. B., & Sadri Esfahani, A. (2014). A New Hybridized Algorithm for Modeling the Time Windows Vehicle Routing Problem in Cross-Docking Strategy. *International Journal of Engineering*, 27(7 (A)), 1113–1126. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2014.27.07a.13>
- Fanti, M. P., Stecco, G., & Ukovich, W. (2011). Solving scheduling problems in distribution centers by Mixed Integer Linear Programming formulations. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 44, Issue 1 PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03532>
- Fazayeli, S., Eydi, A., & Kamalabadi, I. N. (2018). Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 119(March), 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041>
- Fu, P., & Yin, H. (2012). Logistics Enterprise Evaluation Model Based On Fuzzy Clustering Analysis. *Physics Procedia*, 24, 1583–1587. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.233>
- Gan, M., Yang, S., Li, D., Wang, M., Chen, S., Xie, R., & Liu, J. (2018). A Novel Intensive Distribution Logistics Network Design and Profit Allocation Problem considering Sharing Economy. *Complexity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4678358>
- Gan, X., Jiang, E., Peng, Y., Geng, S., & Kustudic, M. (2018). Research optimization on logistic distribution center location based on improved harmony search algorithm. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and*

Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10941 LNCS. Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-93815-8_39

Ganesan, R. (2015a). *The Profitable Supply Chain*.

Ganesan, R. (2015b). *The Profitable Supply Chain: A Practitioner's Guide*.

Gaur, V., & Fisher, M. L. (2004). A Periodic Inventory Routing Problem at a Supermarket Chain. *Operations Research*, 52(6), 813–822. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0150>

Gelareh, S., Glover, F., Guemri, O., Hanafi, S., Nduwayo, P., & Todosijević, R. (2020). A comparative study of formulations for a cross-dock door assignment problem. *Omega (United Kingdom)*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.004>

Gendreau, M. (2010a). *An Adaptive Large Neighborhood Search for a Vehicle Routing Problem with Multiple Trips*.

Gendreau, M. (2010b). *Recent Advances in Stochastic Vehicle Routing*.

Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers. *Operations Research*, 44(3), 469–477. <https://doi.org/0030-364X/96/4403-0469>

Ghiami, Y., Williams, T., & Wu, Y. (2013). A two-echelon inventory model for a deteriorating item with stock-dependent demand, partial backlogging and capacity constraints. *European Journal of Operational Research*, 231(3), 587–597. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.015>

Ghiani, G., Laporte, G., & Musmano, R. (2004). *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*.

Gigli, L., Velasco-Forero, S., & Marcotegui, B. (2020). On minimum spanning tree streaming for hierarchical segmentation. *Pattern Recognition Letters*, 138, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2020.07.006>

Glock, C. H. (2012). Lead time reduction strategies in a single-vendor–single-buyer integrated inventory model with lot size-dependent lead times and stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.09.007>

- Goepel, K. D. (2018). *Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)*. International Journal of the Analytic Hierarchy Process.
<https://bpmmsg.com/ahp/>
- Golden, B. L., & Assad, A. A. (1986). Perspectives On Vehicle Routing : New Developments Exciting. *INFORMS*, 34(5), 803–810.
- Golden, B., & Yee, J. (1979). A framework for probabilistic vehicle routing. *AIEE Transact*, 11(2), 109–112.
- Gonzalez La Rotta, E. C., Menenez Mora, R. E., & Becerra Fernandez, M. (2018). Clusterization of Clients for Location Making Decisions of Logistics Facilities. *2018 Congreso Internacional de Innovacion y Tendencias En Ingenieria, CONIITI 2018 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587093>
- González-La Rotta, E. C., & Becerra-Fernández, M. (2017). Plataformas de intercambio con ruteo de vehículos. Una revisión del estado del arte. *DYNA*.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.60868>
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9–28.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>
- Guerrero, W. J. J., Prodhon, C., Velasco, N., Amaya, C. A. A., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 359–370.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.025>
- Günther, W. A., Mehrizi, M. H. R., Huysman, M., & Feldberg, F. (2017). *Journal of Strategic Information Systems Debating big data : A literature review on realizing value from big data*. 26, 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2017.07.003>
- Hanke, J., & Reitsh, A. (1996). *Pronósticos en los negocios* (5ta ed.). Pearson Education.
- Hasani Goodarzi, A., & Zegordi, S. H. (2016). A location-routing problem for cross-docking networks: A biogeography-based optimization algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 102, 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.10.023>

- Hasani-Goodarzi, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). Capacitated Vehicle Routing Problem for Multi-Product Cross-Docking with Split Deliveries and Pickups. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62(2010), 1360–1365.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.232>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la investigación. *México: Editorial Mc Graw Hill*.
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9th ed.). Mc Graw Hill.
- Hopp, W. J. (2003). *Supply chain science*.
- Hosseini, S. D., Akbarpour Shirazi, M., & Karimi, B. (2014). Cross-docking and milk run logistics in a consolidation network: A hybrid of harmony search and simulated annealing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 567–577.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.05.004>
- Hu, w. (2019). An improved flower pollination algorithm for optimization of intelligent logistics distribution center. *Advances in Production Engineering & Management*, 14(2), 177–188.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.11.001>.
- Hua, X., Hu, X., & Yuan, W. (2016). Research optimization on logistics distribution center location based on adaptive particle swarm algorithm. *Optik*, 127(20), 8443–8450.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.032>
- Hvattum, L. M., Løkketangen, A., & Laporte, G. (2009). Scenario tree-based heuristics for stochastic inventory-routing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 21(2), 268–285.
<https://doi.org/10.1287/ijoc.1080.0291>
- Introducción al Análisis Clúster*. (2018). <https://www.ugr.es/~gallardo/pdf/cluster-1.pdf>
- Ivanov, D., Pavlov, A., & Sokolov, B. (2014). Optimal distribution (re)planning in a centralized multi-stage supply network under conditions of the ripple effect and structure dynamics. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 758–770.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.023>

- Jaillet, P., Bard, J. F., Huang, L., & Dror, M. (2002a). Cost Approximations Delivery for Problems Inventory Routing in a Horizon Framework Rolling. *Transportation Science*, 36(3), 292–300.
- Jaillet, P., Bard, J. F., Huang, L., & Dror, M. (2002b). Delivery Cost Approximations for Inventory Routing Problems in a Rolling Horizon Framework. *Transportation Science*, 36(3), 292–300. <https://doi.org/10.1287/trsc.36.3.292.7829>
- Janssen, M., van der Voort, H., & Wahyudi, A. (2017). Factors influencing big data decision-making quality. *Journal of Business Research*, 70, 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.007>
- Joseph, A., & Bryson, N. (1998). Parametric linear programming and cluster analysis. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 582–588. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00379-2)
- Jouzani, J., Sadjadi, S. J., & Fathian, M. (2013). Dynamic dairy facility location and supply chain planning under traffic congestion and demand uncertainty: A case study of Tehran. *Applied Mathematical Modelling*, 37(18–19), 8467–8483. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.059>
- Jung, J., & Mathur, K. (2007). An Efficient Heuristic Algorithm for a Two-Echelon Joint Inventory and Routing Problem. *Transportation Science*, 41(1), 55–73. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0160>
- Juozapaitis, M., & Palsaitis, R. (2017). Feasibility Analysis of Establishing Logistics Clusters in Lithuania. *Procedia Engineering*, 178, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.077>
- Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J., & Rodríguez-Chía, A. M. (2010). Distribution systems design with role dependent objectives. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 491–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.001>
- Kao, C., & Hsu, W.-K. (2002). A single-period inventory model with fuzzy demand. *Computers & Mathematics with Applications*, 43(6–7), 841–848. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0898-1221\(01\)00325-X](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0898-1221(01)00325-X)

- Kapitanova, K., & Son, S. H. (2012). Machine learning basics. *Intelligent Sensor Networks: The Integration of Sensor Networks, Signal Processing and Machine Learning*, 3–29.
<https://doi.org/10.1201/b14300>
- Kazakovtsev, L., & Stupina, A. (2015). Deterministic algorithm with agglomerative heuristic for location problems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 94(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/94/1/012016>
- Kellar, G. M., Polak, G. G., & Zhang, X. (2015). Synchronization, cross-docking, and decoupling in supply chain networks. *International Journal of Production Research*, 1–15.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1107195>
- Keskin, B. B., Üster, H., & Çetinkaya, S. (2010). Integration of strategic and tactical decisions for vendor selection under capacity constraints. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2182–2191. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2010.03.008>
- Kim, N., Montreuil, B., Klibi, W., & Kholgade, N. (2021). Hyperconnected urban fulfillment and delivery. *Transportation Research Part E*, 145(December 2020), 102104.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102104>
- Kleywegt, A. J., Nori, V. S., & Savelsbergh, M. W. P. (2002). The Stochastic Inventory Routing Problem with Direct Deliveries. *Transportation Science*, 36(1), 94–118.
- Kleywegt, A. J., Nori, V. S., & Savelsbergh, M. W. P. (2004). Dynamic Programming Approximations for a Stochastic Inventory Routing Problem. *Transportation Science*, 38(1), 42–70. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0041>
- Ko, H. J., Ko, C. S., & Kim, T. (2006). A hybrid optimization/simulation approach for a distribution network design of 3PLS. *Computers and Industrial Engineering*, 50(4), 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2005.03.006>
- Kolen, A. W. J., Rinnooy, A. H. G., & Tiren timers, H. W. J. M. (1987). Vehicle Routing with Time Windows. *Operations Research*, 35(2), 266–273.
- Koseleva, N., & Ropaitė, G. (2017). Big Data in Building Energy Efficiency: Understanding of Big Data and Main Challenges. *Procedia Engineering*, 172, 544–549.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.064>

- Küçüköğlu, I., Aksoy, A., Ene, S., & Öztürk, N. (2013). A mathematical model for two dimensional loading problem in cross-docking network design. *Mathematical and Computational Applications*, 18(3), 273–282.
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84884248480&partnerID=tZOtx3y1>
- Küçüköğlu, İ., & Öztürk, N. (2014). Simulated Annealing Approach for Transportation Problem of Cross-docking Network Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109(2012), 1180–1184. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.608>
- Kumar, I., Zhalnin, A., Kim, A., & Beaulieu, L. J. (2017). Transportation and logistics cluster competitive advantages in the U.S. regions: A cross-sectional and spatio-temporal analysis. *Research in Transportation Economics*, 61, 25–36.
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.07.028>
- Kuo, M. S. (2011). Optimal location selection for an international distribution center by using a new hybrid method. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7208–7221.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.002>
- Kwak, C., Choi, J. S., Kim, C. O., & Kwon, I.-H. (2009). Situation reactive approach to Vendor Managed Inventory problem. *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9039–9045.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.018>
- Labbé, M., Pozo, M. A., & Puerto, J. (2021). Computational comparisons of different formulations for the Stackelberg minimum spanning tree game. *International Transactions in Operational Research*, 28(1), 48–69. <https://doi.org/10.1111/itor.12680>
- Ladier, A.-L. L., & Alpan, G. (2016). Cross-docking operations: Current research versus industry practice. *Omega*, 62, 145–162. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.09.006>
- Lambert, D., Stock, J., & Ellram, L. (1998). *Fundamentals of Logistics Management*.
- Lao, Y., & Leong, H. (2002). A Multi-agent Based Approach to the Inventory Routing Problem. *PRICAI 2002: Trends in Artificial Intelligence*, 2417, 345–354. https://doi.org/10.1007/3-540-45683-x_38
- Laporte, G., Toth, P., & Vigo, D. (2013). Vehicle routing: historical perspective and recent contributions. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(1–2), 1–4.
<https://doi.org/10.1007/s13676-013-0020-6>

- Lee, Y. H., Jung, J. W., & Lee, K. M. (2006). Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 247–256.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.006>
- LEGISCOMEX. (2019). *El desarrollo de la infraestructura en Colombia*. LEGISCOMEX.
<https://www.legiscomex.com/Documentos/DESARROLLO-INFRAESTRUCTURA-COLOMBIA-RCI285>
- Lei, H., Laporte, G., & Guo, B. (2011). The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. *Computers & Operations Research*, 38(12), 1775–1783.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.02.007>
- Li, J. (2018). Optimal design of transportation distance in logistics supply chain model based on data mining algorithm. *Cluster Computing*, 3456789, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2544-x>
- Li, S., & Wei, Z. (2018). A hybrid approach based on the analytic hierarchy process and 2-tuple hybrid ordered weighted averaging for location selection of distribution centers. *PLOS ONE*, 1–18.
- Liao, B., & Wang, T. (2019). Reverse Logistics Network Design for Industrial Waste in Industrial Clusters: Opportunities from Artificial Intelligence Technology. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial and Logistics Engineering, SMILE 2019*, 183–189. <https://doi.org/10.1109/SMILE45626.2019.8965322>
- Liao, L., Li, J., & Wu, Y. (2013). Modeling and Optimization of Inventory-Distribution Routing Problem for Agriculture Products Supply Chain. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2013/409869>
- Liu, C. (1999). *Clustering techniques for stock location and order-picking in.pdf*. 26.
- Liu, S. C., & Lee, S. B. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11–12), 941–950.
<https://doi.org/10.1007/s00170-003-1639-5>

- Liu, S. C., & Lin, C. C. (2004). A heuristic method for the combined location routing and inventory problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(4), 372–381. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-2005-3>
- Liu, S. Y., Li, C., Feng, Y. P., & Rong, G. (2013). Clustering structure and logistics: A new framework for supply network analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(8), 1383–1389. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.02.021>
- Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2014). Integration of sale and leaseback in the optimal design of supply chain networks. *Omega (United Kingdom)*, 47, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.004>
- Maheshwari, S., Gautam, P., & Jaggi, C. K. (2020). Role of Big Data Analytics in supply chain management: current trends and future perspectives. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–26. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1793011>
- MAKAROVA, I., SHUBENKOVA, K., & PASHKEVICH, A. (2017). Logistical Costs Minimization for Delivery of Shot Lots by using Logistical Information Systems. *Procedia Engineering*, 178, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.059>
- Manouchehri, F., Nookabadi, A. S., & Kadivar, M. (2020). Production routing in perishable and quality degradable supply chains. *Heliyon*, 6(2), e03376. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03376>
- Mantilla, F. A. P., & Torres, F. (2014). Anticipo en línea de la próxima edición Modelos de inventarios con productos que se deterioran: revisión de la literatura. In *Ingeniería* (Vol. 19, Issue 2).
- Marmolejo, J. A., Rodríguez, R., & Saucedo, J. (2016a). *Design of a Distribution Network Using Primal-Dual Decomposition. 2016.*
- Marmolejo, J. A., Rodríguez, R., & Saucedo, J. (2016b). *Design of a Distribution Network Using Primal-Dual Decomposition. 2016.*
- Martínez-Costa, C., Mas-Machuca, M., Benedito, E., & Corominas, A. (2014). A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 153, 66–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.03.011>

- Mavi, R. K., Goh, M., Mavi, N. K., Jie, F., Brown, K., Biermann, S., & Khanfar, A. A. (2020). *Cross-Docking : A Systematic Literature Review*. 1–19.
- Mes, M., Schutten, M., & Rivera, A. P. (2014). Inventory routing for dynamic waste collection. *Waste Management (New York, N.Y.)*, *34*(9), 1564–1576.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.011>
- Mesa-Arango, R., & Ukkusuri, S. v. (2015). Demand clustering in freight logistics networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *81*, 36–51.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.06.002>
- Miao, Z., Lim, A., & Ma, H. (2009). Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks. *European Journal of Operational Research*, *192*(1), 105–115.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.031>
- Mogale, D. G., Cheikhrouhou, N., & Tiwari, M. K. (2020). Modelling of sustainable food grain supply chain distribution system: a bi-objective approach. *International Journal of Production Research*, *58*(18), 5521–5544. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1669840>
- Mogale, D. G., Dolgui, A., Kandhway, R., Kumar, S. K., & Tiwari, M. K. (2017). A multi-period inventory transportation model for tactical planning of food grain supply chain. In *Computers and Industrial Engineering* (Vol. 110). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.008>
- Moghadam, S. S., Ghomi, S. M. T. F., & Karimi, B. (2014). Vehicle routing scheduling problem with cross docking and split deliveries. *Computers and Chemical Engineering*, *69*, 98–107.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.06.015>
- Moghaddam, B. F., Ruiz, R., & Sadjadi, S. J. (2012). Vehicle routing problem with uncertain demands: An advanced particle swarm algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, *62*(1), 306–317. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.001>
- Mohtashami, A., Tavana, M., Santos-Arteaga, F. J., & Fallahian-Najafabadi, A. (2015). A novel multi-objective meta-heuristic model for solving cross-docking scheduling problems. *Applied Soft Computing*, *31*, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.030>
- Moin, N. H., & Salhi, S. (2006). Inventory routing problems: a logistical overview. *Journal of the Operational Research Society*, *58*(9), 1185–1194.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602264>

- Mokhtarinejad, M., Ahmadi, A., Karimi, B., & Rahmati, S. H. A. (2015). A novel learning based approach for a new integrated location-routing and scheduling problem within cross-docking considering direct shipment. *Applied Soft Computing*, 34, 274–285.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.04.062>
- MONTERROSO, E. (2014). *El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento* (Issue March). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1607.1444>
- Morais, V. W. C. C., Mateus, G. R., Noronha, T. F., Santos, F. A., Mateus, G. R., Da Cunha, A. S., Yu, V. F., Jewpanya, P., Redi, A. A. N. P., Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Maknoon, Y., Laporte, G., Morais, V. W. C. C., Mateus, G. R., Noronha, T. F., Cóccola, M., Méndez, C. A., Dondo, R. G., ... Hou, J. (2014). Iterated local search heuristics for the Vehicle Routing Problem with Cross-Docking. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7495–7506. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.010>
- Mosca, A., Vidyarthi, N., & Satir, A. (2019). Integrated transportation – inventory models: A review. *Operations Research Perspectives*, 6(February).
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100101>
- Mouloua, Z., & Oulamara, A. (2007). Dynamic Programming Approach for Minimizing the Transportation Costs in a Supply Chain. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(18), 753–758.
<https://doi.org/10.3182/20070927-4-ro-3905.00124>
- Mousavi, S. M., Antuchevičienė, J., Zavadskas, E. K., Vahdani, B., & Hashemi, H. (2019). A NEW DECISION MODEL FOR CROSS-DOCKING CENTER LOCATION IN LOGISTICS NETWORKS UNDER INTERVAL-VALUED INTUITIONISTIC FUZZY UNCERTAINTY. *TRANSPORT*, 34(1), 30–40.
- Mousavi, S. M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), 335–347.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.12.002>
- Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Jolai, F. (2013). A possibilistic programming approach for the location problem of multiple cross-docks and vehicle routing scheduling

under uncertainty. *Engineering Optimization*, 45(10), 1223–1249.

<https://doi.org/10.1080/0305215X.2012.729053>

- Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A., & Vahdani, B. (2013). Hybrid Metaheuristics. In M. J. Blesa, C. Blum, P. Festa, A. Roli, & M. Sampels (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 7919). Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-38516-2>
- Mousavi, S. M., & Vahdani, B. (2016). Cross-docking Location Selection in Distribution Systems: A New Intuitionistic Fuzzy Hierarchical Decision Model. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(1), 91–109.
<https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1144156>
- Mousavi, S. M., Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Hashemi, H. (2014). Location of cross-docking centers and vehicle routing scheduling under uncertainty: A fuzzy possibilistic-stochastic programming model. *Applied Mathematical Modelling*, 38(7–8), 2249–2264. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.029>
- Muñoz-Villamizar, A. F., Montoya-torres, J. R., & Herazo-padilla, N. (2014). Mathematical Programming Modeling and Resolution of the Location-Routing Problem in Urban Logistics I Modelación en programación matemática y resolución del. *Ingeniería y Universidad*, 18(2), 271–289. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.mpmr>
- Muñuzuri, J., Domínguez, I., Berrocal, M. A., & Escudero, A. (2016). An allocation-scheduling heuristic to manage train traffic in an intermodal terminal. *Computers in Industry*, 82, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.07.006>
- Musavi, M. M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 113, 766–778. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.039>
- Nadizadeh, A., & Hosseini Nasab, H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 238(2), 458–470. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.012>

- Narasimham, S., McLeavey, D. W. D., Billington, P., Narasimhan, S., McLeavey, D. W. D., & Billington, P. (1996). *PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CONTROL DE INVENTARIOS* (R. Wohl, Ed.; 2da.).
- Nasiri, G. R., Zolfaghari, R., & Davoudpour, H. (2014). An integrated supply chain production-distribution planning with stochastic demands. *Computers and Industrial Engineering*, 77, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.005>
- Nassief, W., Contreras, I., & As'ad, R. (2015). A mixed-integer programming formulation and Lagrangean relaxation for the cross-dock door assignment problem. *International Journal of Production Research*, 54(2), 494–508. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.1003664>
- Ni, M., He, Q., Liu, X., & Hampapur, A. (2018). Same-day delivery with crowdshipping and store fulfillment in daily operations. *Transportation Research Procedia*, 38, 894–913. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.05.046>
- Nie, J. (2018). Location Decision of Logistics Distribution Centers Based on Artificial Neural Network. *NeuroQuantology*, 16(6), 686–691. <https://doi.org/10.14704/nq.2018.16.6.1613>
- Niroomand, I., & Nsakanda, A. L. (2018). Improving collection flows in a public postal network with contractor's obligation considerations. *International Journal of Production Economics*, 198(January), 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.025>
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. *Instituto de Computacion - Facultad de Ingenieria*.
- Olshannikova, E., Olsson, T., Huhtamäki, J., & Kärkkäinen, H. (2017). Conceptualizing Big Social Data. *Journal of Big Data*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-017-0063-x>
- Olson, D., & Mossman, C. (2003). Neural network forecasts of Canadian stock returns using accounting ratios. *International Journal of Forecasting*, 19(3), 453–465. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(02\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(02)00058-4)
- Orjuela Castro, J. A. (2018). *Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos*. Universidad Nacional de Colombia.

- Oudouar, F., & el Fellahi, A. (2017). Solving the location-routing problems Using Clustering Method. *Proceedings of the 2nd International Conference on Big Data, Cloud and Applications - BDCA'17*, 1–5. <https://doi.org/10.1145/3090354.3090472>
- Oussous, A., Benjelloun, F.-Z., Lahcen, A. A., & Belfkih, S. (2017). Big Data technologies: A survey. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2017.06.001>
- Özdamar, L., & Demir, O. (2012). A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3), 591–602. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.11.003>
- Palacio, A., Adenso-Díaz, B., & Lozano, S. (2018). Analysing the factors that influence the Pareto frontier of a bi-objective supply chain design problem. *International Transactions in Operational Research*, 25(6), 1717–1738. <https://doi.org/10.1111/itor.12493>
- Patil, N. S., Kiran, P., Kavya, N. P., M, N. P. K., & Naresh Patel, K. M. (2018). A survey on graph database management techniques for huge unstructured data. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(2), 1140–1149. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i2.pp1140-1149>
- Paul, A., Freund, D., Ferber, A., Shmoys, D. B., Williamson, D. P., Paul, A., Freund, D., Ferber, A., Shmoys, D. B., Williamson, D. P., & Traveling, B. P. (2019). *Mathematics of Operations Research Budgeted Prize-Collecting Traveling Salesman and Minimum Spanning Tree Problems Budgeted Prize-Collecting Traveling Salesman and Minimum Spanning Tree Problems*. December.
- Peker, I., Baki, B., Tanyas, M., & Murat, I. (2016). Logistics center site selection by ANP / BOCR analysis : A case study of Turkey. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 30, 2383–2396. <https://doi.org/10.3233/IFS-152007>
- Perea, F., Puerto, J., & Fernández, F. R. (2009). Modeling cooperation on a class of distribution problems. *European Journal of Operational Research*, 198(3), 726–733. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.09.042>
- Peterson, M., & Chervit, P. (1991). *Routing Problems Computational Approaches to Stochastic Vehicle Routing Problems Dimitris Bertsimas (WP#3285-91-MSA)*.

- Pham, D. T., Dimov, S. S., & Nguyen, C. D. (2005). Selection of K in K-means clustering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1), 103–119. <https://doi.org/10.1243/095440605X8298>
- Pichka, K., Bajgiran, A. H., Petering, M. E. H., Jang, J., & Yue, X. (2018). The two echelon open location routing problem: Mathematical model and hybrid heuristic. *Computers and Industrial Engineering*, 121(May), 97–112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.010>
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015>
- Piqueras, Y. (2002). *TESIS DOCTORAL Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW*.
- Pop, P. C. (2020). The generalized minimum spanning tree problem: An overview of formulations, solution procedures and latest advances. *European Journal of Operational Research*, 283(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.05.017>
- Pourhossein, F. (2014). *An Inventory Routing Problem with Cross-Docking*.
- Prodhon, C. (2011). A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.021>
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Raguseo, E. (2018). Big data technologies: An empirical investigation on their adoption, benefits and risks for companies. *International Journal of Information Management*, 38(1), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.07.008>
- Reddy, R. H., Kumar, S. K., Fernandes, K. J., & Tiwari, M. K. (2017). A Multi-Agent System based simulation approach for planning procurement operations and scheduling with multiple cross-docks. *Computers and Industrial Engineering*, 107, 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.008>

- Rei, W., Gendreau, M., & Soriano, P. (2010). A Hybrid Monte Carlo Local Branching Algorithm for the Single Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Transportation Science*, 44(1), 136–146. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0295>
- Reiman, M. I., Rubio, R., & Wein, L. M. (1999). Heavy Traffic Analysis of the Dynamic Stochastic Inventory-Routing Problem. *Transportation Science*, 33, 361–380. <https://doi.org/10.1287/trsc.33.4.361>
- Ren, S., Chan, H. L., & Siqin, T. (2020). Demand forecasting in retail operations for fashionable products: methods, practices, and real case study. *Annals of Operations Research*, 291(1–2), 761–777. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03148-8>
- Renaud, J., Boctor, F. F., & Laporte, G. (1996). An Improved Petal Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 47(2), 329–336.
- Rivera, L., Sheffi, Y., & Knoppen, D. (2016). Logistics clusters: The impact of further agglomeration, training and firm size on collaboration and value added services. *International Journal of Production Economics*, 179, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.018>
- Rocha, L. B., González, E. C., & Orjuela, J. A. (2011). Una Revisión al Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos: Evolución Histórica Y Métodos De Solución. *Ingeniería*, 16(2), 35–55.
- Roosbeh Nia, A., Hemmati Far, M., & Akhavan Niaki, S. T. (2014). A fuzzy vendor managed inventory of multi-item economic order quantity model under shortage: An ant colony optimization algorithm. *International Journal of Production Economics*, 155, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.017>
- Ross, A., & Jayaraman, V. (2008). An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.001>
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2006a). *The handbook of Logistics and Distribution Management*.
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2006b). *The handbook of Logistics and Distribution Management*.

