

**ESTUDIO DEL PROBLEMA DE CONFORMACIÓN DE LOTES EN EL  
ALISTAMIENTO DE PEDIDOS, VALIDADO EN UN ALMACÉN DE MATERIAS  
PRIMAS DEL SECTOR TEXTIL COLOMBIANO**

**JULIÁN ANDRÉS CADENA HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
BUCARAMANGA  
2015**

**ESTUDIO DEL PROBLEMA DE CONFORMACIÓN DE LOTES EN EL  
ALISTAMIENTO DE PEDIDOS, VALIDADO EN UN ALMACÉN DE MATERIAS  
PRIMAS DEL SECTOR TEXTIL COLOMBIANO**

**JULIÁN ANDRÉS CADENA HERNÁNDEZ**

**Tesis de grado presentada para optar al título de:  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Director:**

**CARLOS EDUARDO DIAZ BOHORQUEZ  
Ing. Industrial y Msc. en Ingeniería Industrial**

**Grupo de Investigación:**

**OPTIMIZACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS,  
ADMINISTRATIVOS Y LOGÍSTICOS –OPALO-**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
BUCARAMANGA**

**2015**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>2. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>13</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. ....	13
2.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. ....	13
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>4. CARACTERIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL ALMACEN DE ROLLOS DE TELA ESTUDIADO.....</b>	<b>18</b>
<b>5. MODELO MATEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONFORMACIÓN DE LOTES.....</b>	<b>19</b>
5.1. MODELO MATEMÁTICO.....	19
5.2. ALGORITMOS SEMILLA. ....	21
5.2.1. Reglas de selección de semilla cuando no se dividen los pedidos. ....	21
5.2.2. Reglas de adición de órdenes cuando no se dividen los pedidos.....	22
5.2.3. Reglas de selección de semilla cuando se dividen los pedidos. ....	23
5.2.4. Reglas de adición cuando se dividen los pedidos.....	24
5.2.5. Zona de consolidación. ....	25
5.3. ALGORITMOS GENÉTICOS.....	26
5.3.1. Codificación de la solución.....	26
5.3.2. Selección. ....	27
5.3.3. Cruce. ....	27
5.3.4. Mutación. ....	28
5.3.5. Supervivencia. ....	28
5.3.6. Parámetros del Algoritmo Genético. ....	28
<b>6. FUNCIÓN DE DESEMPEÑO.....</b>	<b>29</b>
<b>7. POLÍTICA DE RUTEO. ....</b>	<b>29</b>
<b>8. SIMULACIÓN. ....</b>	<b>30</b>
<b>9. VALIDACIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....</b>	<b>32</b>

10.1. TIEMPO TOTAL DE ALISTAMIENTO.....	32
10.2. DISTANCIA TOTAL RECORRIDA.....	36
10.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS TIEMPOS DE EXTRACCIÓN EN ALGORITMOS SEMILLA CUANDO SE DIVIDEN LAS ÓRDENES.....	36
10.4. TIEMPOS DE CÓMPUTO .....	36
<b>11. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>38</b>
<b>12. RECOMENDACIONES. ....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>40</b>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Metodología de la investigación. ....	13
<b>FIGURA 2.</b> Políticas de ruteo para almacenes de bloque sencillo (heurísticas). ....	16
<b>FIGURA 3.</b> Framework de la investigación. ....	20
<b>FIGURA 4.</b> Zona consolidación. ....	25
<b>FIGURA 5.</b> Ejemplo Método de codificación. ....	27
<b>FIGURA 6.</b> Desempeño tiempo promedio reglas selección y adición sin dividir órdenes. ....	33
<b>FIGURA 7.</b> Desempeño tiempo promedio reglas selección y adición dividiendo órdenes. ....	34
<b>FIGURA 8.</b> Comparación tiempos totales promedio AG con población=40 vs combinación SNPA-SAMED. ....	35
<b>FIGURA 9.</b> Comportamiento tiempos de cómputo AG cuando aumenta número de pedidos. ....	37

## LISTADO DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> Parámetros AG.....	28
<b>TABLA 2.</b> Frecuencia de unidades despachadas por pedido, primer semestre año 2013. ....	31
<b>TABLA 3.</b> Resumen muestra pedidos empresa COMERTEX S.A. ....	32

## LISTADO DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> Ejemplo de recorrido en el almacén con una política de punto medio para almacén de más de un bloque.....	43
<b>ANEXO B.</b> Resultados sobre el tiempo total de alistamiento para los métodos estudiados. ....	44
<b>ANEXO C.</b> Resultado análisis estadístico para el tiempo total de alistamiento.....	46
<b>ANEXO D.</b> Resultados sobre la distancia total recorrida para los métodos estudiados. ....	49
<b>ANEXO E.</b> Resultados análisis estadístico para la distancia total recorrida.....	51
<b>ANEXO F.</b> Tiempos de extracción unitario (segundos) en algoritmos semilla que dividen las órdenes que se requieren para igualar el tiempo total del AG con 40 poblaciones. ....	52
<b>ANEXO G.</b> Resultados en tiempos de cómputo para los métodos estudiados. ....	53

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DEL PROBLEMA DE CONFORMACIÓN DE LOTES EN EL ALISTAMIENTO DE PEDIDOS, VALIDADO EN UN ALMACÉN DE MATERIAS PRIMAS DEL SECTOR TEXTIL COLOMBIANO\*.