- Ryzin, G. Van, & Bertsimas, D. J. (1991). *Stochastic and Dynamic Vehicle Routing with General Demand and Interarrival Time Distributions*.
- Sadeghi, J., Mousavi, S. M., & Niaki, S. T. A. (2016). Optimizing an inventory model with fuzzy demand, backordering, and discount using a hybrid imperialist competitive algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 40(15–16), 7318–7335.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.03.013>
- Sadeghi, J., Sadeghi, S., & Niaki, S. T. A. (2014). Optimizing a hybrid vendor-managed inventory and transportation problem with fuzzy demand: An improved particle swarm optimization algorithm. *Information Sciences*, 272, 126–144.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.075>
- Sadjady, H., & Davoudpour, H. (2012). Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. *Computers and Operations Research*, 39(7), 1345–1354. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.003>
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q., & Barbosa-póvoa, A. P. D. F. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.002>
- Santos, F. A., Mateus, G. R., & Salles da Cunha, A. (2011). A Branch-and-price algorithm for a Vehicle Routing Problem with Cross-Docking. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 37, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2011.05.043>
- Saxena, H., Aponte, O., & McConky, K. T. (2019). A hybrid machine learning model for forecasting a billing period's peak electric load days. *International Journal of Forecasting*, 35(4), 1288–1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.03.025>
- Schimchi-Levi, D., Chen, X., & Bramel, J. (1997). The logic of logistics. In *Springer Series in Operations Research* (p. 296).
- Scott, C. C. C. C., Lundgren, H., & Thompson, P. (2011). Guide to supply chain management. In *Springer*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17676-0>

- Scott, C., Lundgren, H., & Thompson, P. (2011). Guide to supply chain management. In *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17676-0>
- Selva, G., & Incae, D. A. De. (2009). *La industria 3PL en Centroamérica*. INCAE Business Review.
- Serrano, C., Moral, J., Delorme, X., & Dolgui, A. (2016). Cross-docking Operation Scheduling: Truck Arrivals, Shop-Floor Activities and Truck Departures. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1353–1358. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.751>
- Shalini, & Singh, D. (2018). Comparative Analysis of Clustering Techniques for Customer Behaviour. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 584, 753–763. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5699-4_71
- Shan, L., Wang, X., Zhang, Z., & Chen, Z. (2016). *Management & Engineering Systematic Analysis and Research on Logistics Network*. 24. <https://doi.org/10.5503/J.ME.2016.24.017>
- Shao, J., Sun, Y., & Noche, B. (2015). *Optimization of Integrated Supply Chain Planning under Multiple Uncertainty*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47250-7>
- Sherif, S. U., Asokan, P., Sasikumar, P., Mathiyazhagan, K., & Jerald, J. (2021). Integrated optimization of transportation, inventory and vehicle routing with simultaneous pickup and delivery in two-echelon green supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125434>
- Shi, W., Liu, Z., Shang, J., & Cui, Y. (2013). Multi-criteria robust design of a JIT-based cross-docking distribution center for an auto parts supply chain. *European Journal of Operational Research*, 229(3), 695–706. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.013>
- Shu, J., Li, Z., Shen, H., Wu, T., & Zhong, W. (2012). A logistics network design model with vendor managed inventory. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 754–761. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.10.008>
- Sindhuchao, S., Romeijn, H. E., Akçali, E., & Boondiskulchok, R. (2005). An integrated inventory-routing system for multi-item joint replenishment with limited vehicle capacity. *Journal of Global Optimization*, 32(Dmi), 93–118. <https://doi.org/10.1007/s10898-004-5908-0>

- Sivarajah, U., Kamal, M. M., Irani, Z., & Weerakkody, V. (2017). Critical analysis of Big Data challenges and analytical methods. *Journal of Business Research*, 70, 263–286.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.08.001>
- ŠKERLIČ, S., MUHA, R., & Transportu, P. (2016). Identifying Warehouse Location Using Hierarchical Clustering. *Transport Problems*, 11(3), 121–129.
<https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.3.12>
- Song, J.-H., & Savelsbergh, M. (2007). Performance Measurement for Inventory Routing. *Transportation Science*, 41(1), 44–54. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0175>
- Sprengel, D. C., & Busch, T. (2011). *Stakeholder Engagement and Environmental Strategy – the Case of Climate Change*. 364(July 2010), 351–364.
- Stadtler, H., & Kilger, C. (2008a). Supply Chain Analysis. In *Supply chain management and advanced planning Concepts, Models, Software, and Case Studies*.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-74512-9>
- Stadtler, H., & Kilger, C. (Eds.). (2008b). *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, models, software and cases studies* (4^o). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74512-9>
- Stålhane, M., Andersson, H., Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2014). Vendor managed inventory in tramp shipping. *Omega*, 47, 60–72.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.03.004>
- Stewart, W., Golden, B., & Gheysens, F. (1982). A survey of stochastic vehicle routing. In *IEEE*.
- Stinson, M., Auld, J., & Mohammadian, A. K. (2020). A large-scale, agent-based simulation of metropolitan freight movements with passenger and freight market interactions. *Procedia Computer Science*, 170, 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.157>
- Sumrit, D. (2020). Supplier selection for vendor-managed inventory in healthcare using fuzzy multi-criteria decision-making approach. *Decision Science Letters*, 9(2), 233–256.
<https://doi.org/10.5267/j.dsl.2019.10.002>

- Tan, K. C., Cheong, C. Y., & Goh, C. K. (2007). Solving multiobjective vehicle routing problem with stochastic demand via evolutionary computation. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 813–839. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.029>
- Tangpong, C., Hung, K. T., & Li, J. (2014). Agent-system co-development in supply chain research: Propositions and demonstrative findings. *Journal of Operations Management*, 32(4), 154–174. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.03.002>
- Taylor, G. et al. (2008). *Logistics Engineering Handbook*.
- Thanh, P. N., Bostel, N., & Péton, O. (2008). A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 678–693. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.017>
- Tillman, F. (1969). The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands. *Transportation Science*, 3, 192–204.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Toth, Paolo Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem* (P. Hammer, Ed.). SIAM.
- Trudeau, P., & Dror, M. (1992). Stochastic Inventory Routing: Route Design with Stockouts and Route Failures. *Transportation Science*, 26(3), 171–184. <https://doi.org/10.1287/trsc.26.3.171>
- Ullrich, C. A. (2013). Issues in Supply Chain Scheduling. In *Springer Gabler* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), 827–846. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.01.005>
- Villada, F., Muñoz, N., & García, E. (2012). Aplicación de las Redes Neuronales al Pronóstico de Precios en el Mercado de Valores. *Informacion Tecnologica*, 23(4), 11–20. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000400003>
- Viswanathan, S., & Mathur, K. (1997). Integrating Routing and Inventory Decisions in One-Warehouse Multiretailer Multiproduct Distribution Systems. *Management Science*, 43(3), 294–312. <https://doi.org/10.1287/mnsc.43.3.294>

- Vitasek, K. (2013). *TERMS AND GLOSSARY SUPPLY CHAIN MANAGEMENT*. Kate Vitasek. http://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf
- Wang, Y. Y., Assogba, K., Liu, Y., Ma, X., Xu, M., & Wang, Y. Y. (2018). Two-echelon location-routing optimization with time windows based on customer clustering. *Expert Systems with Applications*, *104*, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.018>
- Xiao, N., & Rao, Y. L. (2016). Multi-product multi-period inventory routing optimization with time window constrains. *International Journal of Simulation Modelling*, *15*(2), 352–364. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)CO8](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)CO8)
- Xu, H., Liu, Z. Z., & Zhang, S. H. (2012). A strategic analysis of dual-channel supply chain design with price and delivery lead time considerations. *International Journal of Production Economics*, *139*(2), 654–663. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.014>
- Yang, J. (2017). *A Model study of Logistics Distribution Location and Route Optimization Based on Progressive Coverage and Minimum Envelopment Clustering Model*. *32*, 647–651.
- Yang, W., Mathur, K., & Ballou, R. H. (2000). Stochastic vehicle routing problem with restocking. *Transportation Science* © 2000 INFORMS, *34*(1), 99–112. <https://doi.org/0041-1655/00/3401-0099>
- Yener, F., & Yazgan, H. R. (2019). Optimal warehouse design: Literature review and case study application. *Computers and Industrial Engineering*, *129*(February 2017), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.006>
- Yildiz, H., Ravi, R., & Fairey, W. (2010). Integrated optimization of customer and supplier logistics at Robert Bosch LLC. *European Journal of Operational Research*, *207*(1), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.03.044>
- Yu, V. F., Jewpanya, P., & Redi, A. A. N. P. (n.d.). *A Simulated Annealing Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Cross-docking*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07287-6>
- Yu, V. F., Jewpanya, P., & Redi, A. A. N. P. (2016). Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers & Industrial Engineering*, *94*, 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.018>

- Yu, Y., Chu, C., Chen, H., & Chu, F. (2012). Large scale stochastic inventory routing problems with split delivery and service level constraints. *Annals of Operations Research*, *197*, 135–158. <https://doi.org/10.1007/s10479-010-0772-4>
- Yu, Y., Hong, Z., Zhang, L. L., Liang, L., & Chu, C. (2013). Optimal selection of retailers for a manufacturing vendor in a vendor managed inventory system. *European Journal of Operational Research*, *225*(2), 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.044>
- Yu, Y., Yu, C., Xu, G., Zhong, R. Y., & Huang, G. Q. (2020). An operation synchronization model for distribution center in E-commerce logistics service. *Advanced Engineering Informatics*, *43*(January 2019), 101014. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101014>
- Zanjirani, R., Rezapour, S., Drezner, T., & Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design : An overview of classifications , models , solution techniques and applications. *Omega*, *45*, 92–118. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>
- Zhang, R. Q., Wang, M., & Pan, X. (2019). New model of the storage location assignment problem considering demand correlation pattern. *Computers and Industrial Engineering*, *129*(December 2018), 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.027>
- Zhang, S., Lee, C. K. M., Wu, K., & Choy, K. L. (2016). Multi-objective optimization for sustainable supply chain network design considering multiple distribution channels. *Expert Systems with Applications*, *65*, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.037>
- Zhang, Y., Qi, M., Miao, L., & Liu, E. (2014). Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *70*, 305–323. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.07.010>
- Zhou, H., Shou, Y., Zhai, X., Li, L., Wood, C., & Wu, X. (2014). Supply chain practice and information quality: A supply chain strategy study. *International Journal of Production Economics*, *147*(PART C), 624–633. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.08.025>
- Zhuge, D., Yu, S., Zhen, L., & Wang, W. (2016). Multi-period distribution center location and scale decision in supply chain network. *Computers and Industrial Engineering*, *101*, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.001>
- Zsidisin, G. A., & Ritchie, B. (Eds.). (2009). *SUPPLY CHAIN RISK. A Handbook of Assessment, Management, and Performance*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79933-9>

10. APÉNDICES

Apéndice A. Imagen de la Base de Datos Original (2020)

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|--------|---------------|--------|-----------------|------------------------|------------|-------------|------------------|----------------------|---|--------|-----------|--------------|----------------|--|-------|
| | PEDIDO SISLOG | LINEAS | DIVISION/PEDIDO | CONCATENADO PEDIDO SAP | PEDIDO SAP | PROPIETARIO | SITUACION/PEDIDO | CANAL | COD CLIENTE | TIENDA | DIRECCION | COD ARTICULO | ARTICULO | REFERENCIA | GRUPO |
| 351744 | 12494241 | 0 | 0 | 08004571180457135 | 78526 | EX | CORPORA1578425 | ITELCA | CL 94 # 47-25 | | | 3004047 | MODEM HUAWI | MODEM HUAWI WIFI E5573 | MODEM |
| 351758 | 12494255 | 1 | 0 | 08004571480457149 | 78526 | EX | CORPORA1757058 | AGENCIA DE ADUANAS I | CR 42 # 67 A-191 LOCAL 108 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351759 | 12494255 | 0 | 0 | 08004571480457149 | 78526 | EX | CORPORA1757058 | AGENCIA DE ADUANAS I | CR 42 # 67 A-191 LOCAL 108 | | | 3004047 | MODEM HUAWI | MODEM HUAWI WIFI E5573 | MODEM |
| 351760 | 12494256 | 0 | 0 | 08004571180457150 | 78526 | EX | CORPORA1808232 | CASA HERMES LTDA | CRA 17 NO 36-23 CENTRO | | | 3004089 | IPHONE 7 JET B | IPHONE 7 JET BLACK 128GB-LAE HANDSET | |
| 351761 | 12494257 | 0 | 0 | 08004571180457151 | 78526 | EX | CORPORA1567022 | CASALIMPIA S.A. | AVENIDA EL DORADO NO. 100 BIS - 70 | | | 3003601 | MOTOROLA MC | MOTOROLA MOTO G 8GB 2DA G HANDSET | |
| 351762 | 12494257 | 1 | 0 | 08004571180457151 | 78526 | EX | CORPORA1567022 | CASALIMPIA S.A. | AVENIDA EL DORADO NO. 100 BIS - 70 | | | 3003676 | HUAWEI P8 LIT | HUAWEI P8 LITE LTE HANDSET | |
| 351763 | 12494258 | 0 | 0 | 08004571180457154 | 78526 | EX | CORPORA1777741 | EXTREME TCHONOLOGI | CALLE 88 NO. 44-74 | | | 3003534 | CHIP M2M PRE | CHIP M2M PREPAGO ICCID JASP SIM CARD | |
| 351764 | 12494268 | 0 | 0 | 08004571180457152 | 78529 | EX | DISTRIBU1586187 | COMUNICACIONES MOI | CL 73 # VIA 40 - 350 LOCAL 2 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351766 | 12368497-10 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | ILEANA DE CASTRO | VIA 40 NO. 73-290, CENTRO EMPRESARIAL MIX | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351767 | 12368497-21 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | CARLOS MENDOZA | CALLE 34 NO. 27-75 PBX: (7) 634 8000 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351768 | 12368497-20 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | CARLOS MENDOZA | CALLE 34 NO. 27-75 PBX: (7) 634 8000 | | | 3004075 | LENOVO VIBE E | LENOVO VIBE B LTE DUAL SIM B HANDSET | |
| 351769 | 12368497-31 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | EDUARDO TELLO | DIAGONAL 75 BIS NO. 20-37 PBX: (1) 325 5200 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351770 | 12368497-30 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | EDUARDO TELLO | DIAGONAL 75 BIS NO. 20-37 PBX: (1) 325 5200 | | | 3004075 | LENOVO VIBE E | LENOVO VIBE B LTE DUAL SIM B HANDSET | |
| 351771 | 12368497-40 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | EDUARDO TELLO | DIAGONAL 75 BIS NO. 20-37 PBX: (1) 325 5200 | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351774 | 12368497-70 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | IJON WAINER SOLARTE | AV. 5 NORTE NO. 23AN-35 PBX: (2) 485 4242 | | | 3004075 | LENOVO VIBE E | LENOVO VIBE B LTE DUAL SIM B HANDSET | |
| 351775 | 12368497-60 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | IJON WAINER SOLARTE | AV. 5 NORTE NO. 23AN-35 PBX: (2) 485 4242 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351776 | 12368497-61 | 0 | 0 | 08004553180455319 | 78378 | EX | CORPORA1508169 | IJON WAINER SOLARTE | AV. 5 NORTE NO. 23AN-35 PBX: (2) 485 4242 | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351777 | 12368499-10 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | DIEGO VALENCIA | AV CRA 9 N 104 A - 38 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351778 | 12368499-11 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | DIEGO VALENCIA | AV CRA 9 N 104 A - 38 | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351779 | 12368499-21 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | LORENA MONTERO PAD | CENTRO COMERCIAL RONDA REAL LOCAL 2128 | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351780 | 12368499-20 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | LORENA MONTERO PAD | CENTRO COMERCIAL RONDA REAL LOCAL 2128 | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351781 | 12368499-30 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | ADRIANA ECHEVERRY | CALLE 24 AN # 6 AN- 41 BARRIO: SANTA MONIC | | | 3003324 | CHIP PRE FCBK | CHIP PRE FCBK FVENCE LTE TRIC SIM CARD | |
| 351782 | 12368499-31 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | ADRIANA ECHEVERRY | CALLE 24 AN # 6 AN- 41 BARRIO: SANTA MONIC | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |
| 351783 | 12368499-41 | 0 | 0 | 08004553280455320 | 78378 | EX | CORPORA1519924 | ALEYDA ZARAZA | CARRERA 37 # 53 - 50 | | | 3004053 | HUAWEI Y5 II D | HUAWEI Y5 II DUAL SIM LTE BLA HANDSET | |

Fuente. ERP operador logístico

Apéndice B. Técnica de Pareto

| Ciudad Priorizada | Porcentaje de priorización | Tipo de instalación recomendada |
|--------------------------|-----------------------------------|--|
| BOGOTA | 14% | <i>Cross-Docking</i> |
| CARTAGENA | 9% | CEDI |
| CALI | 8% | <i>Cross-Docking</i> |
| PEREIRA | 8% | Almacén Intermedio |
| MEDELLIN | 7% | <i>Cross-Docking</i> |
| BARRANQUILLA | 7% | <i>Cross-Docking</i> |
| SANTA MARTA | 7% | CEDI |
| BELLO | 7% | CEDI |
| BUCARAMANGA | 6% | CEDI |
| CUCUTA | 6% | CEDI |
| VILLAVICENCIO | 5% | Almacén Intermedio |
| IBAGUE | 4% | Almacén Intermedio |
| VALLEDUPAR | 4% | Almacén Intermedio |
| MONTERIA | 4% | Almacén Intermedio |
| SINCELEJO | 3% | Almacén Intermedio |

Apéndice C. Cálculos de AHP

Cálculo del vector de prioridades

| A - wrt AHP priorities - or B? | | | Equal | How much more? |
|--------------------------------|---|--|------------------------------------|--|
| 1 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Barranquilla | <input type="radio"/> Distancia_Buenaventura | <input checked="" type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 2 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Barranquilla | <input type="radio"/> No_Zonas_Francas | <input type="radio"/> 1 | <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 3 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Barranquilla | <input type="radio"/> PIB | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 4 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Barranquilla | <input type="radio"/> Porc_Impuestos | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input checked="" type="radio"/> 9 |
| 5 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Barranquilla | <input type="radio"/> No_Habitantes | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 6 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Buenaventura | <input type="radio"/> No_Zonas_Francas | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 7 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Buenaventura | <input type="radio"/> PIB | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input checked="" type="radio"/> 9 |
| 8 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Buenaventura | <input type="radio"/> Porc_Impuestos | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input checked="" type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 9 | <input checked="" type="radio"/> Distancia_Buenaventura | <input type="radio"/> No_Habitantes | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input checked="" type="radio"/> 9 |
| 10 | <input checked="" type="radio"/> No_Zonas_Francas | <input type="radio"/> PIB | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 11 | <input checked="" type="radio"/> No_Zonas_Francas | <input type="radio"/> Porc_Impuestos | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 12 | <input checked="" type="radio"/> No_Zonas_Francas | <input type="radio"/> No_Habitantes | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 13 | <input checked="" type="radio"/> PIB | <input type="radio"/> Porc_Impuestos | <input type="radio"/> 1 | <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 14 | <input checked="" type="radio"/> PIB | <input type="radio"/> No_Habitantes | <input type="radio"/> 1 | <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |
| 15 | <input checked="" type="radio"/> Porc_Impuestos | <input type="radio"/> No_Habitantes | <input type="radio"/> 1 | <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9 |

CR = 3.5% OK

dec. comma

Resultados vector prioridades

| Cat | Priority | Rank | (+) | (-) |
|--------------------------|----------|------|-------|-------|
| 1 Distancia_Barranquilla | 31.5% | 2 | 5.0% | 5.0% |
| 2 Distancia_Buenaventura | 37.4% | 1 | 11.8% | 11.8% |
| 3 No_Zonas_Francas | 18.0% | 3 | 6.0% | 6.0% |
| 4 PIB | 6.0% | 4 | 2.1% | 2.1% |
| 5 Porc_Impuestos | 4.1% | 5 | 1.1% | 1.1% |
| 6 No_Habitantes | 3.0% | 6 | 0.9% | 0.9% |

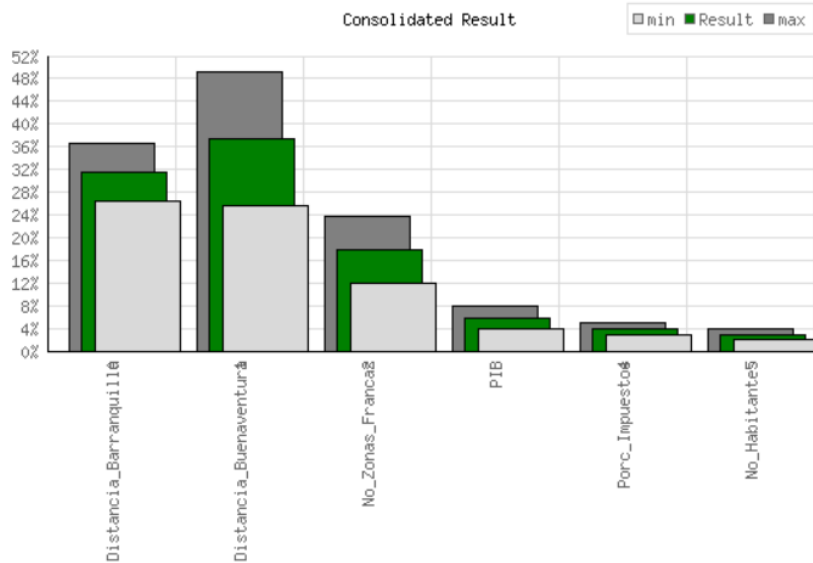
Matriz de decisión

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1.00 | 2.00 | 5.00 | 9.00 | 8.00 |
| 2 | 1.00 | 1 | 3.00 | 9.00 | 7.00 | 9.00 |
| 3 | 0.50 | 0.33 | 1 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 4 | 0.20 | 0.11 | 0.20 | 1 | 2.00 | 3.00 |
| 5 | 0.11 | 0.14 | 0.20 | 0.50 | 1 | 2.00 |
| 6 | 0.12 | 0.11 | 0.20 | 0.33 | 0.50 | 1 |

Gráfico de resultados consolidados

Number of comparisons = 15
 Consistency Ratio CR = 3.5%

Principal eigen value = 6.221
 Eigenvector solution: 5 iterations, delta = 1.8E-8



Fuente. Goepel, K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487, <https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>

Matriz de Alternativas

| | DIST B/VRA | DIST B/QUILLA | No. ZONAS FRANCAS | PIB | % IMPUESTOS | No. HAB |
|--------------------|------------|---------------|-------------------|---------|-------------|---------|
| BOGOTA | 0,04550 | 0,10917 | 0,20000 | 0,27246 | 0,08606 | 0,39779 |
| MEDELLIN | 0,04164 | 0,07620 | 0,06667 | 0,15541 | 0,07331 | 0,13260 |
| CALI | 0,01041 | 0,13629 | 0,10000 | 0,10326 | 0,08127 | 0,09945 |
| BARRANQUILLA | 0,11720 | 0,00000 | 0,10000 | 0,04659 | 0,08367 | 0,06077 |
| CARTAGENA | 0,09791 | 0,01286 | 0,16667 | 0,03803 | 0,08924 | 0,04972 |
| BUCARAMANGA | 0,07251 | 0,06409 | 0,03333 | 0,06461 | 0,13068 | 0,02762 |
| SANTA MARTA | 0,11308 | 0,01124 | 0,10000 | 0,01497 | 0,04303 | 0,02762 |
| MONTERIA | 0,07763 | 0,03815 | 0,00000 | 0,01903 | 0,05339 | 0,02210 |
| CUCUTA | 0,08956 | 0,07393 | 0,03333 | 0,01713 | 0,04781 | 0,03315 |
| SINCELEJO | 0,08355 | 0,02562 | 0,00000 | 0,00918 | 0,04622 | 0,01657 |
| IBAGUE | 0,02800 | 0,10917 | 0,00000 | 0,02312 | 0,05976 | 0,02762 |
| VALLEDUPAR | 0,10428 | 0,03253 | 0,00000 | 0,02241 | 0,02709 | 0,02762 |
| VILLAVICENCIO | 0,05349 | 0,12170 | 0,00000 | 0,04108 | 0,03028 | 0,02762 |
| BELLO | 0,04245 | 0,07501 | 0,06667 | 0,15541 | 0,07331 | 0,02762 |
| PEREIRA | 0,02279 | 0,11403 | 0,13333 | 0,01731 | 0,07490 | 0,02210 |
| VECTOR PRIORIDADES | 0,374 | 0,315 | 0,18 | 0,06 | 0,041 | 0,03000 |

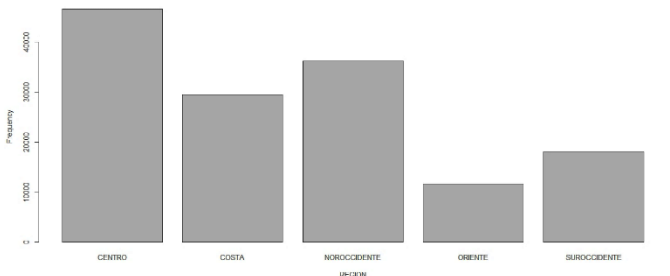
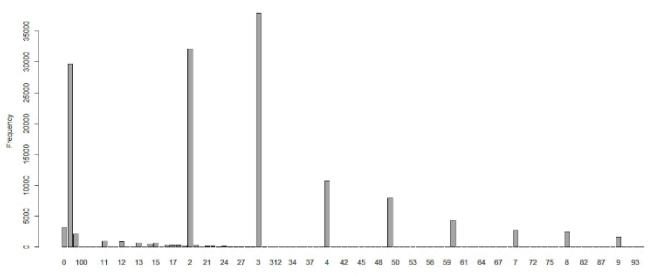
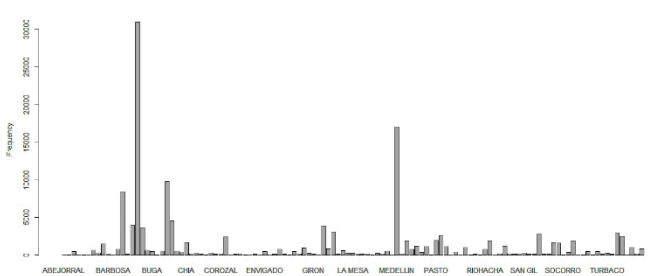
Fuente. Elaboración propia

Matriz de Priorización

| | DIST B/VRA | DIST B/QUILLA | No. ZONAS FRANCAS | PIB | % IMPUESTOS | No. HAB | TOTAL |
|---------------|------------|---------------|-------------------|-------|-------------|---------|-------|
| BOGOTA | 0,017 | 0,034 | 0,036 | 0,016 | 0,004 | 0,012 | 0,119 |
| MEDELLIN | 0,016 | 0,024 | 0,012 | 0,009 | 0,003 | 0,004 | 0,068 |
| CALI | 0,004 | 0,043 | 0,018 | 0,006 | 0,003 | 0,003 | 0,077 |
| BARRANQUILLA | 0,044 | 0,000 | 0,018 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,070 |
| CARTAGENA | 0,037 | 0,004 | 0,030 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,078 |
| BUCARAMANGA | 0,027 | 0,020 | 0,006 | 0,004 | 0,005 | 0,001 | 0,063 |
| SANTA MARTA | 0,042 | 0,004 | 0,018 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,067 |
| MONTERIA | 0,029 | 0,012 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,045 |
| CUCUTA | 0,033 | 0,023 | 0,006 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,067 |
| SINCELEJO | 0,031 | 0,008 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,042 |
| IBAGUE | 0,010 | 0,034 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,050 |
| VALLEDUPAR | 0,039 | 0,010 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,053 |
| VILLAVICENCIO | 0,020 | 0,038 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,063 |
| BELLO | 0,016 | 0,024 | 0,012 | 0,009 | 0,003 | 0,001 | 0,065 |
| PEREIRA | 0,009 | 0,036 | 0,024 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,073 |

Fuente. Elaboración propia

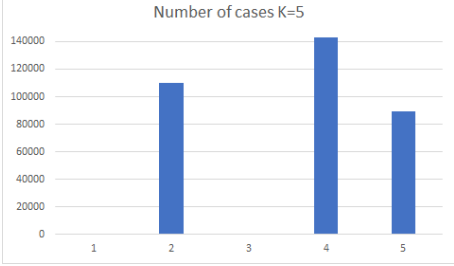
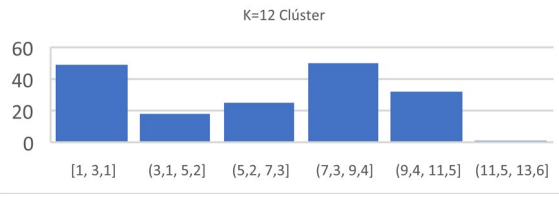
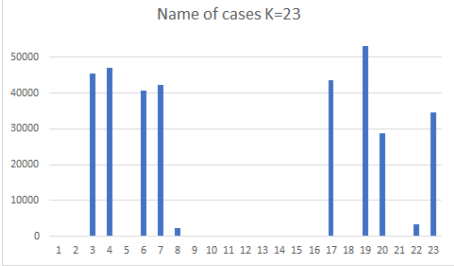
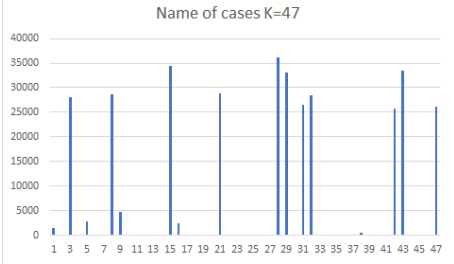
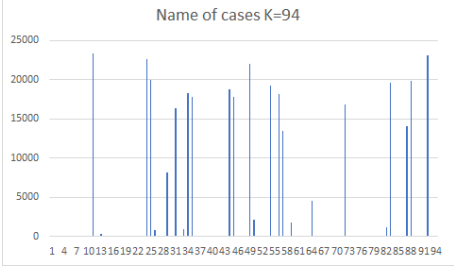
Apéndice D. Análisis Estadístico de Datos de Entrada

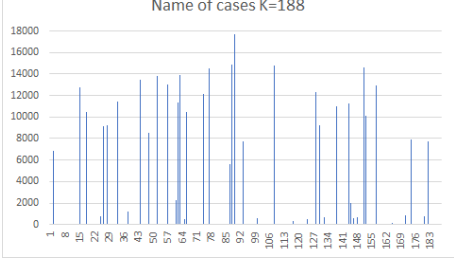
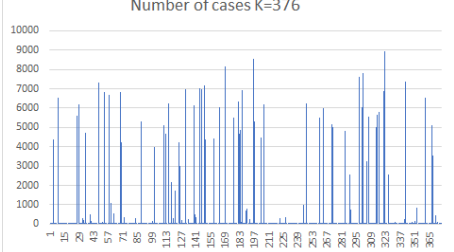
| Frecuencias | Gráfico |
|---|--|
| <p>Región: representa las regiones en las que está dividido el país para efecto de entrega de productos.</p> <p>Centro: 46643 Costo: 29459 Noroccidente: 36197 Oriente: 11608 Suroccidente: 18016</p> |  |
| <p>Cantidades: representa las cantidades recibidas por los proveedores.</p> <p>1: 29625 2: 32133 3: 37903 4: 10666 5: 7926 6: 4382 Otros productos: 19288</p> |  |
| <p>Ciudad: representa la ciudad de entrega, siendo las principales:</p> <p>Bogotá 30961 Medellín 17054 Cali 9810 Barranquilla 8143 Cartagena 4575 Bello 3963 Otras ciudades 67147</p> |  |

| Frecuencias | Gráfico |
|--|---------|
| <p>Días: representa los días en tránsito de la mercancía</p> <p>1: 82026 2: 19048 3: 34333 4: 1142 5: 1492 Otros: 847</p> | |
| <p>Mes: representa el número de entregas por cada mes de año.</p> <p>Diciembre: 18272 Noviembre: 16965 Abril: 13500 Mayo: 12069 Julio: 11899 Otros: 56260</p> | |
| <p>Representa el tercero transportador.</p> <p>Paquetería 106682 Aliado 3PL 32130 Devoluciones 74 Fallos de envío 3037</p> | |

Fuente. Elaboración a partir de los datos históricos ERP Operador Logístico

Apéndice E. Análisis Clúster

| Descripción | Gráfica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|-----------------|-----------|--------|--------------|---------|--------------|--------|--------------|---------|---------------|--------|----------------|--------|---|--------|---|---|---|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|--------|----|---|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|---|----|--------|----|---|----|---|----|---|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|--------|----|--------|----|--------|----|---|----|--------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|--------|
| <p>Esta gráfica representa 5 centros. Puede observarse que de manera significativa solo se muestran 3 centros.</p> |  <p>Number of cases K=5</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Number of cases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>110,000</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>140,000</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>90,000</td> </tr> </tbody> </table> | Category | Number of cases | 1 | 0 | 2 | 110,000 | 3 | 0 | 4 | 140,000 | 5 | 90,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Category | Number of cases | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 110,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 140,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 90,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Esta gráfica representa 12 centros. Puede observarse que de manera significativa solo se muestran 4 grupos.</p> |  <p>K=12 Clúster</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cluster</th> <th>Number of cases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[1, 3, 1]</td> <td>50,000</td> </tr> <tr> <td>(3, 1, 5, 2)</td> <td>20,000</td> </tr> <tr> <td>(5, 2, 7, 3)</td> <td>25,000</td> </tr> <tr> <td>(7, 3, 9, 4)</td> <td>50,000</td> </tr> <tr> <td>(9, 4, 11, 5)</td> <td>30,000</td> </tr> <tr> <td>(11, 5, 13, 6)</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> | Cluster | Number of cases | [1, 3, 1] | 50,000 | (3, 1, 5, 2) | 20,000 | (5, 2, 7, 3) | 25,000 | (7, 3, 9, 4) | 50,000 | (9, 4, 11, 5) | 30,000 | (11, 5, 13, 6) | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cluster | Number of cases | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| [1, 3, 1] | 50,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (3, 1, 5, 2) | 20,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (5, 2, 7, 3) | 25,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (7, 3, 9, 4) | 50,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (9, 4, 11, 5) | 30,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| (11, 5, 13, 6) | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Esta gráfica representa 23 centros. Puede observarse que de manera significativa solo se muestran 10 grupos.</p> |  <p>Name of cases K=23</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Number of cases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>45,000</td></tr> <tr><td>4</td><td>45,000</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>6</td><td>40,000</td></tr> <tr><td>7</td><td>40,000</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>14</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>0</td></tr> <tr><td>16</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>45,000</td></tr> <tr><td>18</td><td>55,000</td></tr> <tr><td>19</td><td>55,000</td></tr> <tr><td>20</td><td>25,000</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>22</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>35,000</td></tr> </tbody> </table> | Category | Number of cases | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 45,000 | 4 | 45,000 | 5 | 0 | 6 | 40,000 | 7 | 40,000 | 8 | 0 | 9 | 0 | 10 | 0 | 11 | 0 | 12 | 0 | 13 | 0 | 14 | 0 | 15 | 0 | 16 | 0 | 17 | 45,000 | 18 | 55,000 | 19 | 55,000 | 20 | 25,000 | 21 | 0 | 22 | 0 | 23 | 35,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Category | Number of cases | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 45,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 45,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 40,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 40,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 45,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 55,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 55,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 25,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 35,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Esta gráfica representa 47 clústeres. Puede observarse que de manera significativa solo se muestran 16 centros.</p> |  <p>Name of cases K=47</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Number of cases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>14</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>35,000</td></tr> <tr><td>16</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td></tr> <tr><td>18</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td></tr> <tr><td>21</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>22</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td></tr> <tr><td>24</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>0</td></tr> <tr><td>26</td><td>0</td></tr> <tr><td>27</td><td>35,000</td></tr> <tr><td>28</td><td>35,000</td></tr> <tr><td>29</td><td>30,000</td></tr> <tr><td>30</td><td>30,000</td></tr> <tr><td>31</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>32</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>33</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>34</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>35</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>36</td><td>0</td></tr> <tr><td>37</td><td>0</td></tr> <tr><td>38</td><td>0</td></tr> <tr><td>39</td><td>0</td></tr> <tr><td>40</td><td>0</td></tr> <tr><td>41</td><td>0</td></tr> <tr><td>42</td><td>0</td></tr> <tr><td>43</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>44</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>45</td><td>28,000</td></tr> <tr><td>46</td><td>0</td></tr> <tr><td>47</td><td>28,000</td></tr> </tbody> </table> | Category | Number of cases | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 28,000 | 4 | 0 | 5 | 0 | 6 | 0 | 7 | 0 | 8 | 0 | 9 | 0 | 10 | 0 | 11 | 0 | 12 | 0 | 13 | 0 | 14 | 0 | 15 | 35,000 | 16 | 0 | 17 | 0 | 18 | 0 | 19 | 0 | 20 | 0 | 21 | 28,000 | 22 | 0 | 23 | 0 | 24 | 0 | 25 | 0 | 26 | 0 | 27 | 35,000 | 28 | 35,000 | 29 | 30,000 | 30 | 30,000 | 31 | 28,000 | 32 | 28,000 | 33 | 28,000 | 34 | 28,000 | 35 | 28,000 | 36 | 0 | 37 | 0 | 38 | 0 | 39 | 0 | 40 | 0 | 41 | 0 | 42 | 0 | 43 | 28,000 | 44 | 28,000 | 45 | 28,000 | 46 | 0 | 47 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Category | Number of cases | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 35,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 35,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 35,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 30,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 30,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | 28,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Esta gráfica representa 97 clústeres. Se observa una importante disparidad entre la composición de cada centro.</p> |  <p>Name of cases K=94</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category</th> <th>Number of cases</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td></tr> <tr><td>14</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>23,000</td></tr> <tr><td>16</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td></tr> <tr><td>18</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td></tr> <tr><td>21</td><td>0</td></tr> <tr><td>22</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0</td></tr> <tr><td>24</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>0</td></tr> <tr><td>26</td><td>0</td></tr> <tr><td>27</td><td>0</td></tr> <tr><td>28</td><td>0</td></tr> <tr><td>29</td><td>0</td></tr> <tr><td>30</td><td>0</td></tr> <tr><td>31</td><td>0</td></tr> <tr><td>32</td><td>0</td></tr> <tr><td>33</td><td>0</td></tr> <tr><td>34</td><td>0</td></tr> <tr><td>35</td><td>0</td></tr> <tr><td>36</td><td>0</td></tr> <tr><td>37</td><td>0</td></tr> <tr><td>38</td><td>0</td></tr> <tr><td>39</td><td>0</td></tr> <tr><td>40</td><td>0</td></tr> <tr><td>41</td><td>0</td></tr> <tr><td>42</td><td>0</td></tr> <tr><td>43</td><td>0</td></tr> <tr><td>44</td><td>0</td></tr> <tr><td>45</td><td>0</td></tr> <tr><td>46</td><td>0</td></tr> <tr><td>47</td><td>0</td></tr> <tr><td>48</td><td>0</td></tr> <tr><td>49</td><td>0</td></tr> <tr><td>50</td><td>0</td></tr> <tr><td>51</td><td>0</td></tr> <tr><td>52</td><td>0</td></tr> <tr><td>53</td><td>0</td></tr> <tr><td>54</td><td>0</td></tr> <tr><td>55</td><td>0</td></tr> <tr><td>56</td><td>0</td></tr> <tr><td>57</td><td>0</td></tr> <tr><td>58</td><td>0</td></tr> <tr><td>59</td><td>0</td></tr> <tr><td>60</td><td>0</td></tr> <tr><td>61</td><td>0</td></tr> <tr><td>62</td><td>0</td></tr> <tr><td>63</td><td>0</td></tr> <tr><td>64</td><td>0</td></tr> <tr><td>65</td><td>0</td></tr> <tr><td>66</td><td>0</td></tr> <tr><td>67</td><td>0</td></tr> <tr><td>68</td><td>0</td></tr> <tr><td>69</td><td>0</td></tr> <tr><td>70</td><td>0</td></tr> <tr><td>71</td><td>0</td></tr> <tr><td>72</td><td>0</td></tr> <tr><td>73</td><td>0</td></tr> <tr><td>74</td><td>0</td></tr> <tr><td>75</td><td>0</td></tr> <tr><td>76</td><td>0</td></tr> <tr><td>77</td><td>0</td></tr> <tr><td>78</td><td>0</td></tr> <tr><td>79</td><td>0</td></tr> <tr><td>80</td><td>0</td></tr> <tr><td>81</td><td>0</td></tr> <tr><td>82</td><td>0</td></tr> <tr><td>83</td><td>0</td></tr> <tr><td>84</td><td>0</td></tr> <tr><td>85</td><td>0</td></tr> <tr><td>86</td><td>0</td></tr> <tr><td>87</td><td>0</td></tr> <tr><td>88</td><td>0</td></tr> <tr><td>89</td><td>0</td></tr> <tr><td>90</td><td>0</td></tr> <tr><td>91</td><td>0</td></tr> <tr><td>92</td><td>0</td></tr> <tr><td>93</td><td>0</td></tr> <tr><td>94</td><td>23,000</td></tr> </tbody> </table> | Category | Number of cases | 1 | 0 | 2 | 0 | 3 | 0 | 4 | 0 | 5 | 0 | 6 | 0 | 7 | 0 | 8 | 0 | 9 | 0 | 10 | 0 | 11 | 0 | 12 | 0 | 13 | 0 | 14 | 0 | 15 | 23,000 | 16 | 0 | 17 | 0 | 18 | 0 | 19 | 0 | 20 | 0 | 21 | 0 | 22 | 0 | 23 | 0 | 24 | 0 | 25 | 0 | 26 | 0 | 27 | 0 | 28 | 0 | 29 | 0 | 30 | 0 | 31 | 0 | 32 | 0 | 33 | 0 | 34 | 0 | 35 | 0 | 36 | 0 | 37 | 0 | 38 | 0 | 39 | 0 | 40 | 0 | 41 | 0 | 42 | 0 | 43 | 0 | 44 | 0 | 45 | 0 | 46 | 0 | 47 | 0 | 48 | 0 | 49 | 0 | 50 | 0 | 51 | 0 | 52 | 0 | 53 | 0 | 54 | 0 | 55 | 0 | 56 | 0 | 57 | 0 | 58 | 0 | 59 | 0 | 60 | 0 | 61 | 0 | 62 | 0 | 63 | 0 | 64 | 0 | 65 | 0 | 66 | 0 | 67 | 0 | 68 | 0 | 69 | 0 | 70 | 0 | 71 | 0 | 72 | 0 | 73 | 0 | 74 | 0 | 75 | 0 | 76 | 0 | 77 | 0 | 78 | 0 | 79 | 0 | 80 | 0 | 81 | 0 | 82 | 0 | 83 | 0 | 84 | 0 | 85 | 0 | 86 | 0 | 87 | 0 | 88 | 0 | 89 | 0 | 90 | 0 | 91 | 0 | 92 | 0 | 93 | 0 | 94 | 23,000 |
| Category | Number of cases | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 23,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 39 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 41 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 42 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 49 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 51 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 53 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 57 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 59 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 60 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 62 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 64 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 66 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 67 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 69 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 73 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 74 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 77 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 84 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 85 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 87 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 88 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 89 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 90 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 91 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 92 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 93 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 94 | 23,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Descripción | Gráfica |
|---|--|
| <p>Esta gráfica representa 188 clústeres. Para elegir este número de centros se tomaron $\frac{k}{2}$ donde k= 376 clúster.</p> |  |
| <p>Esta gráfica representa 376 clústeres, que corresponde a $k = \sqrt{n}$ donde n=141376 que corresponde al número de registros de la base de datos depurada.</p> |  |

Apéndice F. Conformación de Clústeres $k=12$

| Clúster 1 | Clúster 2 | Clúster 3 | Clúster 4 | Clúster 5 | Clúster 6 | Clúster 7 | Clúster 8 | Clúster 9 | Clúster 10 | Clúster 11 | Clúster 12 |
|---------------------|---------------|------------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------|----------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------|
| ANSERMA | ACACIAS | SAN ANDRES | AGUACHICA | AGUSTIN CODAZZI | ALGARROBO | IPIALES | BARANCABERMEJA | ABEJORRAL | APARTADO | BUENAVENTURA | ARAUCA |
| ARMENIA | AGUA DE DIOS | | CUCUTA | DIBULLA | ARIONA | PASTO | BUCARAMANGA | AMAGA | CERETE | BUGA | |
| CALARCA | ANAPOIMA | | CURUMANI | FONSECA | BARANOA | TUMACO | CHARALA | ANDES | CHINU | CALI | |
| CARTAGO | BOGOTA | | EL BANCO | GUAJIRA | BARRANQUILLA | TUQUERRES | DUITAMA | BARBOSA | CORDOBA | CANDELARIA | |
| CHINCHINA | BRICEÑO | | LOS PATIOS | MAICAO | BAYUNCA | | FLORIDABLANCA | BELEN | CORDOZAL | FLORENCIA | |
| DOS QUEBRADAS | CAJICA | | OCAÑA | RIOHACHA | BOSCONIA | | GIRON | BELLO | EL CARMEN DE BOLIVAR | JAMUNDI | |
| IBAGUE | CHIA | | PAMPLONA | SAN JUAN DEL CESAR | CARTAGENA | | LEBRIJA | CALDAS | LORICA | NEIVA | |
| LA UNION | CHIQUINQUIRA | | PUERTO WILCHES | VALLEDUPAR | CIENAGA | | LOS SANTOS | CIUDAD BOLIVAR | MAGANGUE | PALMIRA | |
| LA VIRGINIA | CHOACHI | | SAN ALBERTO | | FUNDACION | | PIEDECUESTA | COPACABANA | MONTELIBANO | PIENDAMO | |
| MANIZALES | COGUÁ | | VILLA DEL ROSARIO | | GALAPA | | SAN GIL | DON MATIAS | MONTERIA | POPAYAN | |
| MIRANDA | COTA | | | | MALAMBO | | SANTANDER | EL CARMEN DE VIBORAL | PLANETA RICA | PUERTO TEJADA | |
| PENSILVANIA | CUCUNUBA | | | | PIVIJAY | | SOCORRO | EL RETIRO | SAHAGUN | SANTANDER DE QUILICHAO | |
| PEREIRA | FACATATIVA | | | | PLATO | | SOGAMOSO | EL SANTUARIO | SAN MARCOS | TIMANA | |
| RIOSUCIO | FUNZA | | | | PUERTO COLOMBIA | | TUNJA | ENVIGADO | SINCELEJO | VILLA RICA | |
| SANTA ROSA DE CABAL | FUSAGASUGA | | | | SABANAGRANDE | | YONDO | FRESNO | TOLU | YUMBO | |
| TORO | GIRARDOT | | | | SABANALARGA | | YOPAL | GIRARDOTA | TURBO | | |
| TULLA | LA CALERA | | | | SABANAS DE SAN ANGEL | | | GUARNE | | | |
| VILLAMARIA | LA DORADA | | | | SANTA MARTA | | | ITAGUI | | | |
| | LA MESA | | | | SANTO TOMAS | | | JERICO | | | |
| | MADRID | | | | SOLEDAD | | | LA CEJA | | | |
| | MOSQUERA | | | | TURBACO | | | LA ESTRELLA | | | |
| | SIBATE | | | | | | | MARINILLA | | | |
| | SOACHA | | | | | | | MEDELLIN | | | |
| | TABIO | | | | | | | MONTEBELLO | | | |
| | TENJO | | | | | | | REMEDIOS | | | |
| | TOCANCIPA | | | | | | | RIONEGRO | | | |
| | USATAMA | | | | | | | SABANETA | | | |
| | VILLAVICENCIO | | | | | | | SAN ANTONIO DE PRADO | | | |
| | ZIPAQUIRA | | | | | | | SONSON | | | |
| | | | | | | | | TARSO | | | |
| | | | | | | | | TITIRIBI | | | |
| | | | | | | | | YARUMAL | | | |
| | | | | | | | | YOLOMBO | | | |

Apéndice G. Procedimiento de la Conformación de los Centroides

Centroide 1. Dosquebradas, Risaralda

| Etiquetas de f | Promedio de I | Promedio de | Promedio de | Suma de Costo mercancía | clúster de | per Dij |
|------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------------|------------|-------------------|
| ANSERMA | 2 | 5,2 | -75,8 | 7660000 | 1,00 | 0,39 |
| ARMENIA | 1 | 4,5 | -75,7 | 6920720000 | 1,00 | 0,32 |
| CALARCA | 2 | 4,5 | -75,6 | 255000 | 1,00 | 0,33 |
| CARTAGO | 2 | 4,7 | -75,9 | 1496300000 | 1,00 | 0,16 |
| CHINCHINA | 1 | 5,0 | -75,6 | 3350000 | 1,00 | 0,13 |
| DOS QUEBRAI | 3 | 4,8 | -75,7 | 287440000 | 1,00 | 0,02 |
| IBAGUE | 1 | 4,4 | -75,2 | 16529650000 | 1,00 | 0,63 |
| LA UNION | 3 | 4,8 | -76,0 | 278955000 | 1,00 | 0,19 |
| LA VIRGINIA | 3 | 4,9 | -75,9 | 236075000 | 1,00 | 0,07 |
| MANIZALES | 1 | 5,1 | -75,5 | 5852560000 | 1,00 | 0,24 |
| MIRANDA | 3 | 5,3 | -75,5 | 20000 | 1,00 | 0,46 |
| PENSILVANIA | 3 | 5,4 | -75,2 | 250000 | 1,00 | 0,80 |
| PEREIRA | 1 | 4,8 | -75,7 | 10357180000 | 1,00 | 0,04 |
| RIOSUCIO | 2 | 5,4 | -75,7 | 100000 | 1,00 | 0,56 |
| SANTA ROSA I | 3 | 4,9 | -75,6 | 2210000 | 1,00 | 0,02 |
| TORO | 4 | 4,6 | -76,1 | 510000 | 1,00 | 0,40 |
| TULUA | 2 | 4,1 | -76,2 | 1505660000 | 1,00 | 1,04 |
| VILLAMARIA | 2 | 5,0 | -75,5 | 7475000,00 | 1,00 | 0,21 |
| CENTROIDE | | 4,85676293 | -75,684927 | DOSQUEBRADAS | | 6,03658925 |

Centroide 2. Cota, Cundinamarca

| Etiquetas de f | Promedio de I | Promedio de L | Promedio de LON | Suma de Costo mercancía | clúster de | parte | Dij |
|---------------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------------------|-------------|-------|--------------|
| ACACIAS | 2 | 4,0 | -73,8 | 114750000 | 2 | | 0,86 |
| AGUA DE DIO: | 4 | 4,4 | -74,7 | 1530000 | 2 | | 0,67 |
| ANAPOIMA | 2 | 4,6 | -74,5 | 87185000 | 2 | | 0,46 |
| BOGOTA | 1 | 4,8 | -74,0 | 204766340000 | 2 | | 0,07 |
| BRICEÑO | 2 | 5,0 | -74,0 | 15000 | 2 | | 0,27 |
| CAJICA | 2 | 4,9 | -74,0 | 146755000 | 2 | | 0,18 |
| CHIA | 1 | 4,9 | -74,0 | 5579735000 | 2 | | 0,13 |
| CHIQUINQUIF | 2 | 5,6 | -73,8 | 507585000 | 2 | | 0,90 |
| CHOACHI | 2 | 4,5 | -73,9 | 255000 | 2 | | 0,31 |
| COGUA | 2 | 5,1 | -74,0 | 10000 | 2 | | 0,33 |
| COTA | 2 | 4,8 | -74,1 | 14830000 | 2 | | 0,04 |
| CUCUNUBA | 8 | 5,3 | -73,8 | 510000 | 2 | | 0,60 |
| FACATATIVA | 1 | 4,7 | -74,1 | 1770155000 | 2 | | 0,12 |
| FUNZA | 2 | 4,7 | -74,2 | 218780000 | 2 | | 0,10 |
| FUSAGASUGA | 1 | 4,3 | -74,4 | 939880000 | 2 | | 0,50 |
| GIRARDOT | 1 | 4,3 | -74,8 | 1502880000 | 2 | | 0,82 |
| LA CALERA | 1 | 4,7 | -74,0 | 255000 | 2 | | 0,16 |
| LA DORADA | 2 | 5,5 | -74,7 | 12100000 | 2 | | 0,89 |
| LA MESA | 2 | 4,6 | -74,5 | 388165000 | 2 | | 0,37 |
| MADRID | 2 | 4,7 | -74,3 | 105665000 | 2 | | 0,15 |
| MOSQUERA | 1 | 4,7 | -74,2 | 2338325000 | 2 | | 0,11 |
| SIBATE | 2 | 4,5 | -74,3 | 765000 | 2 | | 0,31 |
| SOACHA | 1 | 4,6 | -74,2 | 9107045000 | 2 | | 0,20 |
| TABIO | 1 | 4,9 | -74,1 | 765000 | 2 | | 0,15 |
| TENJO | 2 | 4,9 | -74,1 | 10000 | 2 | | 0,11 |
| TOCANCIPA | 2 | 5,0 | -73,9 | 5560000 | 2 | | 0,29 |
| USATAMA | 4 | 4,3 | -74,4 | 255000 | 2 | | 0,48 |
| VILLAVICENCI | 1 | 4,4 | -73,6 | 13715610000 | 2 | | 0,60 |
| ZIPAQUIRA | 1 | 5,0 | -74,0 | 1498385000 | 2 | | 0,29 |
| centroide | | 4,765344447 | -74,12160419 | | COTA | | 10,47 |
| MIN | | 3,9859619 | -74,80361278 | | | | |
| MAX | | 5,614775 | -73,6342573 | | | | |

Centroide 3. San Andrés

| Etiquetas de fila | Promedio de DIAS DE TRANSITO | Promedio de LATITUD CORRE | Promedio de LONG CORREG | Suma de Costo mercancía | clúster de pertenencia |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| SAN ANDRES | 3 | 12,6 | -81,7 | 1791470000 | 3 |

Centroide 4. Ábrego, Norte de Santander

| Etiquetas de fila | Promedio de DIAS DE TRANSITO | Promedio de LATITUD CORRE | Promedio de LONG CORREG | Suma de Costo mercancía | clúster de pertenencia | Dij |
|-------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| AGUACHICA | 5 | 8,3 | -73,6 | 1906280000 | 4 | 0,47 |
| CUCUTA | 2 | 7,9 | -72,5 | 16818800000 | 4 | 0,73 |
| CURUMANI | 3 | 9,2 | -73,5 | 20000 | 4 | 1,20 |
| EL BANCO | 3 | 9,0 | -74,0 | 157725000 | 4 | 1,22 |
| LOS PATIOS | 2 | 7,8 | -72,5 | 1455000 | 4 | 0,75 |
| OCAÑA | 3 | 8,3 | -73,4 | 1466555000 | 4 | 0,24 |
| PAMPLONA | 5 | 7,4 | -72,7 | 334870000 | 4 | 0,88 |
| PUERTO WILCHES | 6 | 7,3 | -73,9 | 108040000 | 4 | 0,99 |
| SAN ALBERTO | 4 | 7,8 | -73,4 | 276800000 | 4 | 0,34 |
| VILLA DEL ROSARIO | 3 | 7,8 | -72,5 | 1360000 | 4 | 0,77 |
| CENTROIDE | | 8,0515 | -73,2129 | | suma | 7,599599888 |
| MIN | | 7,33875 | -73,973864 | | | |
| MAX | | 9,201062 | -72,4696897 | ÁBREGO | | |

Centroide 5. San Juan de Cesar, Guajira

| Etiquetas de fila | Promedio de I | Promedio de I | Promedio de L | Suma de Cost | clúster de per | Dij |
|--------------------|---------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| AGUSTIN CODAZZI | 5 | 10,0 | -73,2 | 8400000 | 5 | 0,88 |
| DIBULLA | 4 | 11,3 | -73,3 | 50000 | 5 | 0,48 |
| FONSECA | 3 | 10,9 | -72,9 | 15000 | 5 | 0,17 |
| GUAJIRA | 3 | 11,3 | -73,6 | 600000 | 5 | 0,64 |
| MAICAO | 4 | 11,4 | -72,2 | 573440000 | 5 | 0,91 |
| RIOHACHA | 3 | 11,5 | -72,9 | 6989405000 | 5 | 0,65 |
| SAN JUAN DEL CESAR | 5 | 10,8 | -73,0 | 159615000 | 5 | 0,12 |
| VALLEDUPAR | 3 | 10,5 | -73,2 | 1,5325E+10 | 5 | 0,47 |
| centroide | | 10,8917742 | -73,0202681 | | Suma | 4,33724632 |
| min | | 10,0358984 | -73,5511065 | | San Juan de Cesar, Guajira | |
| max | | 11,5384151 | -72,2476668 | | | |

Centroide 6. Santo Tomás, Atlántico

| Etiquetas de fila | Promedio de I | Promedio de I | Promedio de I | Suma de Cost | clúster de | Dij |
|----------------------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|------------|-------------------|
| ALGARROBO | 3 | 10,1 | -74,3 | 1200000 | 6 | 0,826 |
| ARJONA | 5 | 10,3 | -75,3 | 437250000 | 6 | 0,757 |
| BARANOA | 4 | 10,8 | -74,9 | 320075000 | 6 | 0,149 |
| BARRANQUILLA | 3 | 11,0 | -74,8 | 6,0737E+10 | 6 | 0,208 |
| BAYUNCA | 4 | 10,5 | -75,4 | 2065000 | 6 | 0,658 |
| BOSCONIA | 3 | 10,0 | -73,9 | 6055000 | 6 | 1,179 |
| CARTAGENA | 3 | 10,4 | -75,5 | 3,7311E+10 | 6 | 0,791 |
| CIENAGA | 3 | 11,0 | -74,2 | 1489610000 | 6 | 0,585 |
| FUNDACION | 3 | 10,5 | -74,2 | 416080000 | 6 | 0,633 |
| GALAPA | 5 | 10,9 | -74,9 | 275380000 | 6 | 0,186 |
| MALAMBO | 3 | 10,9 | -74,8 | 333620000 | 6 | 0,102 |
| PIVIJAY | 3 | 10,5 | -74,6 | 103515000 | 6 | 0,329 |
| PLATO | 3 | 9,8 | -74,8 | 186425000 | 6 | 0,950 |
| PUERTO COLOMBIA | 3 | 11,0 | -75,0 | 146905000 | 6 | 0,306 |
| SABANAGRANDE | 3 | 10,8 | -74,8 | 9050000 | 6 | 0,020 |
| SABANALARGA | 4 | 10,6 | -74,9 | 368670000 | 6 | 0,189 |
| SABANAS DE SAN ANGEL | 4 | 10,0 | -74,2 | 600000 | 6 | 0,912 |
| SANTA MARTA | 3 | 11,2 | -74,2 | 2,2531E+10 | 6 | 0,753 |
| SANTO TOMAS | 3 | 10,8 | -74,8 | 224315000 | 6 | 0,022 |
| SOLEDAD | 3 | 10,9 | -74,8 | 9266385000 | 6 | 0,168 |
| TURBACO | 3 | 10,3 | -75,4 | 357885000 | 6 | 0,762 |
| centroide | | 10,7506049 | -74,7747911 | | | 10,4850487 |
| min | | 9,8008124 | -75,4794257 | Sto Tomás, Atlántico | | |
| max | | 11,2485001 | -73,890531 | | | |

Centroide 7. Túquerres, Nariño

| Etiquetas de fila | Promedio de I | Promedio de L | Promedio de LO | Suma de Cost | clúster de pertenencia |
|-------------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|------------------------|
| IPIALES | 3 | 0,8 | -77,6 | 2853580000 | 7 |
| PASTO | 3 | 1,2 | -77,3 | 8265395000 | 7 |
| TUMACO | 5 | 1,8 | -78,8 | 167355000 | 7 |
| TUQUERRES | 4 | 1,1 | -77,6 | 225265000 | 7 |
| | | 1,0857 | -77,6186 | TUQUERRES | 1,981 |
| min | | 0,8358 | -78,7913 | | |
| max | | 1,7874 | -77,2804 | | |

Centroide 8. San Gil, Santander

| Etiquetas de fila | Promedio de I | Promedio de L | Promedio de LO | Suma de Cost | clúster de pertenencia |
|-------------------|---------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------------|
| BARRANCABERMEJA | 2 | 7,1 | -73,9 | 4769775000 | 8 |
| BUCARAMANGA | 1 | 7,1 | -73,1 | 2,5273E+10 | 8 |
| CHARALA | 4 | 6,3 | -73,1 | 505000 | 8 |
| DUITAMA | 2 | 5,8 | -73,0 | 1201275000 | 8 |
| FLORIDABLANCA | 2 | 7,1 | -73,1 | 1927905000 | 8 |
| GIRON | 2 | 7,1 | -73,2 | 268385000 | 8 |
| LEBRIJA | 4 | 7,1 | -73,2 | 2130000 | 8 |
| LOS SANTOS | 2 | 6,8 | -73,1 | 1850000 | 8 |
| PIEDRECUESTA | 2 | 7,0 | -73,1 | 3889700000 | 8 |
| SAN GIL | 2 | 6,6 | -73,1 | 1529185000 | 8 |
| SANTANDER | 4 | 6,6 | -73,7 | 1805000 | 8 |
| SOCORRO | 4 | 6,5 | -73,3 | 86300000 | 8 |
| SOGAMOSO | 1 | 5,7 | -72,9 | 811670000 | 8 |
| TUNJA | 1 | 5,5 | -73,4 | 3188685000 | 8 |
| YONDO | 4 | 7,0 | -73,9 | 2410000 | 8 |
| YOPAL | 2 | 5,3 | -72,4 | 2311145000 | 8 |
| CENTROIDE | | 6,65167909 | -73,2021644 | SUMATORIA | 9,47921823 |
| MIN | | 5,3398 | -73,9101 | SAN GIL | |
| MAX | | 7,1193 | -72,3865 | | |

Centroide 9. Valle de Aburrá, Antioquia

| Etiquetas de fila | Promedio de | Promedio de | Promedio de | Suma de Cost | ter de pertene | Dij |
|----------------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|------------------------|--------------|
| ABEJORRAL | 4 | 5,79 | -75,43 | 80500000 | 9 | 0,40 |
| AMAGA | 2 | 6,04 | -75,70 | 255000 | 9 | 0,20 |
| ANDES | 2 | 5,66 | -75,88 | 44570000 | 9 | 0,60 |
| BARBOSA | 1 | 6,32 | -74,91 | 45575000 | 9 | 0,66 |
| BELEN | 2 | 6,23 | -75,60 | 241525000 | 9 | 0,08 |
| BELLO | 2 | 6,34 | -75,54 | 1,204E+10 | 9 | 0,17 |
| CALDAS | 3 | 6,09 | -75,63 | 876630000 | 9 | 0,11 |
| CIUDAD BOLIVAR | 3 | 5,85 | -76,02 | 23850000 | 9 | 0,56 |
| COPACABANA | 3 | 6,36 | -75,51 | 470465000 | 9 | 0,20 |
| DON MATIAS | 4 | 6,49 | -75,39 | 32515000 | 9 | 0,36 |
| EL CARMEN DE VIBORAL | 2 | 6,08 | -75,34 | 27500000 | 9 | 0,24 |
| EL RETIRO | 3 | 6,06 | -75,50 | 240360000 | 9 | 0,12 |
| EL SANTUARIO | 4 | 6,14 | -75,26 | 67770000 | 9 | 0,29 |
| ENVIGADO | 2 | 6,17 | -75,59 | 1715190000 | 9 | 0,03 |
| FRESNO | 3 | 7,20 | -75,34 | 30000 | 9 | 1,05 |
| GIRARDOTA | 2 | 6,38 | -75,45 | 336085000 | 9 | 0,24 |
| GUARNE | 1 | 6,28 | -75,44 | 74625000 | 9 | 0,16 |
| ITAGUI | 1 | 6,17 | -75,61 | 5945180000 | 9 | 0,06 |
| JERICO | 3 | 5,79 | -75,79 | 255000 | 9 | 0,44 |
| LA CEJA | 2 | 6,03 | -75,43 | 933560000 | 9 | 0,18 |
| LA ESTRELLA | 3 | 6,16 | -75,64 | 403715000 | 9 | 0,09 |
| MARINILLA | 3 | 6,17 | -75,34 | 68220000 | 9 | 0,22 |
| MEDELLIN | 1 | 6,24 | -75,58 | 8,4024E+10 | 9 | 0,08 |
| MONTEBELLO | 4 | 5,95 | -75,52 | 250000 | 9 | 0,22 |
| REMEDIOS | 3 | 7,03 | -74,69 | 10000 | 9 | 1,22 |
| RIONEGRO | 2 | 6,15 | -75,38 | 4146590000 | 9 | 0,18 |
| SABANETA | 3 | 6,16 | -75,61 | 5431595000 | 9 | 0,05 |
| SAN ANTONIO DE PRADO | 2 | 6,18 | -75,65 | 298840000 | 9 | 0,09 |
| SONSON | 3 | 5,71 | -75,31 | 43850000 | 9 | 0,52 |
| TARSO | 3 | 5,86 | -75,82 | 15000 | 9 | 0,40 |
| TITIRIBI | 3 | 6,06 | -75,79 | 255000 | 9 | 0,26 |
| YARUMAL | 2 | 6,96 | -75,42 | 35600000 | 9 | 0,81 |
| YOLOMBO | 3 | 6,60 | -75,01 | 665000 | 9 | 0,69 |
| CENTROIDE | | 6,1680 | -75,5562 | | | 10,97 |
| MIN | | 5,6564955 | -76,0218469 | | Valle de aburrá | |
| MAX | | 7,1986064 | -74,692965 | | | |

Centroide 10. Sahagún, Córdoba

| Etiquetas de fila | Promedio de DIAS DE TRANSITO | Promedio de LATITUD CORRE | Promedio de LONG CORREG | Suma de Costo mercancía | clúster de pertenencia | Dij |
|----------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| APARTADO | 3 | 7,9 | -76,6 | 3500900000 | 10 | 1,64 |
| CERETE | 3 | 8,9 | -75,8 | 648720000 | 10 | 0,35 |
| CHINU | 5 | 9,1 | -75,4 | 256400000 | 10 | 0,10 |
| CORDOBA | 3 | 9,6 | -74,8 | 207925000 | 10 | 0,85 |
| COROZAL | 3 | 9,3 | -75,3 | 330325000 | 10 | 0,34 |
| EL CARMEN DE BOLIVAR | 8 | 9,7 | -75,1 | 140115000 | 10 | 0,78 |
| LORICA | 4 | 9,2 | -75,8 | 270415000 | 10 | 0,40 |
| MAGANGUE | 3 | 9,2 | -74,8 | 2954830000 | 10 | 0,74 |
| MONTELIBANO | 8 | 8,0 | -75,4 | 296160000 | 10 | 1,05 |
| MONTERIA | 3 | 8,8 | -75,9 | 22408575000 | 10 | 0,50 |
| PLANETA RICA | 3 | 8,4 | -75,6 | 780080000 | 10 | 0,63 |
| SAHAGUN | 3 | 8,9 | -75,4 | 293090000 | 10 | 0,08 |
| SAN MARCOS | 5 | 8,7 | -75,1 | 216905000 | 10 | 0,49 |
| SINCELEJO | 3 | 9,3 | -75,4 | 19056715000 | 10 | 0,29 |
| TOLU | 3 | 9,5 | -75,6 | 26750000 | 10 | 0,51 |
| TURBO | 4 | 8,1 | -76,7 | 203120000 | 10 | 1,59 |
| centroide | | 9,0286 | -75,4659 | | suma | 10,34 |
| min | | 7,880 | -76,742 | | Sahagún | |
| max | | 9,721 | -74,753 | | | |

Centroide 11. Puerto Tejada, Cauca

| Etiquetas de fila | Prom | Promedio | Promedio | Suma de Coste | er de perten | Dij |
|------------------------|------|----------|----------|---------------|--------------|------|
| BUENAVENTURA | 3 | 3,88 | -77,02 | 1258480000 | 11 | 0,87 |
| BUGA | 2 | 3,90 | -76,30 | 1498995000 | 11 | 0,68 |
| CALI | 1 | 3,45 | -76,53 | 6,2632E+10 | 11 | 0,24 |
| CANDELARIA | 3 | 3,41 | -76,35 | 850000 | 11 | 0,20 |
| FLORENCIA | 2 | 1,61 | -75,61 | 150800000 | 11 | 1,82 |
| JAMUNDI | 2 | 3,26 | -76,54 | 261185000 | 11 | 0,11 |
| NEIVA | 1 | 2,93 | -75,29 | 5480725000 | 11 | 1,18 |
| PALMIRA | 2 | 3,53 | -76,30 | 3779485000 | 11 | 0,32 |
| PIENDAMO | 4 | 2,64 | -76,99 | 38500000 | 11 | 0,81 |
| POPAYAN | 2 | 2,49 | -76,57 | 5637600000 | 11 | 0,76 |
| PUERTO TEJADA | 3 | 3,23 | -76,42 | 217170000 | 11 | 0,01 |
| SANTANDER DE QUILICHAO | 2 | 3,01 | -76,48 | 207305000 | 11 | 0,23 |
| TIMANA | 2 | 1,97 | -75,93 | 255000 | 11 | 1,36 |
| VILLA RICA | 3 | 2,51 | -76,85 | 19295000 | 11 | 0,83 |
| YUMBO | 2 | 3,54 | -76,49 | 312240000 | 11 | 0,31 |
| centroide | | 3,23455 | -76,433 | | suma | 9,74 |
| min | | 1,61497 | -77,02 | | | |
| max | | 3,90051 | -75,29 | | PUERTO TEJAI | |

Centroide 12. Arauca, Arauca

| Etiquetas de f | Promedio de | Promedio de | Promedio de | Suma de Cost | clúster de pertenencia |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|
| ARAUCA | 3 | 6,5 | -71,0 | 12750000 | 12 Arauca |

Apéndice H. Procedimiento de la Red Neuronal

Resumen de procesamiento de casos

| | N | Porcentaje |
|-----------------------|--------|------------|
| Muestra Entrenamiento | 205600 | 60,1% |
| Pruebas | 102621 | 30,0% |
| Reserva | 34069 | 10,0% |
| Válido | 342290 | 100,0% |
| Excluido | 9497 | |
| Total | 351787 | |

Información de red

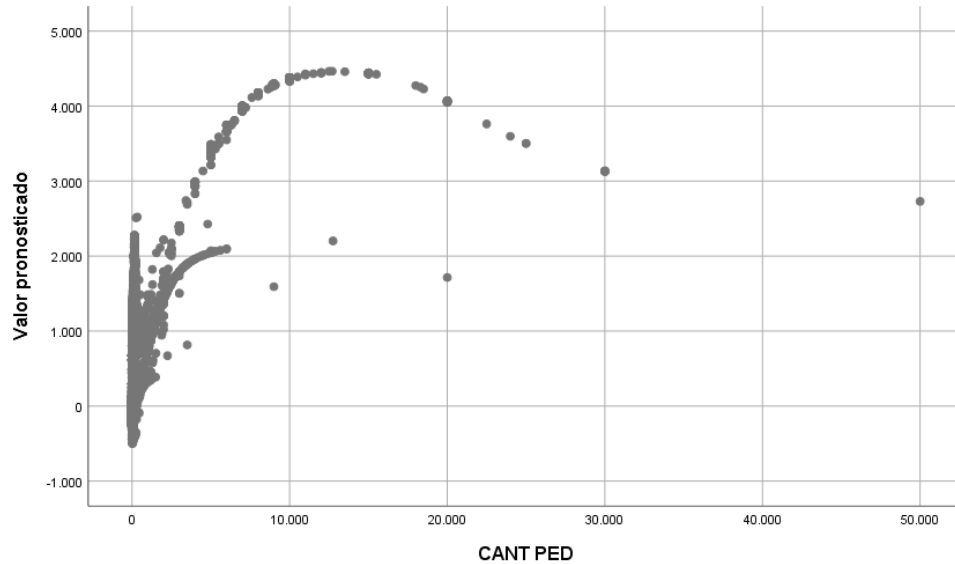
| | | | |
|---|--|--------------------|----------------------|
| Capa de entrada | Factores | 1 | CANAL2 |
| | | 2 | GRUPO2 |
| | | 3 | DIAS DE TRANSITO |
| | Covariables | 1 | ORIGEN |
| | | 2 | COD CLIENTE |
| | | 3 | COD ARTICULO |
| | | 4 | Costo mercancía |
| Número de unidades ^a | | 23 | |
| Método de cambio de escala para las covariables | | Estandarizados | |
| Capas ocultas | Número de capas ocultas | | 1 |
| | Número de unidades en la capa oculta 1 ^a | | 6 |
| | Función de activación | | Tangente hiperbólica |
| Capa de salida | Variables dependientes | 1 | CANT PED |
| | | Número de unidades | |
| | Método de cambio de escala para las dependientes de escala | | Estandarizados |
| | Función de activación | | Identidad |
| | Función de error | | Suma de cuadrados |

a. Se excluye la unidad de sesgo

Resumen del modelo

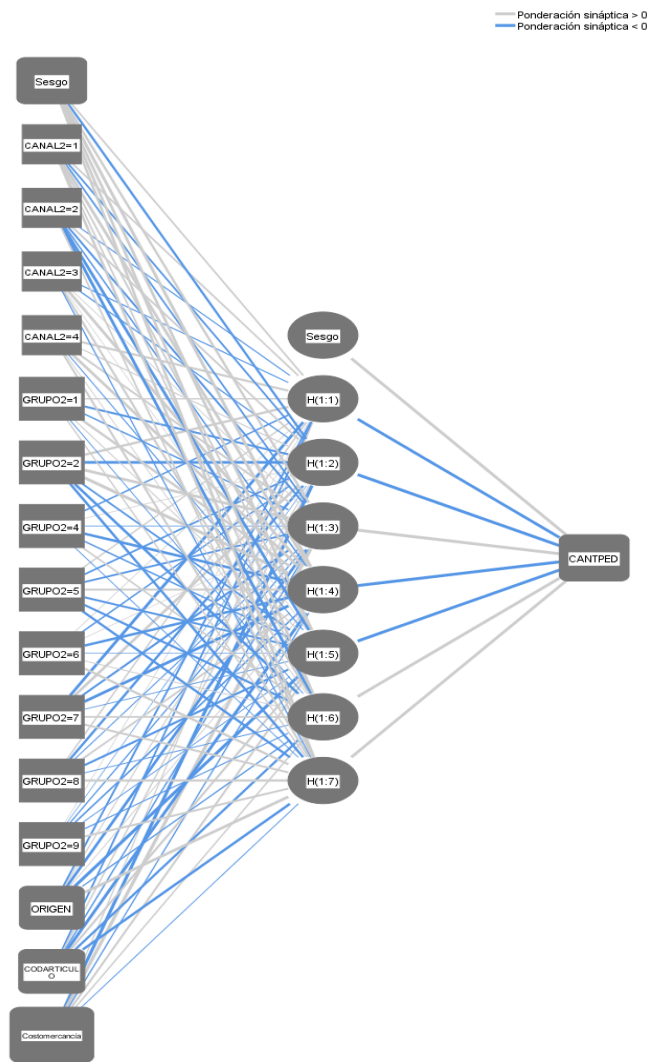
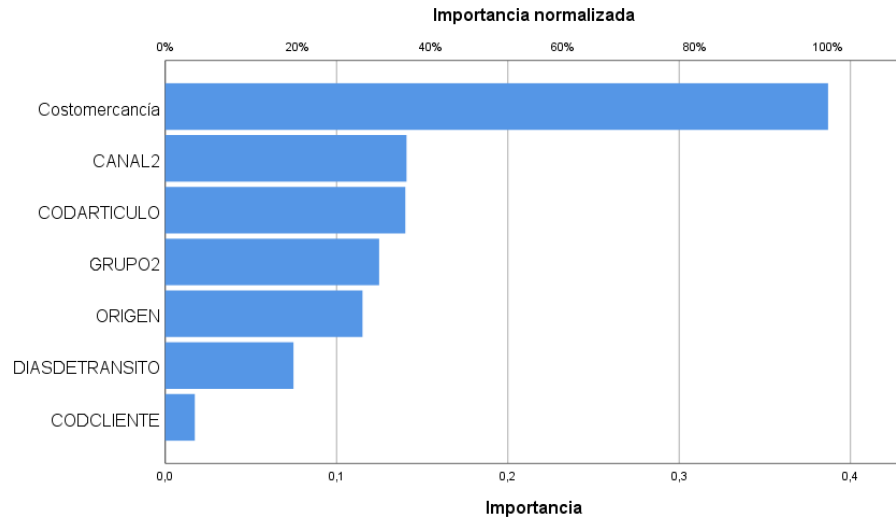
| | | |
|---------------|----------------------------|---|
| Entrenamiento | Error de suma de cuadrados | 54025,172 |
| | Error relativo | ,526 |
| | Regla de parada utilizada | Se ha superado el número máximo de épocas (100) |
| | Tiempo de entrenamiento | 0:00:31,78 |
| Pruebas | Error de suma de cuadrados | 25380,319 |
| | Error relativo | ,525 |
| Reserva | Error relativo | ,579 |

Variable dependiente: CANT PED

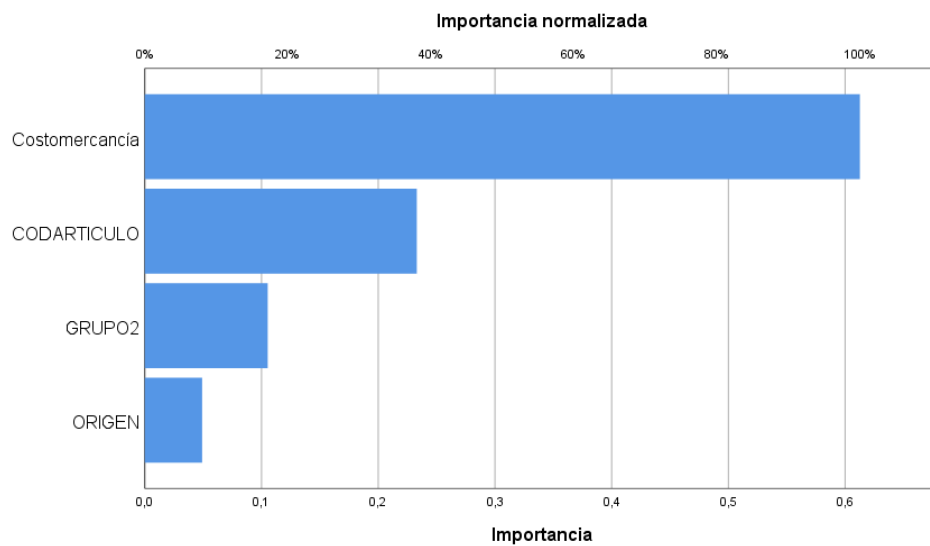
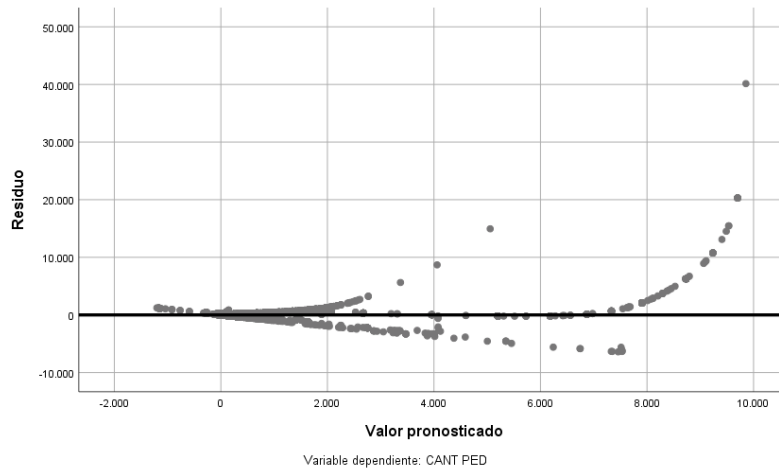
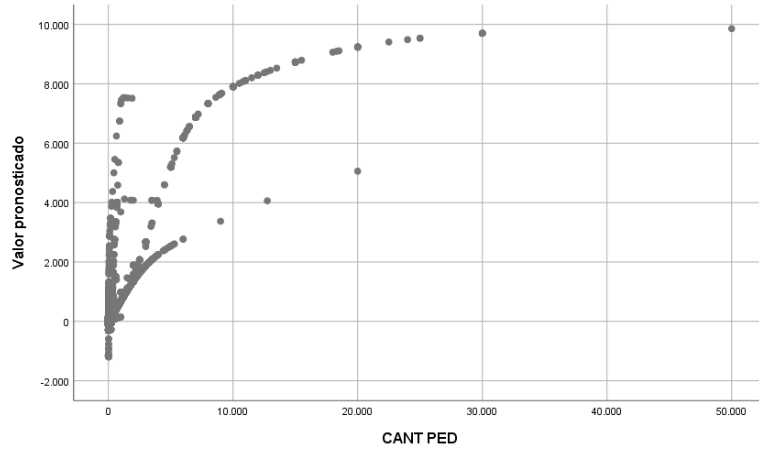


Importancia de las variables independientes

| | Importancia | Importancia normalizada |
|------------------|-------------|-------------------------|
| CANAL2 | ,141 | 36,4% |
| GRUPO2 | ,125 | 32,3% |
| DIAS DE TRANSITO | ,075 | 19,3% |
| ORIGEN | ,115 | 29,8% |
| COD CLIENTE | ,017 | 4,5% |
| COD ARTICULO | ,140 | 36,2% |
| Costo mercancía | ,387 | 100,0% |



Función de activación de capa oculta: Tangente hiperbólica
 Función de activación de capa de salida: Identidad



Apéndice I. Pronóstico para Cada Clúster

$kap_{(INS,p)} = \text{Capacidad de cada } \{INS\} \forall i \in I \wedge h \in H \wedge k \in K \wedge l \in L \text{ en el período } p$
 $\in P$ [unidades agregadas de producto]

total

| | | SEMANAS | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 |
|---------------|--------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| BOGOTA | 39,78% | 462001648177 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 8884647081 | 888 |
| MEDELLIN | 13,26% | 154000549392 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 2961549027 | 296 |
| CALI | 9,94% | 115500412044 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 2221161771 | 222 |
| BARRANQUILLA | 6,08% | 70583585138 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 1357376638 | 135 |
| CARTAGENA | 4,97% | 57750206022 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 1110580886 | 111 |
| BUCARAMANGA | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| SANTA MARTA | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| MONTERIA | 2,21% | 25666758232 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 49 |
| CUCUTA | 3,31% | 38500137348 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 740387257 | 74 |
| SINCELEJO | 1,66% | 19250068674 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 370193629 | 37 |
| IBAGUE | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| VALLEDUPAR | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| VILLAVICENCIO | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| BELLO | 2,76% | 32083447790 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 616989381 | 61 |
| PEREIRA | 2,21% | 25666758232 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 493591505 | 49 |
| Total | | 116142081000 | | | | | | | | | | | |

DEMANDA T 774280540000 Capacidad almac 116142

Apéndice J. Parámetros del Modelo Propuesto

| Parámetro | Valor | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|---------------------------|----|--------------|----|-------------|----|------------------|----|-----------|----|--------------------|----|---------------|----|-----------|----|---------|----|--------------|-----|---------|-----|---------------|-----|--------|
| Subíndices del modelo: <i>Cross-Docking</i> | <table border="1"> <tr> <td>h</td> <td>Cross-Docking</td> </tr> <tr> <td>h1</td> <td>Barranquilla</td> </tr> <tr> <td>h2</td> <td>Bogotá</td> </tr> <tr> <td>h3</td> <td>Cali</td> </tr> <tr> <td>h4</td> <td>Medellín</td> </tr> </table> | h | Cross-Docking | h1 | Barranquilla | h2 | Bogotá | h3 | Cali | h4 | Medellín | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h | Cross-Docking | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h1 | Barranquilla | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h2 | Bogotá | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h3 | Cali | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| h4 | Medellín | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subíndices del modelo: Centros de Distribución | <table border="1"> <tr> <td>k</td> <td>CEDI</td> </tr> <tr> <td>k1</td> <td>Bello</td> </tr> <tr> <td>k2</td> <td>Bucaramanga</td> </tr> <tr> <td>k3</td> <td>Cartagena</td> </tr> <tr> <td>k4</td> <td>Cúcuta</td> </tr> <tr> <td>k5</td> <td>Santa Marta</td> </tr> </table> | k | CEDI | k1 | Bello | k2 | Bucaramanga | k3 | Cartagena | k4 | Cúcuta | k5 | Santa Marta | | | | | | | | | | | | | | |
| k | CEDI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k1 | Bello | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k2 | Bucaramanga | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k3 | Cartagena | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k4 | Cúcuta | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k5 | Santa Marta | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subíndices del modelo: Almacenes intermedios | <table border="1"> <tr> <td>l</td> <td>Almacén Intermedio</td> </tr> <tr> <td>l1</td> <td>Ibagué</td> </tr> <tr> <td>l2</td> <td>Montería</td> </tr> <tr> <td>l3</td> <td>Pereira</td> </tr> <tr> <td>l4</td> <td>Sincelejo</td> </tr> <tr> <td>l5</td> <td>Valledupar</td> </tr> <tr> <td>l6</td> <td>Villavicencio</td> </tr> </table> | l | Almacén Intermedio | l1 | Ibagué | l2 | Montería | l3 | Pereira | l4 | Sincelejo | l5 | Valledupar | l6 | Villavicencio | | | | | | | | | | | | |
| l | Almacén Intermedio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l1 | Ibagué | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l2 | Montería | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l3 | Pereira | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l4 | Sincelejo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l5 | Valledupar | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l6 | Villavicencio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subíndices del modelo: clientes | <table border="1"> <tr> <td>j</td> <td>Clúster</td> </tr> <tr> <td>j1</td> <td>Dosquebradas</td> </tr> <tr> <td>j2</td> <td>Cota</td> </tr> <tr> <td>j3</td> <td>San Andrés Islas</td> </tr> <tr> <td>j4</td> <td>Ábrego</td> </tr> <tr> <td>j5</td> <td>San Juan (Guajira)</td> </tr> <tr> <td>j6</td> <td>Santo Tomás</td> </tr> <tr> <td>j7</td> <td>Túquerres</td> </tr> <tr> <td>j8</td> <td>San Gil</td> </tr> <tr> <td>j9</td> <td>Valle Aburrá</td> </tr> <tr> <td>j10</td> <td>Sahagún</td> </tr> <tr> <td>j11</td> <td>Puerto Tejada</td> </tr> <tr> <td>j12</td> <td>Arauca</td> </tr> </table> | j | Clúster | j1 | Dosquebradas | j2 | Cota | j3 | San Andrés Islas | j4 | Ábrego | j5 | San Juan (Guajira) | j6 | Santo Tomás | j7 | Túquerres | j8 | San Gil | j9 | Valle Aburrá | j10 | Sahagún | j11 | Puerto Tejada | j12 | Arauca |
| j | Clúster | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j1 | Dosquebradas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j2 | Cota | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j3 | San Andrés Islas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j4 | Ábrego | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j5 | San Juan (Guajira) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j6 | Santo Tomás | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j7 | Túquerres | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j8 | San Gil | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j9 | Valle Aburrá | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j10 | Sahagún | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j11 | Puerto Tejada | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j12 | Arauca | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Subíndices del modelo: Período de tiempo | <table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>Período</td> </tr> <tr> <td>p0</td> <td>Año 0</td> </tr> <tr> <td>p1</td> <td>Año 1</td> </tr> <tr> <td>p2</td> <td>Año 2</td> </tr> <tr> <td>p3</td> <td>Año 3</td> </tr> <tr> <td>p4</td> <td>Año 4</td> </tr> <tr> <td>p5</td> <td>Año 5</td> </tr> </table> | p | Período | p0 | Año 0 | p1 | Año 1 | p2 | Año 2 | p3 | Año 3 | p4 | Año 4 | p5 | Año 5 | | | | | | | | | | | | |
| p | Período | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p0 | Año 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p1 | Año 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p2 | Año 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p3 | Año 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p4 | Año 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| p5 | Año 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tipo de vehículo | <table border="1"> <tr> <td>m</td> <td>Tipo de vehículo</td> </tr> <tr> <td>m1</td> <td>FTL</td> </tr> <tr> <td>m2</td> <td>LTL T2</td> </tr> <tr> <td>m3</td> <td>LTL T3</td> </tr> </table> | m | Tipo de vehículo | m1 | FTL | m2 | LTL T2 | m3 | LTL T3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| m | Tipo de vehículo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| m1 | FTL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| m2 | LTL T2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| m3 | LTL T3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Parámetro | Valor | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|--|
| Distancias (origen-destino) | Distancias (Origen-Destino) | Xij | i1 | i2 | h1 | h2 | h3 | h4 | k1 | k2 | k3 | k4 | k5 | l1 | l2 | l3 | l4 | l5 | l6 | j1 | j2 | j3 | j4 | j5 | j6 | j7 | j8 | j9 | j10 | j11 | j12 | | |
| | Puerto Barranquilla | i1 | | | 1 | 1002 | 1145 | 700 | 690 | 641 | 128 | 668 | 100 | 898 | 346 | 928 | 232 | 294 | 1114 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Puerto Buenaventura | i2 | | | 1204 | 518 | 120 | 505 | 514 | 837 | 1158 | 1031 | 1282 | 328 | 909 | 271 | 976 | 1215 | 613 | | | | | | | | | | | | | | |
| | Cross-Docking Barranquilla | h1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 924 | 992 | 3000 | 499 | 349 | 25 | 1712 | 730 | 700 | 279 | 1156 | 943 | | |
| | Cross-Docking Bogotá | h2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 331 | 31 | 3000 | 669 | 914 | 1024 | 835 | 309 | 427 | 815 | 479 | 630 | | |
| | Cross-Docking Cali | h3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 224 | 492 | 3000 | 932 | 1178 | 1123 | 457 | 771 | 452 | 873 | 31 | 1241 | | |
| | Cross-Docking Medellín | h4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 226 | 405 | 3000 | 541 | 786 | 674 | 888 | 480 | 10 | 423 | 458 | 849 | | |
| | CEDI Bello | k1 | | | 692 | 420 | 457 | 12 | | | | | | | 377 | 397 | 240 | 464 | 760 | 532 | 236 | 410 | 3000 | 531 | 777 | 665 | 898 | 471 | 12 | 414 | 468 | 840 | |
| | CEDI Bucaramanga | k2 | | | 642 | 406 | 785 | 391 | | | | | | | 505 | 732 | 555 | 665 | 534 | 516 | 551 | 389 | 3000 | 305 | 551 | 661 | 1238 | 99 | 391 | 712 | 796 | 466 | |
| | CEDI Cartagena | k3 | | | 127 | 1055 | 1100 | 655 | | | | | | | 1020 | 301 | 883 | 187 | 364 | 1166 | 878 | 1044 | 3000 | 569 | 420 | 113 | 1541 | 800 | 655 | 234 | 1067 | 1013 | |
| | CEDI Cúcuta | k4 | | | 668 | 596 | 977 | 583 | | | | | | | 696 | 805 | 747 | 691 | 560 | 706 | 742 | 579 | 3000 | 169 | 577 | 687 | 1428 | 289 | 583 | 738 | 988 | 276 | |
| | CEDI Santa Marta | k5 | | | 100 | 963 | 1231 | 794 | | | | | | | 950 | 440 | 1022 | 326 | 255 | 1075 | 1018 | 953 | 3000 | 460 | 267 | 119 | 1673 | 691 | 794 | 373 | 1242 | 904 | |
| | Almacén Intermedio Ibagué | l1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 139 | 222 | 3000 | 654 | 900 | 1010 | 740 | 500 | 413 | 801 | 287 | 963 | |
| | Almacén Intermedio Montería | l2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 629 | 795 | 3000 | 637 | 487 | 320 | 1292 | 822 | 405 | 69 | 862 | 1081 | |
| | Almacén Intermedio Pereira | l3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4 | 344 | 3000 | 707 | 953 | 906 | 660 | 623 | 235 | 656 | 230 | 1015 | |
| | Almacén Intermedio Sincelejo | l4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 695 | 861 | 3000 | 522 | 372 | 205 | 1357 | 753 | 471 | 50 | 927 | 966 | |
| | Almacén Intermedio Valledupar | l5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 904 | 860 | 3000 | 367 | 56 | 314 | 1581 | 599 | 744 | 364 | 1149 | 812 | |
| Almacén Intermedio Villavicencio | l6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 425 | 141 | 3000 | 779 | 1025 | 1135 | 929 | 420 | 538 | 926 | 573 | 629 | | |
| Demanda (por clúster y por período, agregada en \$COP) | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 | p5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j1 | 4,349 | 4,479 | 4,613 | 4,752 | 4,894 | 5,041 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j2 | 24,28 | 25,01 | 25,76 | 26,53 | 27,33 | 28,15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j3 | 0,179 | 0,185 | 0,19 | 0,196 | 0,202 | 0,208 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j4 | 2,107 | 2,17 | 2,236 | 2,303 | 2,372 | 2,443 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j5 | 2,306 | 2,375 | 2,446 | 2,519 | 2,595 | 2,673 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j6 | 13,45 | 13,86 | 14,27 | 14,7 | 15,14 | 15,59 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j7 | 1,151 | 1,186 | 1,221 | 1,258 | 1,296 | 1,335 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j8 | 4,527 | 4,662 | 4,802 | 4,946 | 5,095 | 5,248 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j9 | 11,77 | 12,12 | 12,48 | 12,86 | 13,24 | 13,64 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j10 | 5,159 | 5,314 | 5,473 | 5,637 | 5,807 | 5,981 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | j11 | 8,149 | 8,394 | 8,646 | 8,905 | 9,172 | 9,447 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| j12 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Capacidad agregada de cada instalación por período | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 | p5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | i1 | 71 | 103,6 | 86,5 | 72,4 | 87,8 | 54,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | i2 | 109,2 | 92,3 | 50,8 | 101,9 | 70,9 | 69,9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h1 | 7,058 | 7,27 | 7,488 | 7,713 | 7,944 | 8,183 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h2 | 46,2 | 47,59 | 49,01 | 50,48 | 52 | 53,56 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h3 | 11,55 | 11,9 | 12,25 | 12,62 | 13 | 13,39 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | h4 | 15,4 | 15,86 | 16,34 | 16,83 | 17,33 | 17,85 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k1 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k2 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k3 | 5,775 | 5,948 | 6,127 | 6,311 | 6,5 | 6,695 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k4 | 3,85 | 3,966 | 4,084 | 4,207 | 4,333 | 4,463 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | k5 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | l1 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | l2 | 2,567 | 2,644 | 2,723 | 2,805 | 2,889 | 2,975 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | l3 | 2,567 | 2,644 | 2,723 | 2,805 | 2,889 | 2,975 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | l4 | 1,925 | 1,983 | 2,042 | 2,104 | 2,167 | 2,232 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l5 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| l6 | 3,208 | 3,305 | 3,404 | 3,506 | 3,611 | 3,719 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Parámetro | Valor | | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|------|------|
| Costo unitario de inventario en las instalaciones (IA) en el periodo p | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 | p5 |
| | k1 | 1090 | 836 | 800 | 1164 | 1822 | 1892 |
| | k2 | 1413 | 1262 | 1663 | 1269 | 1692 | 1726 |
| | k3 | 1637 | 1815 | 1029 | 823 | 1269 | 978 |
| | k4 | 1244 | 672 | 1448 | 135 | 357 | 214 |
| | k5 | 384 | 389 | 977 | 261 | 1393 | 1531 |
| | l1 | 562 | 1111 | 184 | 263 | 1972 | 167 |
| | l2 | 1777 | 1417 | 1366 | 1813 | 138 | 846 |
| | l3 | 1495 | 1037 | 1194 | 188 | 1799 | 1741 |
| | l4 | 1959 | 1909 | 1716 | 284 | 157 | 1614 |
| | l5 | 862 | 700 | 401 | 754 | 225 | 187 |
| | l6 | 543 | 214 | 894 | 1677 | 197 | 298 |
| | Costo unitario de operación en las instalaciones (IO) en el periodo p | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 |
| h1 | | 3245 | 3945 | 7345 | 5285 | 2860 | 4475 |
| h2 | | 1995 | 6155 | 3985 | 3925 | 4790 | 7220 |
| h3 | | 1750 | 3190 | 930 | 6425 | 1540 | 1495 |
| h4 | | 2695 | 1030 | 7475 | 1655 | 2595 | 2075 |
| k1 | | 6300 | 4675 | 7265 | 970 | 2410 | 2435 |
| k2 | | 6155 | 2355 | 4425 | 6110 | 1285 | 5505 |
| k3 | | 4820 | 4795 | 6945 | 4160 | 5300 | 4800 |
| k4 | | 6755 | 7185 | 5070 | 7320 | 6100 | 4655 |
| k5 | | 6765 | 3995 | 5510 | 5120 | 1130 | 3405 |
| l1 | | 1515 | 5640 | 7450 | 2570 | 7460 | 6155 |
| l2 | | 1370 | 3955 | 5265 | 1295 | 6600 | 1225 |
| l3 | | 5355 | 2730 | 3380 | 5585 | 2315 | 7435 |
| l4 | | 2150 | 4860 | 2580 | 6505 | 7195 | 5490 |
| l5 | | 3185 | 915 | 3375 | 785 | 6645 | 935 |
| l6 | | 1910 | 760 | 1660 | 1135 | 6470 | 3250 |
| Tiempo de operación unitario en las instalaciones (IO) | h1 | 1 | | | | | |
| | h2 | 1 | | | | | |
| | h3 | 1 | | | | | |
| | h4 | 1 | | | | | |
| | k1 | 2 | | | | | |
| | k2 | 2 | | | | | |
| | k3 | 2 | | | | | |
| | k4 | 2 | | | | | |
| | k5 | 2 | | | | | |
| | l1 | 3 | | | | | |
| | l2 | 3 | | | | | |
| | l3 | 3 | | | | | |
| | l4 | 3 | | | | | |
| l5 | 3 | | | | | | |
| l6 | 3 | | | | | | |

| Parámetro | Valor | | | | | | |
|--|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tiempo máximo de almacenamiento | k1 | 121 | | | | | |
| | k2 | 162 | | | | | |
| | k3 | 146 | | | | | |
| | k4 | 173 | | | | | |
| | k5 | 158 | | | | | |
| | l1 | 171 | | | | | |
| | l2 | 125 | | | | | |
| | l3 | 187 | | | | | |
| | l4 | 191 | | | | | |
| | l5 | 188 | | | | | |
| | l6 | 169 | | | | | |
| Costo de penalización por unidad no entregada al clúster j en el periodo p | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 | p5 |
| | j1 | 209 | 273 | 233 | 257 | 300 | 296 |
| | j2 | 272 | 175 | 272 | 254 | 243 | 206 |
| | j3 | 150 | 167 | 275 | 234 | 170 | 282 |
| | j4 | 155 | 230 | 192 | 241 | 225 | 245 |
| | j5 | 229 | 289 | 286 | 206 | 152 | 284 |
| | j6 | 227 | 168 | 249 | 156 | 236 | 273 |
| | j7 | 204 | 264 | 236 | 194 | 180 | 253 |
| | j8 | 213 | 157 | 234 | 176 | 257 | 225 |
| | j9 | 239 | 264 | 159 | 243 | 203 | 239 |
| | j10 | 190 | 195 | 265 | 206 | 296 | 198 |
| | j11 | 286 | 185 | 181 | 229 | 159 | 167 |
| | j12 | 189 | 240 | 217 | 155 | 249 | 294 |
| Valor monetario por unidad de tiempo de viaje en p para el vehículo m | | p0 | p1 | p2 | p3 | p4 | p5 |
| | m1 | 132 | 63 | 120 | 78 | 99 | 135 |
| | m2 | 45 | 126 | 108 | 90 | 60 | 111 |
| | m3 | 93 | 117 | 45 | 51 | 36 | 66 |
| Promesa de servicio ofrecida al clúster j | j1 | 1E+06 | | | | | |
| | j2 | 1E+06 | | | | | |
| | j3 | 2E+06 | | | | | |
| | j4 | 3E+06 | | | | | |
| | j5 | 2E+06 | | | | | |
| | j6 | 3E+06 | | | | | |
| | j7 | 4E+06 | | | | | |
| | j8 | 5E+06 | | | | | |
| | j9 | 5E+06 | | | | | |
| | j10 | 4E+06 | | | | | |
| | j11 | 7E+06 | | | | | |
| | j12 | 8E+06 | | | | | |

| Parámetro | Valor | |
|--|-------|-------|
| Nivel de servicio del clúster j | j1 | 0,850 |
| | j2 | 0,860 |
| | j3 | 0,890 |
| | j4 | 0,730 |
| | j5 | 0,940 |
| | j6 | 0,800 |
| | j7 | 0,850 |
| | j8 | 0,980 |
| | j9 | 0,730 |
| | j10 | 0,850 |
| | j11 | 0,820 |
| | j12 | 0,910 |
| Constante para convertir a tiempo por tipo de vehículo m | m1 | 4,011 |
| | m2 | 2,3 |
| | m3 | 2,769 |
| Número de instalaciones permitidas en el horizonte de planeación | h1 | 70 |
| | h2 | 80 |
| | h3 | 13 |
| | h4 | 60 |
| | k1 | 12 |
| | k2 | 10 |
| | k3 | 60 |
| | k4 | 70 |
| | k5 | 12 |
| | l1 | 15 |
| | l2 | 60 |
| | l3 | 80 |
| | l4 | 90 |
| | l5 | 60 |
| | l6 | 11 |

Apéndice K. Código GAMS Modelo Propuesto

```

$title bogCLUSTER
**Valores muy pequeños para OPTCR pueden causar infactibilidad (defecto 0.1)
OPTION OPTCR=0.1;

**Si se desea mostrar más restricciones aumentar el número de limrow
**Si se desea mostrar más variables aumentar el número de limcol
OPTION limrow = 100;
OPTION limcol = 10;

$onEcho > textoConjuntos.txt
Set i rng=Conjuntos!A2:B3      rdim=1
Set h rng=Conjuntos!D2:E5      rdim=1
Set k rng=Conjuntos!G2:H6      rdim=1
Set l rng=Conjuntos!J2:K7      rdim=1
Set j rng=Conjuntos!M2:N13     rdim=1
Set p rng=Conjuntos!P2:Q7      rdim=1
Set m rng=Conjuntos!S2:T4      rdim=1
$offEcho

$call.gdxrw bogdatos.xlsx @textoConjuntos.txt trace=3
$gdxln bogdatos.gdx

SETS
i(*) indice de puertos
h(*) indice de plataformas CD
k(*) indice de CEDIS
l(*) indice de almacen intermedio
j(*) indice de clusters
p(*) indice de periodos
m(*) inddice de tipo de vehículo

$load i,h,k,l,j,p,m

SETS
N nodos /#i,#h,#k,#l,#j/
Ins(N) Instalaciones /#i,#h,#k,#l/
IAd(N) Instalaciones de Distribución /#h,#k/
IA(N) Instalaciones con Almacenamiento /#k,#l/
IO(N) Instalaciones con Operaciones /#h,#k,#l/
ArcF(N,N) Arcos Factibles

Alias(N,Np,Npp);
Alias(i,ip,ipp); Alias(h,hp,hpp);Alias(k,kp,kpp);Alias(l,lp,lpp);Alias(j,jp,jpp);
Alias(Ins,Insp); Alias(IO,IOP);

$onEcho > textoParametros.txt
par D   rng=Parametros!C34      rdim=1 cdim=1
par Dist rng=Parametros!C2      rdim=1 cdim=1
par Kap rng=Parametros!C49      rdim=1 cdim=1
par Cf   rng=Parametros!C69      rdim=1 cdim=1
par Cff  rng=Parametros!C87      rdim=3 cdim=1
par Cut  rng=Parametros!C612     rdim=3 cdim=1
par Kv   rng=Parametros!C1137:D1139 rdim=1
par Ci   rng=Parametros!C1142     rdim=1 cdim=1
par Co   rng=Parametros!C1156     rdim=1 cdim=1
par to   rng=Parametros!C1174:D1188 rdim=1

```

Apéndice L. Resultados Modelo Actual

| | | | h2 | j1 | j2 | j3 | j4 | j5 | j6 | j7 | j8 | j9 | j10 | j11 | j12 |
|----|----|----|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| m1 | p0 | i2 | 66,384 | | | | | | | | | | | | |
| m1 | p0 | h2 | | | | 0,161 | | | | | | | | 6,906 | |
| m1 | p1 | h2 | | | | 0,166 | | | | | | | | 7,114 | |
| m1 | p2 | h2 | | | | 0,171 | | | | | | | | 7,327 | |
| m1 | p3 | i2 | 0,140 | | | | | | | | | | | | |
| m1 | p3 | h2 | | | | 0,176 | | | | 1,094 | 4,849 | | | 7,547 | |
| m1 | p4 | ii | 3,816 | | | | | | | | | | | | |
| m1 | p4 | i2 | 70,900 | | | | | | | | | | | | |
| m1 | p4 | h2 | | | | 0,182 | | | | 1,127 | 4,995 | | | 7,773 | |
| m1 | p5 | ii | 7,057 | | | | | | | | | | | | |
| m1 | p5 | h2 | | | | 0,187 | | | | 1,160 | 5,145 | | | 8,006 | |
| m2 | p0 | h2 | | | | | | | | 1,001 | 4,438 | | 4,486 | | |
| m2 | p1 | ii | 68,376 | | | | | | | | | | | | |
| m2 | p1 | h2 | | | | | | | | 1,031 | 4,571 | | 4,621 | | |
| m2 | p2 | ii | 70,427 | | | | | | | | | | | | |
| m2 | p2 | h2 | | | | | | | | 1,062 | 4,708 | | 4,759 | | 0,001 |
| m2 | p3 | ii | 72,400 | | | | | | | | | | | | |
| m2 | p3 | h2 | | | | | 1,813 | | | | | | 4,902 | | 0,001 |
| m2 | p4 | h2 | | | | | 1,867 | | | | | 10,427 | 5,049 | | 0,001 |
| m2 | p5 | h2 | | | | | 1,923 | | | | | | | | 0,001 |
| m3 | p0 | h2 | | 3,781 | 21,300 | | 1,659 | 2,175 | 11,210 | | | 9,264 | | | 0,001 |
| m3 | p1 | h2 | | 3,895 | 21,939 | | 1,709 | 2,240 | 11,547 | | | 9,542 | | | 0,001 |
| m3 | p2 | h2 | | 4,012 | 22,598 | | 1,760 | 2,308 | 11,893 | | | 9,828 | | | |
| m3 | p3 | h2 | | 4,132 | 23,275 | | | 2,377 | 12,250 | | | 10,123 | | | |
| m3 | p4 | h2 | | 4,256 | 23,974 | | | 2,448 | 12,617 | | | | | | |
| m3 | p5 | i2 | 69,900 | | | | | | | | | | | | |
| m3 | p5 | h2 | | 4,384 | 24,693 | | | 2,522 | 12,996 | | | 10,739 | 5,201 | | |

Apéndice M. Resultados de Clúster 1

| o | d | doj | Costo |
|-------------|----------|--------------|-------------------------|
| 3 | 9 | 0,4263845040 | \$ 255.810.449 |
| 4 | 5 | 0,3864276100 | \$ 231.838.210 |
| 4 | 14 | 0,7043346627 | \$ 422.567.341 |
| 5 | 18 | 0,1084848609 | \$ 65.085.763 |
| 3 | 10 | 0,5523231956 | \$ 331.367.682 |
| 3 | 17 | 0,7180635968 | \$ 430.804.049 |
| 4 | 12 | 0,9847186441 | \$ 590.784.412 |
| 8 | 9 | 0,1788628652 | \$ 107.309.223 |
| 10 | 18 | 0,0266288991 | \$ 15.976.075 |
| 2 | 3 | 0,0355542159 | \$ 21.330.841 |
| 6 | 13 | 0,0227048381 | \$ 13.621.824 |
| 8 | 13 | 0,2987866948 | \$ 179.257.824 |
| 13 | 15 | 0,0859723278 | \$ 51.579.313 |
| 4 | 7 | 0,7572359330 | \$ 454.305.590 |
| 1 | 14 | 0,1967376674 | \$ 118.033.255 |
| 10 | 11 | 0,2055716083 | \$ 123.333.200 |
| 7 | 16 | 0,8755230386 | \$ 525.272.235 |
| SUMA | | | \$ 3.938.277.287 |

Apéndice N. Resultados de Clúster 2

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,988381910 | \$ 920.474.990 |
| 1 | 3 | 0,955831453 | \$ 890.160.916 |
| 1 | 4 | 0,820953798 | \$ 764.550.049 |
| 1 | 5 | 1,009322109 | \$ 939.976.489 |
| 1 | 6 | 0,967940382 | \$ 901.437.899 |
| 1 | 7 | 0,877512118 | \$ 817.222.523 |
| 1 | 8 | 1,629832768 | \$ 1.517.854.875 |
| 1 | 9 | 0,566086641 | \$ 527.193.578 |
| 1 | 10 | 1,096461078 | \$ 1.021.128.563 |
| 1 | 11 | 0,886273803 | \$ 825.382.235 |
| 1 | 12 | 1,264560730 | \$ 1.177.678.904 |
| 1 | 13 | 0,745771590 | \$ 694.533.246 |
| 1 | 14 | 0,857456327 | \$ 798.544.668 |
| 1 | 15 | 0,699130643 | \$ 651.096.772 |
| 1 | 16 | 1,089215379 | \$ 1.014.380.680 |
| 1 | 17 | 0,763087990 | \$ 710.659.921 |
| 1 | 18 | 1,741078620 | \$ 1.621.457.564 |
| 1 | 19 | 0,953455311 | \$ 887.948.028 |
| 1 | 20 | 0,901676834 | \$ 839.726.998 |
| 1 | 21 | 0,860275851 | \$ 801.170.476 |
| 1 | 22 | 0,704601251 | \$ 656.191.521 |
| 1 | 23 | 0,746092421 | \$ 694.832.035 |
| 1 | 24 | 0,988000887 | \$ 920.120.145 |
| 1 | 25 | 0,965458784 | \$ 899.126.800 |
| 1 | 26 | 0,990297564 | \$ 922.259.028 |
| 1 | 27 | 0,701449544 | \$ 653.256.353 |
| 1 | 28 | 0,452094530 | \$ 421.033.311 |
| 1 | 29 | 1,065444716 | \$ 992.243.184 |
| 2 | 3 | 0,227113304 | \$ 211.509.452 |
| 2 | 4 | 0,727832592 | \$ 677.826.750 |
| 2 | 5 | 0,928502348 | \$ 864.709.461 |
| 2 | 6 | 0,841766584 | \$ 783.932.890 |
| 2 | 7 | 0,978779006 | \$ 911.531.855 |
| 2 | 8 | 1,501915035 | \$ 1.398.725.748 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 2 | 9 | 0,762137272 | \$ 709.774.522 |
| 2 | 10 | 0,974374299 | \$ 907.429.774 |
| 2 | 11 | 0,703894627 | \$ 655.533.446 |
| 2 | 12 | 1,256529091 | \$ 1.170.199.080 |
| 2 | 13 | 0,635985777 | \$ 592.290.283 |
| 2 | 14 | 0,571400244 | \$ 532.142.109 |
| 2 | 15 | 0,304081931 | \$ 283.189.939 |
| 2 | 16 | 0,152180033 | \$ 141.724.482 |
| 2 | 17 | 0,780934759 | \$ 727.280.525 |
| 2 | 18 | 1,096022504 | \$ 1.020.720.122 |
| 2 | 19 | 0,328663583 | \$ 306.082.704 |
| 2 | 20 | 0,540295442 | \$ 503.174.367 |
| 2 | 21 | 0,559682716 | \$ 521.229.635 |
| 2 | 22 | 0,424518798 | \$ 395.352.173 |
| 2 | 23 | 0,511473620 | \$ 476.332.752 |
| 2 | 24 | 0,784893628 | \$ 730.967.399 |
| 2 | 25 | 0,721067731 | \$ 671.526.670 |
| 2 | 26 | 0,960291415 | \$ 894.314.456 |
| 2 | 27 | 0,309003641 | \$ 287.773.501 |
| 2 | 28 | 1,036433715 | \$ 965.225.389 |
| 2 | 29 | 0,938430943 | \$ 873.955.911 |
| 3 | 4 | 0,521280562 | \$ 485.465.906 |
| 3 | 5 | 0,707631269 | \$ 659.013.362 |
| 3 | 6 | 0,621313598 | \$ 578.626.159 |
| 3 | 7 | 0,583829324 | \$ 543.717.247 |
| 3 | 8 | 1,275338919 | \$ 1.187.716.576 |
| 3 | 9 | 0,607252048 | \$ 565.530.710 |
| 3 | 10 | 0,749629761 | \$ 698.126.341 |
| 3 | 11 | 0,487715464 | \$ 454.206.903 |
| 3 | 12 | 1,031996274 | \$ 961.092.823 |
| 3 | 13 | 0,443686708 | \$ 413.203.149 |
| 3 | 14 | 0,357523120 | \$ 332.959.443 |
| 3 | 15 | 0,274454777 | \$ 255.598.322 |
| 3 | 16 | 0,371692001 | \$ 346.154.849 |
| 3 | 17 | 0,584799908 | \$ 544.621.147 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|----------------|
| 3 | 18 | 0,927696834 | \$ 863.959.291 |
| 3 | 19 | 0,101636743 | \$ 94.653.776 |
| 3 | 20 | 0,319600273 | \$ 297.642.090 |
| 3 | 21 | 0,345330686 | \$ 321.604.692 |
| 3 | 22 | 0,279309012 | \$ 260.119.046 |
| 3 | 23 | 0,327514610 | \$ 305.012.672 |
| 3 | 24 | 0,561362657 | \$ 522.794.156 |
| 3 | 25 | 0,497596556 | \$ 463.409.114 |
| 3 | 26 | 0,742097547 | \$ 691.111.629 |
| 3 | 27 | 0,265744676 | \$ 247.486.650 |
| 3 | 28 | 0,905603769 | \$ 843.384.133 |
| 3 | 29 | 0,714295911 | \$ 665.220.108 |
| 4 | 5 | 0,237145630 | \$ 220.852.505 |
| 4 | 6 | 0,163848283 | \$ 152.591.063 |
| 4 | 7 | 0,107361374 | \$ 99.985.095 |
| 4 | 8 | 0,889304657 | \$ 828.204.853 |
| 4 | 9 | 0,259019878 | \$ 241.223.880 |
| 4 | 10 | 0,314190425 | \$ 292.603.927 |
| 4 | 11 | 0,076059441 | \$ 70.833.766 |
| 4 | 12 | 0,569505902 | \$ 530.377.917 |
| 4 | 13 | 0,113810538 | \$ 105.991.169 |
| 4 | 14 | 0,166870086 | \$ 155.405.253 |
| 4 | 15 | 0,530345128 | \$ 493.907.690 |
| 4 | 16 | 0,879850264 | \$ 819.400.026 |
| 4 | 17 | 0,086901636 | \$ 80.931.047 |
| 4 | 18 | 0,947975490 | \$ 882.844.699 |
| 4 | 19 | 0,432692965 | \$ 402.964.733 |
| 4 | 20 | 0,217620892 | \$ 202.669.217 |
| 4 | 21 | 0,179140469 | \$ 166.832.597 |
| 4 | 22 | 0,343010639 | \$ 319.444.044 |
| 4 | 23 | 0,228978726 | \$ 213.246.710 |
| 4 | 24 | 0,167228580 | \$ 155.739.117 |
| 4 | 25 | 0,151877212 | \$ 141.442.466 |
| 4 | 26 | 0,250654857 | \$ 233.433.580 |
| 4 | 27 | 0,513290604 | \$ 478.024.900 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 4 | 28 | 0,532997162 | \$ 496.377.516 |
| 4 | 29 | 0,276490692 | \$ 257.494.359 |
| 5 | 6 | 0,086784723 | \$ 80.822.166 |
| 5 | 7 | 0,134990215 | \$ 125.715.693 |
| 5 | 8 | 0,654477766 | \$ 609.511.778 |
| 5 | 9 | 0,448497749 | \$ 417.683.647 |
| 5 | 10 | 0,087144424 | \$ 81.157.154 |
| 5 | 11 | 0,228652480 | \$ 212.942.878 |
| 5 | 12 | 0,336134190 | \$ 313.040.043 |
| 5 | 13 | 0,350819351 | \$ 326.716.258 |
| 5 | 14 | 0,360108969 | \$ 335.367.630 |
| 5 | 15 | 0,761562637 | \$ 709.239.367 |
| 5 | 16 | 1,077949872 | \$ 1.003.889.172 |
| 5 | 17 | 0,255217663 | \$ 237.682.897 |
| 5 | 18 | 0,864846993 | \$ 805.427.557 |
| 5 | 19 | 0,608853687 | \$ 567.022.307 |
| 5 | 20 | 0,388531161 | \$ 361.837.072 |
| 5 | 21 | 0,371103979 | \$ 345.607.227 |
| 5 | 22 | 0,574554457 | \$ 535.079.611 |
| 5 | 23 | 0,458337557 | \$ 426.847.409 |
| 5 | 24 | 0,150949141 | \$ 140.578.159 |
| 5 | 25 | 0,212424764 | \$ 197.830.090 |
| 5 | 26 | 0,050580280 | \$ 47.105.155 |
| 5 | 27 | 0,744193775 | \$ 693.063.835 |
| 5 | 28 | 0,644490394 | \$ 600.210.589 |
| 5 | 29 | 0,059928217 | \$ 55.810.840 |
| 6 | 7 | 0,056488375 | \$ 52.607.333 |
| 6 | 8 | 0,726812945 | \$ 676.877.157 |
| 6 | 9 | 0,401977226 | \$ 374.359.323 |
| 6 | 10 | 0,151630265 | \$ 141.212.486 |
| 6 | 11 | 0,143074551 | \$ 133.244.593 |
| 6 | 12 | 0,421182360 | \$ 392.244.966 |
| 6 | 13 | 0,274723980 | \$ 255.849.030 |
| 6 | 14 | 0,273598574 | \$ 254.800.945 |
| 6 | 15 | 0,678354291 | \$ 631.747.862 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|----------------|
| 6 | 16 | 0,991338847 | \$ 923.228.770 |
| 6 | 17 | 0,204853275 | \$ 190.778.801 |
| 6 | 18 | 0,849672291 | \$ 791.295.435 |
| 6 | 19 | 0,522971511 | \$ 487.040.679 |
| 6 | 20 | 0,301969062 | \$ 281.222.235 |
| 6 | 21 | 0,284484933 | \$ 264.939.355 |
| 6 | 22 | 0,492028874 | \$ 458.223.960 |
| 6 | 23 | 0,375638823 | \$ 349.830.504 |
| 6 | 24 | 0,073750305 | \$ 68.683.280 |
| 6 | 25 | 0,129220899 | \$ 120.342.759 |
| 6 | 26 | 0,123442785 | \$ 114.961.631 |
| 6 | 27 | 0,660893838 | \$ 615.487.032 |
| 6 | 28 | 0,632758266 | \$ 589.284.519 |
| 6 | 29 | 0,113352166 | \$ 105.564.289 |
| 7 | 8 | 0,782725430 | \$ 728.948.167 |
| 7 | 9 | 0,350486588 | \$ 326.406.357 |
| 7 | 10 | 0,207401727 | \$ 193.152.161 |
| 7 | 11 | 0,096885571 | \$ 90.229.034 |
| 7 | 12 | 0,471012163 | \$ 438.651.205 |
| 7 | 13 | 0,218807011 | \$ 203.773.844 |
| 7 | 14 | 0,229536121 | \$ 213.765.809 |
| 7 | 15 | 0,626572604 | \$ 583.523.844 |
| 7 | 16 | 0,951428829 | \$ 886.060.775 |
| 7 | 17 | 0,154858729 | \$ 144.219.138 |
| 7 | 18 | 0,881631095 | \$ 821.058.504 |
| 7 | 19 | 0,487800702 | \$ 454.286.285 |
| 7 | 20 | 0,264859868 | \$ 246.662.633 |
| 7 | 21 | 0,241119732 | \$ 224.553.566 |
| 7 | 22 | 0,439590949 | \$ 409.388.790 |
| 7 | 23 | 0,323349757 | \$ 301.133.965 |
| 7 | 24 | 0,084785107 | \$ 78.959.934 |
| 7 | 25 | 0,113594614 | \$ 105.790.080 |
| 7 | 26 | 0,159720545 | \$ 148.746.922 |
| 7 | 27 | 0,609205976 | \$ 567.350.392 |
| 7 | 28 | 0,594914378 | \$ 554.040.700 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 7 | 29 | 0,169408604 | \$ 157.769.361 |
| 8 | 9 | 1,091026537 | \$ 1.016.067.403 |
| 8 | 10 | 0,575324025 | \$ 535.796.306 |
| 8 | 11 | 0,863015923 | \$ 803.722.291 |
| 8 | 12 | 0,368055618 | \$ 342.768.304 |
| 8 | 13 | 1,001491247 | \$ 932.683.648 |
| 8 | 14 | 0,979508630 | \$ 912.211.349 |
| 8 | 15 | 1,394581849 | \$ 1.298.766.904 |
| 8 | 16 | 1,638876435 | \$ 1.526.277.195 |
| 8 | 17 | 0,906592025 | \$ 844.304.490 |
| 8 | 18 | 0,860225184 | \$ 801.123.290 |
| 8 | 19 | 1,174553822 | \$ 1.093.855.934 |
| 8 | 20 | 0,986609898 | \$ 918.824.724 |
| 8 | 21 | 0,987833247 | \$ 919.964.022 |
| 8 | 22 | 1,212335841 | \$ 1.129.042.134 |
| 8 | 23 | 1,096989722 | \$ 1.021.620.886 |
| 8 | 24 | 0,753423075 | \$ 701.659.035 |
| 8 | 25 | 0,811309454 | \$ 755.568.322 |
| 8 | 26 | 0,656149267 | \$ 611.068.438 |
| 8 | 27 | 1,376963778 | \$ 1.282.359.284 |
| 8 | 28 | 1,209401911 | \$ 1.126.309.780 |
| 8 | 29 | 0,613461414 | \$ 571.313.460 |
| 9 | 10 | 0,535256406 | \$ 498.481.538 |
| 9 | 11 | 0,330108694 | \$ 307.428.529 |
| 9 | 12 | 0,738540431 | \$ 687.798.905 |
| 9 | 13 | 0,213266744 | \$ 198.614.221 |
| 9 | 14 | 0,343605626 | \$ 319.998.152 |
| 9 | 15 | 0,486978195 | \$ 453.520.288 |
| 9 | 16 | 0,908797060 | \$ 846.358.028 |
| 9 | 17 | 0,197221035 | \$ 183.670.936 |
| 9 | 18 | 1,202613505 | \$ 1.119.987.772 |
| 9 | 19 | 0,549872211 | \$ 512.093.162 |
| 9 | 20 | 0,398986873 | \$ 371.574.423 |
| 9 | 21 | 0,351341957 | \$ 327.202.958 |
| 9 | 22 | 0,339186135 | \$ 315.882.303 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 9 | 23 | 0,286745222 | \$ 267.044.350 |
| 9 | 24 | 0,424224532 | \$ 395.078.125 |
| 9 | 25 | 0,409141129 | \$ 381.031.029 |
| 9 | 26 | 0,436511990 | \$ 406.521.371 |
| 9 | 27 | 0,474330610 | \$ 441.741.658 |
| 9 | 28 | 0,308602884 | \$ 287.400.279 |
| 9 | 29 | 0,502340180 | \$ 467.826.827 |
| 10 | 11 | 0,291362796 | \$ 271.344.674 |
| 10 | 12 | 0,282370319 | \$ 262.970.026 |
| 10 | 13 | 0,426179436 | \$ 396.898.717 |
| 10 | 14 | 0,416588577 | \$ 387.966.800 |
| 10 | 15 | 0,827325064 | \$ 770.483.577 |
| 10 | 16 | 1,121321553 | \$ 1.044.280.995 |
| 10 | 17 | 0,340808744 | \$ 317.393.431 |
| 10 | 18 | 0,804725592 | \$ 749.436.805 |
| 10 | 19 | 0,648773504 | \$ 604.199.428 |
| 10 | 20 | 0,435942985 | \$ 405.991.460 |
| 10 | 21 | 0,426481578 | \$ 397.180.100 |
| 10 | 22 | 0,641940912 | \$ 597.836.270 |
| 10 | 23 | 0,525677558 | \$ 489.560.807 |
| 10 | 24 | 0,190586431 | \$ 177.492.163 |
| 10 | 25 | 0,253975055 | \$ 236.525.662 |
| 10 | 26 | 0,116461798 | \$ 108.460.274 |
| 10 | 27 | 0,809787029 | \$ 754.150.496 |
| 10 | 28 | 0,727117389 | \$ 677.160.685 |
| 10 | 29 | 0,038557438 | \$ 35.908.344 |
| 11 | 12 | 0,564199558 | \$ 525.436.147 |
| 11 | 13 | 0,149702047 | \$ 139.416.747 |
| 11 | 14 | 0,132671204 | \$ 123.556.010 |
| 11 | 15 | 0,536083663 | \$ 499.251.958 |
| 11 | 16 | 0,854636391 | \$ 795.918.475 |
| 11 | 17 | 0,161786994 | \$ 150.671.396 |
| 11 | 18 | 0,873643373 | \$ 813.619.580 |
| 11 | 19 | 0,392815956 | \$ 365.827.479 |
| 11 | 20 | 0,170071889 | \$ 158.387.075 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 11 | 21 | 0,144234529 | \$ 134.324.875 |
| 11 | 22 | 0,350635103 | \$ 326.544.668 |
| 11 | 23 | 0,234502489 | \$ 218.390.962 |
| 11 | 24 | 0,113722533 | \$ 105.909.210 |
| 11 | 25 | 0,079436279 | \$ 73.978.598 |
| 11 | 26 | 0,256565101 | \$ 238.937.759 |
| 11 | 27 | 0,518569727 | \$ 482.941.320 |
| 11 | 28 | 0,609030560 | \$ 567.187.029 |
| 11 | 29 | 0,252845175 | \$ 235.473.411 |
| 12 | 13 | 0,683034388 | \$ 636.106.413 |
| 12 | 14 | 0,694146819 | \$ 646.455.363 |
| 12 | 15 | 1,097441554 | \$ 1.022.041.675 |
| 12 | 16 | 1,403687074 | \$ 1.307.246.553 |
| 12 | 17 | 0,567099503 | \$ 528.136.850 |
| 12 | 18 | 0,928111049 | \$ 864.345.047 |
| 12 | 19 | 0,931129811 | \$ 867.156.404 |
| 12 | 20 | 0,717215794 | \$ 667.939.380 |
| 12 | 21 | 0,704675020 | \$ 656.260.222 |
| 12 | 22 | 0,910231288 | \$ 847.693.717 |
| 12 | 23 | 0,794196272 | \$ 739.630.904 |
| 12 | 24 | 0,471825228 | \$ 439.408.408 |
| 12 | 25 | 0,535583196 | \$ 498.785.876 |
| 12 | 26 | 0,319751441 | \$ 297.782.872 |
| 12 | 27 | 1,080115230 | \$ 1.005.905.759 |
| 12 | 28 | 0,841373453 | \$ 783.566.770 |
| 12 | 29 | 0,318137798 | \$ 296.280.095 |
| 13 | 14 | 0,130784783 | \$ 121.799.195 |
| 13 | 15 | 0,419694662 | \$ 390.859.481 |
| 13 | 16 | 0,788024199 | \$ 733.882.883 |
| 13 | 17 | 0,145046578 | \$ 135.081.132 |
| 13 | 18 | 0,999662415 | \$ 930.980.466 |
| 13 | 19 | 0,366895328 | \$ 341.687.732 |
| 13 | 20 | 0,187081381 | \$ 174.227.928 |
| 13 | 21 | 0,139304051 | \$ 129.733.146 |
| 13 | 22 | 0,233389977 | \$ 217.354.885 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 13 | 23 | 0,125269923 | \$ 116.663.235 |
| 13 | 24 | 0,262498387 | \$ 244.463.398 |
| 13 | 25 | 0,224899886 | \$ 209.448.107 |
| 13 | 26 | 0,363692143 | \$ 338.704.623 |
| 13 | 27 | 0,402929292 | \$ 375.245.977 |
| 13 | 28 | 0,517682182 | \$ 482.114.753 |
| 13 | 29 | 0,388052098 | \$ 361.390.923 |
| 14 | 15 | 0,415127674 | \$ 386.606.268 |
| 14 | 16 | 0,722388279 | \$ 672.756.489 |
| 14 | 17 | 0,241961692 | \$ 225.337.680 |
| 14 | 18 | 0,883631499 | \$ 822.921.470 |
| 14 | 19 | 0,266230698 | \$ 247.939.280 |
| 14 | 20 | 0,057084478 | \$ 53.162.481 |
| 14 | 21 | 0,012319692 | \$ 11.473.266 |
| 14 | 22 | 0,236753491 | \$ 220.487.308 |
| 14 | 23 | 0,129643330 | \$ 120.736.167 |
| 14 | 24 | 0,227689548 | \$ 212.046.105 |
| 14 | 25 | 0,168220641 | \$ 156.663.018 |
| 14 | 26 | 0,389235532 | \$ 362.493.049 |
| 14 | 27 | 0,397510041 | \$ 370.199.057 |
| 14 | 28 | 0,648348034 | \$ 603.803.189 |
| 14 | 29 | 0,378630269 | \$ 352.616.423 |
| 15 | 16 | 0,435678295 | \$ 405.744.955 |
| 15 | 17 | 0,557157599 | \$ 518.878.006 |
| 15 | 18 | 1,178366737 | \$ 1.097.406.882 |
| 15 | 19 | 0,313670222 | \$ 292.119.465 |
| 15 | 20 | 0,414687869 | \$ 386.196.680 |
| 15 | 21 | 0,407128698 | \$ 379.156.862 |
| 15 | 22 | 0,187425086 | \$ 174.548.018 |
| 15 | 23 | 0,303249493 | \$ 282.414.693 |
| 15 | 24 | 0,641697752 | \$ 597.609.816 |
| 15 | 25 | 0,583346943 | \$ 543.268.008 |
| 15 | 26 | 0,780594666 | \$ 726.963.798 |
| 15 | 27 | 0,017618300 | \$ 16.407.832 |
| 15 | 28 | 0,739725921 | \$ 688.902.946 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 15 | 29 | 0,788854537 | \$ 734.656.174 |
| 16 | 17 | 0,933010457 | \$ 868.907.841 |
| 16 | 18 | 1,176342854 | \$ 1.095.522.050 |
| 16 | 19 | 0,472810202 | \$ 440.325.709 |
| 16 | 20 | 0,689420556 | \$ 642.053.818 |
| 16 | 21 | 0,710560036 | \$ 661.740.908 |
| 16 | 22 | 0,573522449 | \$ 534.118.507 |
| 16 | 23 | 0,663348444 | \$ 617.772.994 |
| 16 | 24 | 0,932807703 | \$ 868.719.016 |
| 16 | 25 | 0,868993924 | \$ 809.289.573 |
| 16 | 26 | 1,110728766 | \$ 1.034.415.987 |
| 16 | 27 | 0,443870170 | \$ 413.374.007 |
| 16 | 28 | 1,175040231 | \$ 1.094.308.924 |
| 16 | 29 | 1,085926633 | \$ 1.011.317.888 |
| 17 | 18 | 1,027074197 | \$ 956.508.917 |
| 17 | 19 | 0,502219588 | \$ 467.714.519 |
| 17 | 20 | 0,296534409 | \$ 276.160.970 |
| 17 | 21 | 0,253718936 | \$ 236.287.140 |
| 17 | 22 | 0,374129916 | \$ 348.425.267 |
| 17 | 23 | 0,270203496 | \$ 251.639.127 |
| 17 | 24 | 0,233738016 | \$ 217.679.012 |
| 17 | 25 | 0,232918627 | \$ 216.915.919 |
| 17 | 26 | 0,251222483 | \$ 233.962.206 |
| 17 | 27 | 0,540985415 | \$ 503.816.934 |
| 17 | 28 | 0,449806760 | \$ 418.902.722 |
| 17 | 29 | 0,306577283 | \$ 285.513.847 |
| 18 | 19 | 0,865191988 | \$ 805.748.849 |
| 18 | 20 | 0,841239594 | \$ 783.442.107 |
| 18 | 21 | 0,881056165 | \$ 820.523.075 |
| 18 | 22 | 1,068897639 | \$ 995.458.873 |
| 18 | 23 | 0,999834061 | \$ 931.140.319 |
| 18 | 24 | 0,797193570 | \$ 742.422.271 |
| 18 | 25 | 0,796121792 | \$ 741.424.130 |
| 18 | 26 | 0,911624555 | \$ 848.991.260 |
| 18 | 27 | 1,164459642 | \$ 1.084.455.276 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|------------------|
| 18 | 28 | 1,475640070 | \$ 1.374.256.008 |
| 18 | 29 | 0,809790120 | \$ 754.153.374 |
| 19 | 20 | 0,222978188 | \$ 207.658.440 |
| 19 | 21 | 0,253911088 | \$ 236.466.090 |
| 19 | 22 | 0,251265885 | \$ 234.002.626 |
| 19 | 23 | 0,263207208 | \$ 245.123.519 |
| 19 | 24 | 0,461328522 | \$ 429.632.880 |
| 19 | 25 | 0,397725391 | \$ 370.399.611 |
| 19 | 26 | 0,644753799 | \$ 600.455.897 |
| 19 | 27 | 0,300464091 | \$ 279.820.662 |
| 19 | 28 | 0,855564444 | \$ 796.782.767 |
| 19 | 29 | 0,613758987 | \$ 571.590.588 |
| 20 | 21 | 0,047785613 | \$ 44.502.495 |
| 20 | 22 | 0,249408735 | \$ 232.273.072 |
| 20 | 23 | 0,159342960 | \$ 148.395.279 |
| 20 | 24 | 0,245487993 | \$ 228.621.705 |
| 20 | 25 | 0,181980418 | \$ 169.477.427 |
| 20 | 26 | 0,422523391 | \$ 393.493.861 |
| 20 | 27 | 0,397265824 | \$ 369.971.619 |
| 20 | 28 | 0,704752481 | \$ 656.332.361 |
| 20 | 29 | 0,399199983 | \$ 371.772.891 |
| 21 | 22 | 0,230724820 | \$ 214.872.838 |
| 21 | 23 | 0,126871518 | \$ 118.154.792 |
| 21 | 24 | 0,237017093 | \$ 220.732.800 |
| 21 | 25 | 0,176611539 | \$ 164.477.418 |
| 21 | 26 | 0,400767159 | \$ 373.232.394 |
| 21 | 27 | 0,389519421 | \$ 362.757.434 |
| 21 | 28 | 0,656968031 | \$ 611.830.949 |
| 21 | 29 | 0,388651587 | \$ 361.949.224 |
| 22 | 23 | 0,116390288 | \$ 108.393.676 |
| 22 | 24 | 0,458976443 | \$ 427.442.401 |
| 22 | 25 | 0,403226753 | \$ 375.523.001 |
| 22 | 26 | 0,593170588 | \$ 552.416.718 |
| 22 | 27 | 0,170293877 | \$ 158.593.812 |
| 22 | 28 | 0,628484119 | \$ 585.304.028 |

| o | d | Distancia | Costo |
|----------|----------|------------------|----------------|
| 22 | 29 | 0,603399233 | \$ 561.942.603 |
| 23 | 24 | 0,344121569 | \$ 320.478.648 |
| 23 | 25 | 0,290507229 | \$ 270.547.888 |
| 23 | 26 | 0,477988160 | \$ 445.147.915 |
| 23 | 27 | 0,285921199 | \$ 266.276.942 |
| 23 | 28 | 0,593556339 | \$ 552.775.966 |
| 23 | 29 | 0,487127137 | \$ 453.658.998 |
| 24 | 25 | 0,063835509 | \$ 59.449.681 |
| 24 | 26 | 0,194232114 | \$ 180.887.369 |
| 24 | 27 | 0,624090661 | \$ 581.212.423 |
| 24 | 28 | 0,678780065 | \$ 632.144.383 |
| 24 | 29 | 0,153724993 | \$ 143.163.295 |
| 25 | 26 | 0,252627858 | \$ 235.271.025 |
| 25 | 27 | 0,565729105 | \$ 526.860.606 |
| 25 | 28 | 0,682676247 | \$ 635.772.878 |
| 25 | 29 | 0,217447874 | \$ 202.508.086 |
| 26 | 27 | 0,763439907 | \$ 710.987.659 |
| 26 | 28 | 0,611466991 | \$ 569.456.064 |
| 26 | 29 | 0,101992745 | \$ 94.985.319 |
| 27 | 28 | 0,731173360 | \$ 680.937.990 |
| 27 | 29 | 0,771322123 | \$ 718.328.327 |
| 28 | 29 | 0,704383105 | \$ 655.988.363 |

Apéndice O. Resultados de Clúster 4

| o | d | dij | Cij |
|----------|----------|------------|------------------|
| 1 | 2 | 1,1912117 | \$ 719.414.009 |
| 1 | 3 | 0,8956654 | \$ 540.923.360 |
| 1 | 4 | 0,7840438 | \$ 473.511.227 |
| 1 | 5 | 1,2087655 | \$ 730.015.396 |
| 1 | 6 | 0,2645672 | \$ 159.781.331 |
| 1 | 7 | 1,3375347 | \$ 807.783.557 |
| 1 | 8 | 1,0128337 | \$ 611.685.403 |
| 1 | 9 | 0,5889150 | \$ 355.666.164 |
| 1 | 10 | 1,2328623 | \$ 744.568.245 |
| 2 | 3 | 1,6778287 | \$ 1.013.298.900 |
| 2 | 4 | 1,8503928 | \$ 1.117.516.363 |
| 2 | 5 | 0,0457928 | \$ 27.655.849 |
| 2 | 6 | 0,9302575 | \$ 561.814.728 |
| 2 | 7 | 0,5334723 | \$ 322.182.407 |
| 2 | 8 | 1,5124480 | \$ 913.419.788 |
| 2 | 9 | 0,9060196 | \$ 547.176.629 |
| 2 | 10 | 0,0527439 | \$ 31.853.865 |
| 3 | 4 | 0,4743902 | \$ 286.500.662 |
| 3 | 5 | 1,7143245 | \$ 1.035.339.980 |
| 3 | 6 | 0,9677167 | \$ 584.437.677 |
| 3 | 7 | 2,0294800 | \$ 1.225.673.313 |
| 3 | 8 | 1,8973386 | \$ 1.145.868.538 |
| 3 | 9 | 1,4476819 | \$ 874.305.276 |
| 3 | 10 | 1,7301030 | \$ 1.044.869.152 |
| 4 | 5 | 1,8789109 | \$ 1.134.739.392 |
| 4 | 6 | 0,9746213 | \$ 588.607.595 |
| 4 | 7 | 2,0960079 | \$ 1.265.851.843 |
| 4 | 8 | 1,6661620 | \$ 1.006.252.976 |
| 4 | 9 | 1,3712599 | \$ 828.151.370 |
| 4 | 10 | 1,8993390 | \$ 1.147.076.662 |
| 5 | 6 | 0,9497323 | \$ 573.576.239 |
| 5 | 7 | 0,4900380 | \$ 295.950.902 |
| 5 | 8 | 1,4970978 | \$ 904.149.262 |
| 5 | 9 | 0,9014338 | \$ 544.407.111 |

| o | d | dij | Cij |
|----------|----------|------------|-------------------|
| 5 | 10 | 0,0262578 | \$ 15.858.021 |
| 6 | 7 | 1,1214303 | \$ 677.270.621 |
| 6 | 8 | 1,0672766 | \$ 644.565.343 |
| 6 | 9 | 0,4926461 | \$ 297.526.042 |
| 6 | 10 | 0,9732952 | \$ 587.806.707 |
| 7 | 8 | 1,2557379 | \$ 758.383.623 |
| 7 | 9 | 0,8360780 | \$ 504.936.478 |
| 7 | 10 | 0,8360780 | \$ 504.936.478 |
| 8 | 9 | 0,6635702 | \$ 400.753.030 |
| 8 | 10 | 1,5219995 | \$ 919.188.233 |
| 9 | 10 | 0,9276233 | \$ 560.223.886 |
| | | total | \$ 30.035.473.632 |

Apéndice P. Resultados de Clúster 5

| o | d | Doj |
|----------|----------|------------|
| 1 | 2 | 1,2385958 |
| 1 | 3 | 0,9329178 |
| 1 | 4 | 1,2569369 |
| 1 | 5 | 1,6687461 |
| 1 | 6 | 1,5364246 |
| 1 | 7 | 0,7708625 |
| 1 | 8 | 0,4383855 |
| 2 | 3 | 0,5996910 |
| 2 | 4 | 0,2425360 |
| 2 | 5 | 1,0670227 |
| 2 | 6 | 0,4741816 |
| 2 | 7 | 0,5890082 |
| 2 | 8 | 0,8008808 |
| 3 | 4 | 0,7905074 |
| 3 | 5 | 0,7802206 |
| 3 | 6 | 0,6565762 |
| 3 | 7 | 0,1896557 |
| 3 | 8 | 0,8008808 |
| 4 | 5 | 1,3095165 |
| 4 | 6 | 0,6955117 |
| 4 | 7 | 0,7313846 |
| 4 | 8 | 0,8374044 |
| 5 | 6 | 0,6878062 |
| 5 | 7 | 0,9697945 |
| 5 | 8 | 1,3456726 |
| 6 | 7 | 0,7732782 |
| 6 | 8 | 1,1132336 |
| 7 | 8 | 0,3817108 |

Apéndice Q. Resultados de Clúster 6

| | Resultados árbol | | | |
|----|------------------|----------|--------------|------------------|
| | o | d | doj | Costo |
| 1 | 15 | 19 | 0,0027343483 | \$ 1.956.060 |
| 2 | 15 | 20 | 0,0027343483 | \$ 1.956.060 |
| 3 | 4 | 20 | 0,0397471473 | \$ 28.433.755 |
| 4 | 11 | 20 | 0,0668726917 | \$ 47.838.445 |
| 5 | 1 | 17 | 0,0870151099 | \$ 62.247.645 |
| 6 | 7 | 21 | 0,0873968019 | \$ 62.520.694 |
| 7 | 10 | 20 | 0,0912563990 | \$ 65.281.719 |
| 8 | 3 | 10 | 0,1040689283 | \$ 74.447.366 |
| 9 | 2 | 21 | 0,1054355737 | \$ 75.425.017 |
| 10 | 10 | 14 | 0,1199891328 | \$ 85.836.137 |
| 11 | 5 | 7 | 0,1656167625 | \$ 118.476.589 |
| 12 | 3 | 16 | 0,1662420965 | \$ 118.923.932 |
| 13 | 8 | 18 | 0,2437077492 | \$ 174.340.220 |
| 14 | 6 | 17 | 0,3301313404 | \$ 236.164.713 |
| 15 | 12 | 15 | 0,3303962034 | \$ 236.354.187 |
| 16 | 1 | 9 | 0,4290032990 | \$ 306.894.343 |
| 17 | 9 | 12 | 0,4371135668 | \$ 312.696.153 |
| 18 | 5 | 16 | 0,4848163285 | \$ 346.821.083 |
| 19 | 8 | 9 | 0,4909208257 | \$ 351.188.032 |
| 20 | 1 | 13 | 0,5992073553 | \$ 428.652.526 |
| | | | SUMA | \$ 3.136.454.676 |

Apéndice R. Resultados de Clúster 7

| Resultados árbol | | | |
|------------------|----------|-------------|------------------|
| o | d | doj | Costo |
| 1 | 4 | 0,250628369 | \$ 218.182.577 |
| 2 | 4 | 0,363486648 | \$ 316.430.473 |
| 3 | 4 | 1,366536834 | \$ 1.189.628.009 |
| | | SUMA | \$ 1.724.241.059 |

Apéndice S. Resultados de Clúster 8

| Resultados árbol | | | |
|------------------|----------|-------------|------------------|
| o | d | doj | Costo |
| 2 | 5 | 0,052585864 | \$ 36.117.189 |
| 5 | 6 | 0,063549552 | \$ 43.647.304 |
| 6 | 7 | 0,065326279 | \$ 44.867.601 |
| 1 | 15 | 0,080436866 | \$ 55.245.902 |
| 5 | 9 | 0,087153239 | \$ 59.858.863 |
| 2 | 10 | 0,138095737 | \$ 94.847.350 |
| 10 | 12 | 0,150037896 | \$ 103.049.502 |
| 8 | 10 | 0,197920597 | \$ 135.936.450 |
| 3 | 12 | 0,216736557 | \$ 148.859.686 |
| 11 | 12 | 0,427097659 | \$ 293.340.563 |
| 4 | 14 | 0,430175861 | \$ 295.454.744 |
| 11 | 15 | 0,445615982 | \$ 306.059.376 |
| 13 | 14 | 0,460552865 | \$ 316.318.373 |
| 3 | 4 | 0,473128192 | \$ 324.955.399 |
| 13 | 16 | 0,660915867 | \$ 453.932.323 |
| | | TOTAL | \$ 2.712.490.626 |

Apéndice T. Resultados de Clúster 9

| Resultados árbol | | | |
|------------------|----------|---------------|-------------------------|
| o | d | doj | Costo |
| 18 | 27 | 0,01376095581 | \$ 13.743.865 |
| 14 | 27 | 0,01929775191 | \$ 19.273.785 |
| 5 | 23 | 0,02342839352 | \$ 23.399.297 |
| 21 | 28 | 0,02401088824 | \$ 23.981.068 |
| 18 | 21 | 0,03320231301 | \$ 33.161.078 |
| 6 | 9 | 0,04289484513 | \$ 42.841.572 |
| 22 | 26 | 0,05004328613 | \$ 49.981.135 |
| 5 | 18 | 0,05986626586 | \$ 59.791.915 |
| 9 | 16 | 0,06267671381 | \$ 62.598.873 |
| 7 | 21 | 0,06429820083 | \$ 64.218.346 |
| 11 | 26 | 0,07646907298 | \$ 76.374.103 |
| 12 | 20 | 0,07658000116 | \$ 76.484.893 |
| 13 | 22 | 0,07976387377 | \$ 79.664.811 |
| 19 | 30 | 0,08106895534 | \$ 80.968.272 |
| 2 | 7 | 0,08957478728 | \$ 89.463.540 |
| 2 | 31 | 0,09462716956 | \$ 94.509.648 |
| 16 | 17 | 0,09762289885 | \$ 97.501.657 |
| 6 | 23 | 0,10324381552 | \$ 103.115.592 |
| 11 | 20 | 0,10721675526 | \$ 107.083.598 |
| 12 | 24 | 0,11644532815 | \$ 116.300.709 |
| 10 | 16 | 0,11968257485 | \$ 119.533.936 |
| 7 | 12 | 0,13495372640 | \$ 134.786.121 |
| 1 | 29 | 0,14195165153 | \$ 141.775.355 |
| 3 | 19 | 0,16241695625 | \$ 162.215.243 |
| 1 | 24 | 0,18244209264 | \$ 182.215.510 |
| 30 | 31 | 0,19977999468 | \$ 199.531.879 |
| 8 | 30 | 0,19983204660 | \$ 199.583.866 |
| 15 | 32 | 0,24752055402 | \$ 247.213.147 |
| 4 | 33 | 0,30177465643 | \$ 301.399.869 |
| 4 | 13 | 0,39212258708 | \$ 391.635.592 |
| 10 | 32 | 0,47815611992 | \$ 477.562.276 |
| 25 | 33 | 0,53534234288 | \$ 534.677.477 |
| | | SUMA | \$ 4.406.588.029 |

Apéndice U. Resultados de Clúster 10

| Resultados árbol | | | |
|------------------|----------|-------------|------------------|
| o | d | doj | Costo |
| 5 | 14 | 0,096896631 | \$ 92.258.521 |
| 2 | 10 | 0,162355810 | \$ 154.584.393 |
| 3 | 12 | 0,164451230 | \$ 156.579.512 |
| 3 | 14 | 0,203955143 | \$ 194.192.508 |
| 1 | 16 | 0,235403559 | \$ 224.135.597 |
| 14 | 15 | 0,289530845 | \$ 275.671.995 |
| 4 | 6 | 0,318299093 | \$ 303.063.205 |
| 2 | 7 | 0,345612596 | \$ 329.069.304 |
| 2 | 12 | 0,350280706 | \$ 333.513.968 |
| 4 | 8 | 0,354324798 | \$ 337.364.483 |
| 12 | 13 | 0,421564297 | \$ 401.385.457 |
| 5 | 6 | 0,437538391 | \$ 416.594.926 |
| 9 | 11 | 0,456105666 | \$ 434.273.449 |
| 10 | 11 | 0,456105666 | \$ 434.273.449 |
| 1 | 10 | 1,151731398 | \$ 1.096.601.959 |
| | | SUMA | \$ 5.183.562.727 |

Apéndice V. Resultados de Clúster 11

| Resultados árbol | | | |
|------------------|----------|--------------|------------------|
| o | d | doj | Costo |
| 3 | 15 | 0,0974678847 | \$ 82.438.144 |
| 4 | 8 | 0,1227998463 | \$ 103.863.867 |
| 6 | 11 | 0,1240390805 | \$ 104.912.009 |
| 3 | 4 | 0,1869354557 | \$ 158.109.638 |
| 3 | 6 | 0,1882873358 | \$ 159.253.056 |
| 9 | 14 | 0,1917221234 | \$ 162.158.192 |
| 11 | 12 | 0,2373747178 | \$ 200.771.066 |
| 10 | 14 | 0,2798818630 | \$ 236.723.525 |
| 2 | 8 | 0,3740286773 | \$ 316.352.714 |
| 5 | 13 | 0,4809383439 | \$ 406.776.698 |
| 10 | 12 | 0,5215475149 | \$ 441.123.855 |
| 1 | 15 | 0,6296565473 | \$ 532.562.260 |
| 10 | 13 | 0,8191692076 | \$ 692.851.693 |
| 7 | 13 | 1,1484568046 | \$ 971.362.490 |
| | | Suma | \$ 4.569.259.205 |

Apéndice W. Análisis de Salida y Escenarios

| | Modelo Actual | Modelo Propuesto | Diferencia | Porcentaje |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|
| COSTO DISTRIBUCION | \$ 8.755.909.845,69 | \$ 6.847.629.320,43 | \$ 1.908.280.525,26 | 22% |
| UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD | 86% | 99,5% | 13,5% | 13,6% |
| NÚMERO DE INSTALACIONES | 6 | 24 | 18 | |
| Déficit | 71,4 | 71,4 | 0 | 0 |
| TIEMPO DE ENTREGA | 7,949 | 7,015 | 0,934 | 11,8% |

| | Actual | Propuesto | Resumen |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|--|
| Costo de la operación logística | \$ 8.755.909.845,69 | \$ 6.847.629.320,43 | Disminuye en un 22% en el modelo propuesto |
| Tiempo de entrega al cliente | 7,949 | 7,015 | Disminuye en un 12% en el modelo propuesto |
| Nivel de servicio | 92% | 92% | Se mantiene igual |

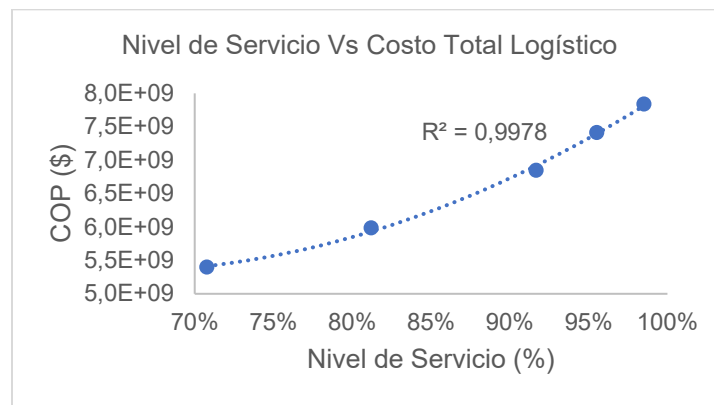
| MODELO ACTUAL | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| | <i>p0</i> | <i>p1</i> | <i>p2</i> | <i>p3</i> | <i>p4</i> | <i>p5</i> | TOTAL |
| <i>j1</i> | 0,5672 | 0,5842 | 0,6018 | 0,6198 | 0,6384 | 0,6576 | 3,6690 |
| <i>j2</i> | 2,9821 | 3,0715 | 3,1637 | 3,2586 | 3,3563 | 3,4570 | 19,2891 |
| <i>j3</i> | 0,0178 | 0,0183 | 0,0188 | 0,0194 | 0,0200 | 0,0206 | 0,1148 |
| <i>j4</i> | 0,4480 | 0,4614 | 0,4753 | 0,4895 | 0,5042 | 0,5193 | 2,8978 |
| <i>j5</i> | 0,1305 | 0,1344 | 0,1385 | 0,1426 | 0,1469 | 0,1513 | 0,8442 |
| <i>j6</i> | 2,2421 | 2,3093 | 2,3786 | 2,4500 | 2,5235 | 2,5992 | 14,5025 |
| <i>j7</i> | 0,1502 | 0,1547 | 0,1593 | 0,1641 | 0,1690 | 0,1741 | 0,9712 |
| <i>j8</i> | 0,0888 | 0,0914 | 0,0942 | 0,0970 | 0,0999 | 0,1029 | 0,5741 |
| <i>j9</i> | 2,5012 | 2,5763 | 2,6536 | 2,7332 | 2,8152 | 2,8996 | 16,1790 |
| <i>j10</i> | 0,6729 | 0,6931 | 0,7139 | 0,7353 | 0,7574 | 0,7801 | 4,3528 |
| <i>j11</i> | 1,2431 | 1,2804 | 1,3188 | 1,3584 | 1,3992 | 1,4411 | 8,0411 |
| <i>j12</i> | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0007 |
| TOTAL | 11,0439 | 11,3752 | 11,7165 | 12,0680 | 12,4300 | 12,8029 | 71,4364 |

| MODELO PROPUESTO | | | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | <i>p0</i> | <i>p1</i> | <i>p2</i> | <i>p3</i> | <i>p4</i> | <i>p5</i> | TOTAL |
| <i>j1</i> | 0,5672 | 0,5842 | 0,6018 | 0,6198 | 0,6384 | 0,6576 | 3,6690 |
| <i>j2</i> | 2,9821 | 3,0715 | 3,1637 | 3,2586 | 3,3563 | 3,4570 | 19,2891 |
| <i>j3</i> | 0,0178 | 0,0183 | 0,0188 | 0,0194 | 0,0200 | 0,0206 | 0,1148 |
| <i>j4</i> | 0,4480 | 0,4614 | 0,4753 | 0,4895 | 0,5042 | 0,5193 | 2,8978 |
| <i>j5</i> | 0,1305 | 0,1344 | 0,1385 | 0,1426 | 0,1469 | 0,1513 | 0,8442 |
| <i>j6</i> | 2,2421 | 2,3093 | 2,3786 | 2,4500 | 2,5235 | 2,5992 | 14,5025 |
| <i>j7</i> | 0,1502 | 0,1547 | 0,1593 | 0,1641 | 0,1690 | 0,1741 | 0,9712 |
| <i>j8</i> | 0,0888 | 0,0914 | 0,0942 | 0,0970 | 0,0999 | 0,1029 | 0,5741 |
| <i>j9</i> | 2,5012 | 2,5763 | 2,6536 | 2,7332 | 2,8152 | 2,8996 | 16,1790 |
| <i>j10</i> | 0,6729 | 0,6931 | 0,7139 | 0,7353 | 0,7574 | 0,7801 | 4,3528 |
| <i>j11</i> | 1,2431 | 1,2804 | 1,3188 | 1,3584 | 1,3992 | 1,4411 | 8,0411 |
| <i>j12</i> | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0007 |
| TOTAL | 11,0439 | 11,3752 | 11,7165 | 12,0680 | 12,4300 | 12,8029 | 71,4364 |

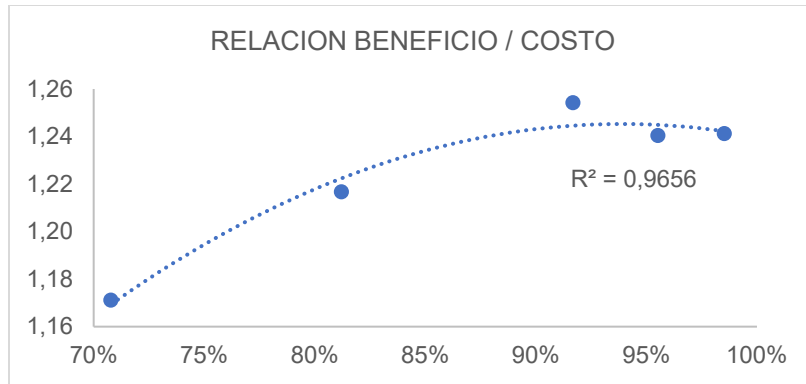
| CLÚSTER | 50% | 75% | Propuesta | Actual | 10% mejora | 20% mejora |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <i>j1</i> | 0,425 | 0,638 | 0,850 | 0,850 | 0,935 | 0,999 |
| <i>j2</i> | 0,430 | 0,645 | 0,860 | 0,860 | 0,946 | 0,999 |
| <i>j3</i> | 0,445 | 0,668 | 0,890 | 0,890 | 0,979 | 0,999 |
| <i>j4</i> | 0,365 | 0,548 | 0,730 | 0,730 | 0,803 | 0,876 |
| <i>j5</i> | 0,470 | 0,705 | 0,940 | 0,940 | 0,999 | 0,999 |
| <i>j6</i> | 0,400 | 0,600 | 0,800 | 0,800 | 0,880 | 0,960 |
| <i>j7</i> | 0,425 | 0,638 | 0,850 | 0,850 | 0,935 | 0,999 |
| <i>j8</i> | 0,490 | 0,735 | 0,980 | 0,980 | 0,999 | 0,999 |
| <i>j9</i> | 0,365 | 0,548 | 0,730 | 0,730 | 0,803 | 0,876 |
| <i>j10</i> | 0,425 | 0,638 | 0,850 | 0,850 | 0,935 | 0,999 |
| <i>j11</i> | 0,410 | 0,615 | 0,820 | 0,820 | 0,902 | 0,984 |
| <i>j12</i> | 0,455 | 0,683 | 0,910 | 0,910 | 0,999 | 0,999 |
| PROMEDIO | 0,425 | 0,638 | 0,851 | 0,851 | 0,926 | 0,974 |
| COSTO TOTAL | \$5.398.903.574,67 | \$5.984.265.686,63 | \$6.847.629.320,43 | \$8.755.909.845,69 | \$7.412.496.277,82 | \$7.839.141.254,02 |
| TIEMPO TOTAL | 4,77 | 4,67 | 7,95 | 7,02 | 8,52 | 7,58 |
| INVENTARIO | 195,08 | 0 | 64,098 | 0 | 0 | 53,67 |
| DEMANDA | 632,26 | 728,10 | 858,80 | 858,80 | 919,43 | 972,978 |
| INSTALACIONES | 8 | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 |
| DÉFICIT | 184,71 | 136,79 | 71,44 | 71,44 | 41,12 | 14,35 |
| Nivel de servicio | 71% | 81% | 92% | 92% | 96% | 99% |
| RELACION BENEFICIO / COSTO | 1,17 | 1,22 | 1,25 | 0,98 | 1,24 | 1,24 |
| Nivel de servicio | COSTO TOTAL | | INVENTARIO | | | |
| 71% | \$5.398.903.575 | | 195,08 | | | |

| | | |
|-----|-----------------|-------|
| 81% | \$5.984.265.687 | 0,00 |
| 92% | \$6.847.629.320 | 64,10 |
| 92% | \$8.755.909.846 | 0,00 |
| 96% | \$7.412.496.278 | 0,00 |
| 99% | \$7.839.141.254 | 53,67 |

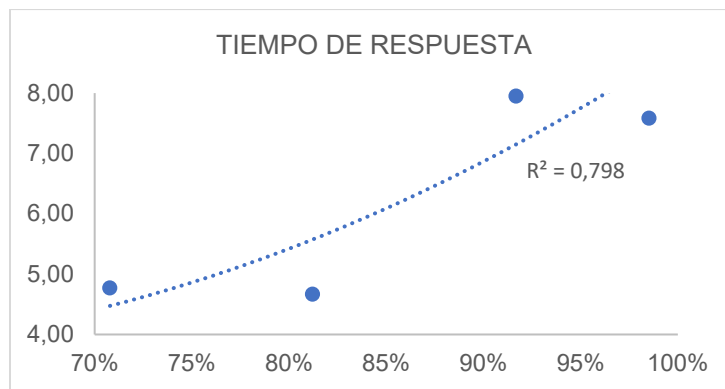
| Nivel de servicio | Costo Total |
|-------------------|-------------|
| 71% | 5,4E+09 |
| 81% | 6,0E+09 |
| 92% | 6,8E+09 |
| 96% | 7,4E+09 |
| 99% | 7,8E+09 |



| Nivel de servicio | Relación Beneficio/Costo |
|-------------------|--------------------------|
| 71% | 1,17 |
| 81% | 1,22 |
| 92% | 1,25 |
| 96% | 1,24 |
| 99% | 1,24 |



| Nivel de servicio | Tiempo de respuesta |
|-------------------|---------------------|
| 71% | 4,77 |
| 81% | 4,67 |
| 92% | 7,95 |
| 96% | 8,52 |
| 99% | 7,58 |



CAPACIDAD MODELO ACTUAL

| o | d | Capacidad Utilizada | Capacidad Máxima | Exceso Capacidad | Porcentaje utilización | Porcentaje promedio de utilización período planeación |
|----------|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| i1 | P0 | 0 | 71 | 71 | 0% | 44% |
| i1 | p1 | 68,376 | 103,6 | 35,224 | 66% | |
| i1 | P2 | 70,427 | 86,5 | 16,073 | 81% | |
| i1 | P3 | 72,4 | 72,4 | 0 | 100% | |
| i1 | P4 | 3,816 | 87,8 | 83,984 | 4% | |
| i1 | P5 | 7,057 | 54,1 | 47,043 | 13% | |
| i2 | P0 | 66,384 | 109,2 | 42,816 | 61% | 43% |
| i2 | p1 | 0 | 93,3 | 93,3 | 0% | |
| i2 | P2 | 0 | 50,8 | 50,8 | 0% | |
| i2 | P3 | 0,14 | 101,9 | 101,76 | 0% | |
| i2 | P4 | 70,9 | 70,99 | 0,09 | 100% | |
| i2 | P5 | 69,9 | 69,9 | 0 | 100% | |
| h2 | P0 | 66,384 | 77,428 | 11,044 | 86% | 86% |
| h2 | p1 | 68,376 | 79,751 | 11,375 | 86% | |
| h2 | P2 | 70,427 | 82,143 | 11,716 | 86% | |
| h2 | P3 | 72,54 | 84,608 | 12,068 | 86% | |
| h2 | P4 | 74,716 | 87,146 | 12,43 | 86% | |
| h2 | P5 | 76,957 | 89,76 | 12,803 | 86% | |

CAPACIDAD MODELO PROPUESTO

| o | d | Capacidad Utilizada | Capacidad Máxima | Exceso Capacidad | Porcentaje utilización | Porcentaje promedio de utilización período planeación |
|----------|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| i1 | p0 | | 71 | 71 | 0% | 32% |
| i1 | p1 | 46,565 | 103,6 | 57,035 | 45% | |
| i1 | p2 | 47,962 | 86,5 | 38,538 | 55% | |
| i1 | p3 | 49,401 | 72,4 | 22,999 | 68% | |
| i1 | p4 | 17,333 | 87,8 | 70,467 | 20% | |
| i1 | p5 | 0,363 | 54,1 | 53,737 | 1% | |
| i2 | p0 | 87,128 | 109,2 | 22,072 | 80% | 55% |
| i2 | p1 | 15,862 | 92,3 | 76,438 | 17% | |
| i2 | p2 | 16,338 | 50,8 | 34,462 | 32% | |
| i2 | p3 | 27,664 | 101,9 | 74,236 | 27% | |
| i2 | p4 | 50,883 | 70,9 | 20,017 | 72% | |
| i2 | p5 | 69,9 | 69,9 | 0 | 100% | |
| h1 | p0 | 0 | 7,058 | 7,058 | 0% | 0% |
| h1 | p1 | 0 | 7,27 | 7,27 | 0% | |
| h1 | p2 | 0 | 7,488 | 7,488 | 0% | |
| h1 | p3 | | 7,713 | 7,713 | 0% | |
| h1 | p4 | 0 | 7,944 | 7,944 | 0% | |
| h1 | p5 | 0 | 8,183 | 8,183 | 0% | |
| h2 | p0 | 45,209 | 46,2 | 0,991 | 98% | 98% |
| h2 | p1 | 46,565 | 47,586 | 1,021 | 98% | |
| h2 | p2 | 47,962 | 49,014 | 1,052 | 98% | |
| h2 | p3 | 49,401 | 50,484 | 1,083 | 98% | |
| h2 | p4 | 50,883 | 51,999 | 1,116 | 98% | |
| h2 | p5 | 52,41 | 53,559 | 1,149 | 98% | |
| h3 | p0 | | 11,55 | 11,55 | 0% | 0% |
| h3 | p1 | | 11,897 | 11,897 | 0% | |
| h3 | p2 | | 12,253 | 12,253 | 0% | |
| h3 | p3 | | 12,621 | 12,621 | 0% | |
| h3 | p4 | | 13 | 13 | 0% | |
| h3 | p5 | | 13,39 | 13,39 | 0% | |
| h4 | p0 | 15,4 | 15,4 | 0 | 100% | 100% |
| h4 | p1 | 15,862 | 15,862 | 0 | 100% | |
| h4 | p2 | 16,338 | 16,338 | 0 | 100% | |
| h4 | p3 | 16,828 | 16,828 | 0 | 100% | |
| h4 | p4 | 17,333 | 17,333 | 0 | 100% | |
| h4 | p5 | 17,853 | 17,853 | 0 | 100% | |
| k1 | p0 | | 3,208 | 3,208 | 0% | 0% |
| k1 | p1 | | 3,305 | 3,305 | 0% | |

CAPACIDAD MODELO PROPUESTO

| o | d | Capacidad Utilizada | Capacidad Máxima | Exceso Capacidad | Porcentaje utilización | Porcentaje promedio de utilización período planeación | |
|----------|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|----|
| k1 | p2 | | 3,404 | 3,404 | 0% | | |
| k1 | p3 | | 3,506 | 3,506 | 0% | | |
| k1 | p4 | | 3,611 | 3,611 | 0% | | |
| k1 | p5 | | 3,719 | 3,719 | 0% | | |
| k2 | p0 | | 3,208 | 3,208 | 0% | | 0% |
| k2 | p1 | | 3,305 | 3,305 | 0% | | |
| k2 | p2 | | 3,404 | 3,404 | 0% | | |
| k2 | p3 | | 3,506 | 3,506 | 0% | | |
| k2 | p4 | | 3,611 | 3,611 | 0% | | |
| k2 | p5 | | 3,719 | 3,719 | 0% | | |
| k3 | p0 | | 5,775 | 5,775 | 0% | | |
| k3 | p1 | | 5,948 | 5,948 | 0% | | |
| k3 | p2 | | 6,127 | 6,127 | 0% | | 0% |
| k3 | p3 | | 6,311 | 6,311 | 0% | | |
| k3 | p4 | | 6,5 | 6,5 | 0% | | |
| k3 | p5 | | 6,695 | 6,695 | 0% | | |
| k4 | p0 | | 3,85 | 3,85 | 0% | | |
| k4 | p1 | | 3,966 | 3,966 | 0% | | |
| k4 | p2 | | 4,084 | 4,084 | 0% | | 0% |
| k4 | p3 | | 4,207 | 4,207 | 0% | | |
| k4 | p4 | | 4,333 | 4,333 | 0% | | |
| k4 | p5 | | 4,463 | 4,463 | 0% | | |
| k5 | p0 | | 3,208 | 3,208 | 0% | | |
| k5 | p1 | | 3,305 | 3,305 | 0% | | |
| k5 | p2 | | 3,404 | 3,404 | 0% | | 0% |
| k5 | p3 | | 3,506 | 3,506 | 0% | | |
| k5 | p4 | | 3,611 | 3,611 | 0% | | |
| k5 | p5 | | 3,719 | 3,719 | 0% | | |
| l1 | p0 | | 3,208 | 3,208 | 0% | | |
| l1 | p1 | | 3,305 | 3,305 | 0% | | |
| l1 | p2 | | 3,404 | 3,404 | 0% | | 0% |
| l1 | p3 | | 3,5 | 3,5 | 0% | | |
| l1 | p4 | | 3,611 | 3,611 | 0% | | |
| l1 | p5 | | 3,719 | 3,719 | 0% | | |
| l2 | p0 | | 2,567 | 2,567 | 0% | | |
| l2 | p1 | | 2,644 | 2,644 | 0% | | 0% |
| l2 | p2 | | 2,723 | 2,723 | 0% | | |
| l2 | p3 | | 2,805 | 2,805 | 0% | | |

CAPACIDAD MODELO PROPUESTO

| o | d | Capacidad Utilizada | Capacidad Máxima | Exceso Capacidad | Porcentaje utilización | Porcentaje promedio de utilización período planeación |
|----------|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| 12 | p4 | | 2,889 | 2,889 | 0% | |
| 12 | p5 | | 2,975 | 2,975 | 0% | |
| 13 | p0 | 2,567 | 2,567 | 0 | 100% | 100% |
| 13 | p1 | 2,644 | 2,644 | 0 | 100% | |
| 13 | p2 | 2,723 | 2,723 | 0 | 100% | |
| 13 | p3 | 2,805 | 2,805 | 0 | 100% | |
| 13 | p4 | 2,889 | 2,889 | 0 | 100% | |
| 13 | p5 | 2,975 | 2,975 | 0 | 100% | |
| 14 | p0 | | 1,925 | 1,925 | 0% | 0% |
| 14 | p1 | | 1,983 | 1,983 | 0% | |
| 14 | p2 | | 2,042 | 2,042 | 0% | |
| 14 | p3 | | 2,104 | 2,104 | 0% | |
| 14 | p4 | | 2,167 | 2,167 | 0% | |
| 14 | p5 | | 2,232 | 2,232 | 0% | |
| 15 | p0 | | 3,208 | 3,208 | 0% | 0% |
| 15 | p1 | | 3,305 | 3,305 | 0% | |
| 15 | p2 | | 3,404 | 3,404 | 0% | |
| 15 | p3 | | 3,506 | 3,506 | 0% | |
| 15 | p4 | | 3,611 | 3,611 | 0% | |
| 15 | p5 | | 3,719 | 3,719 | 0% | |
| 16 | p0 | 3,208 | 3,208 | 0 | 100% | 100% |
| 16 | p1 | 3,305 | 3,305 | 0 | 100% | |
| 16 | p2 | 3,404 | 3,404 | 0 | 100% | |
| 16 | p3 | 3,506 | 3,506 | 0 | 100% | |
| 16 | p4 | 3,611 | 3,611 | 0 | 100% | |
| 16 | p5 | 3,719 | 3,719 | 0 | 100% | |

| Período | Cliente | Actual | Propuesto |
|---------|---------|---------|-----------|
| P0 | J1 | 23,133 | 21,645 |
| P1 | J1 | 23,827 | 5,699 |
| P2 | J1 | 24,541 | 5,87 |
| P3 | J1 | 25,278 | 6,046 |
| P4 | J1 | 26,036 | 5,268 |
| P5 | J1 | 26,817 | 5,426 |
| P0 | J2 | 12,332 | 16,734 |
| P1 | J2 | 12,702 | 17,236 |
| P2 | J2 | 13,083 | 17,754 |
| P3 | J2 | 13,476 | 18,286 |
| P4 | J2 | 13,88 | 18,835 |
| P5 | J2 | 14,297 | 19,4 |
| P0 | J3 | 3,237 | 3,246 |
| P1 | J3 | 3,335 | 3,343 |
| P2 | J3 | 3,435 | 3,44 |
| P3 | J3 | 3,538 | 3,547 |
| P4 | J3 | 3,644 | 3,653 |
| P5 | J3 | 3,753 | 3,763 |
| P0 | J4 | 20,504 | 16,926 |
| P1 | J4 | 21,119 | 17,433 |
| P2 | J4 | 21,752 | 8,986 |
| P3 | J4 | 11,166 | 18,495 |
| P4 | J4 | 11,501 | 19,05 |
| P5 | J4 | 11,846 | 19,621 |
| P0 | J5 | 36,717 | 11,546 |
| P1 | J5 | 37,819 | 11,893 |
| P2 | J5 | 38,953 | 39,43 |
| P3 | J5 | 40,122 | 40,613 |
| P4 | J5 | 41,326 | 41,832 |
| P5 | J5 | 42,565 | 43,086 |
| P0 | J6 | 212,001 | 214,317 |
| P1 | J6 | 218,361 | 220,747 |
| P2 | J6 | 224,911 | 227,369 |
| P3 | J6 | 231,659 | 234,19 |
| P4 | J6 | 238,609 | 241,216 |
| P5 | J6 | 245,767 | 248,453 |
| P0 | J7 | 7,694 | 7,818 |
| P1 | J7 | 7,925 | 8,052 |
| P2 | J7 | 8,162 | 8,294 |
| P3 | J7 | 6,108 | 6,165 |
| P4 | J7 | 6,292 | 6,165 |
| P5 | J7 | 6,48 | 6,54 |
| P0 | J8 | 12,634 | 13,184 |
| P1 | J8 | 13,013 | 13,579 |
| P2 | J8 | 13,403 | 13,987 |

| Período | Cliente | Actual | Propuesto |
|---------|---------|--------|-----------|
| P3 | J8 | 10,026 | 10,277 |
| P4 | J8 | 10,327 | 10,585 |
| P5 | J8 | 10,637 | 10,903 |
| P0 | J9 | 73,089 | 1,113 |
| P1 | J9 | 75,28 | 1,147 |
| P2 | J9 | 77,541 | 1,181 |
| P3 | J9 | 79,867 | 4,028 |
| P4 | J9 | 41,001 | 4,149 |
| P5 | J9 | 84,731 | 2,363 |
| P0 | J10 | 33,655 | 34,21 |
| P1 | J10 | 34,665 | 35,238 |
| P2 | J10 | 35,705 | 37,668 |
| P3 | J10 | 36,776 | 38,798 |
| P4 | J10 | 37,879 | 38,505 |
| P5 | J10 | 78,285 | 79,36 |
| P0 | J11 | 22,129 | 42,232 |
| P1 | J11 | 22,793 | 54,125 |
| P2 | J11 | 23,477 | 49,506 |
| P3 | J11 | 24,18 | 50,991 |
| P4 | J11 | 24,907 | 57,04 |
| P5 | J11 | 25,654 | 58,751 |
| P0 | J12 | 0,014 | 0,014 |
| P1 | J12 | 0,014 | 0,014 |
| P2 | J12 | 0,007 | 0,007 |
| P3 | J12 | 0,007 | 0,008 |
| P4 | J12 | 0,008 | 0,008 |
| P5 | J12 | 0,008 | 0,008 |

2901,415 2560,407

| | h2=C-D Bogotá | h4=C-D Medellín | l3=Pereira | l6=Villavicenci o |
|-----------------|------------------|--------------------|------------|----------------------|
| i1=Barranquilla | 144,291 | 17,333 | 0 | 0 |
| i2=Buenaventura | 148,166 | 82,281 | 16,602 | 20,753 |

| | j1 | j2 | j3 | j4 | j5 | j6 | j7 | j8 | j9 | j10 | j11 | j12 |
|--------------------|---------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| h2=C-D Bogotá | 3,606 | 137,779 | 1,044 | | 9,654 | 72,513 | 6,475 | 28,706 | | 21,993 | 10,653 | 0,006 |
| h4=C-D Medellín | 6,818 | | | 10,732 | 4,416 | | | | 59,922 | 7,026 | 10,700 | |
| l3=Pereira | 14,036 | | | | | | | | | | 2,567 | |
| l6=Villavicencio | | | | | | | | | | | 20,753 | |
| TOTALES | 24,460 | 137,779 | 1,044 | 10,732 | 14,070 | 72,513 | 6,475 | 28,706 | 59,922 | 29,018 | 44,673 | 0,006 |