**AUTOR:** JULIÁN ANDRÉS CADENA HERNÁNDEZ\*+.

**PALABRAS CLAVE:** Alistamiento de pedidos, Gestión de almacenes, Conformación de lotes, Políticas de ruteo, Algoritmos semilla, Algoritmos Genéticos.

### CONTENIDO

Este documento presenta un estudio del problema de conformación de lotes (Order Batching Problem, OBP por sus siglas en inglés), validado en un almacén de rollos de tela del sector textil colombiano, con el propósito de reducir los tiempos de alistamiento. Se presentan nuevos algoritmos semilla, los cuales permiten dividir las órdenes de los clientes para el alistamiento, considerando el tiempo de reclasificación de cada producto en su orden de pedido respectiva cuando finaliza la recolección de cada lote. Así mismo, se utiliza un algoritmo genético como otra estrategia para agrupar órdenes. El desempeño de los métodos propuestos se compara con la heurística FCFS, y las reglas de selección de semilla y de adición de órdenes que mostraron buen comportamiento en los algoritmos presentados en Ho, Su & Zhi (2008) y Ho & Tseng (2006). Para simular los recorridos en el almacén, se usó la política de ruteo de punto medio en un almacén de dos bloques que opera con un sistema de preparación de pedidos que utiliza múltiples recursos de alistamiento. Finalmente, el problema se simuló en MATLAB con datos reales de la empresa COMERTEX y se comparó el funcionamiento de los diferentes métodos estudiados. La simulación arrojó los datos para realizar el análisis estadístico del tiempo de alistamiento, las distancias recorridas y los tiempos de cómputo.

---

\* Tesis de Maestría

\*+ Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.  
Director: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

## ABSTRACT

**TITLE:** ORDER BATCHING STUDY IN PICKING PROCESS, VALIDATED IN A RAW MATERIALS WAREHOUSE OF COLOMBIAN TEXTILE SECTOR\*.

**AUTHOR:** JULIÁN ANDRÉS CADENA HERNÁNDEZ<sup>\*+</sup>.

**KEYWORDS:** Picking process, Warehouse Management, Batching, Routing policy, Seed Algorithms, Genetic Algorithms.

### DESCRIPTION

This document presents a study about the order batching problem, validated in rolls of fabric warehouse of the Colombian textile sector, with the purpose of reduce the picking process time. New seed algorithms are presented, which allow split the customer orders, considering the time of reclassification of each product in its respective order when finishes the collection of each batch. Likewise, a genetic algorithm is used as another strategy for grouping orders. The performance of the proposed methods is compared with heuristic FCFS, and the seed selection and orders addition rules that showed good performance in the algorithms presented in Ho, Su & Zhi (2008) and Ho & Tseng (2006). To simulate the routes in the warehouse, the mid-point routing policy was used in a two blocks warehouse that operates with an order picking system that uses multiple picking facilities. Finally, the problem was simulated in MATLAB with real data of the company COMERTEX and the performance of the different methods was studied. The simulation showed the data for statistical analysis of the picking time, travel time and computational time.

---

\* MSc Thesis

<sup>\*+</sup> Faculty of Engineering Physicomechanical. School of Industrial and Business Studies. Director: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

## INTRODUCCIÓN

El sector textil Colombiano representa el 1,2% del PIB nacional y genera cerca del 20% del empleo industrial. Los números no favorecen a las empresas manufactureras y comercializadoras de materias primas del sector textil. Entre Enero y Julio de 2012, la producción y venta de productos textiles de materias primas en Colombia como hilaturas, artículos de cuero y tejidos de punto disminuyó a pesar del incremento de la producción de productos terminados como prendas de vestir o calzado (**INEXMODA, 2012**).

La escasa diferenciación en productos como rollos de tela o hilazas, ha ocasionado una competencia fuerte en precio y servicio. Las empresas por lo tanto, deben buscar estrategias para disminuir sus costos con un servicio diferenciado.

El alistamiento de pedidos impacta los costos de las organizaciones y el servicio. **Frazelle (2001)** resalta el alistamiento como la actividad de más alta prioridad para mejorar la productividad y la señalan como la más costosa dentro de los costos de almacenamiento, asociándola con el 50% de los costos de operación del almacén. **De Koster, Roodbergen & Van Voorden (1999a)**, destacan la importancia de estudiar el proceso por razones como: (1) las compañías reclaman entregas rápidas y oportunas, (2) en algunos mercados los tiempos de entrega cortos son vistos como una ventaja competitiva, (3) las entregas cada vez son más pequeñas y frecuentes lo que incrementa el trabajo en los almacenes y (4) el incremento de actividades de valor agregado durante o después del alistamiento de pedidos.

La literatura presenta estrategias para mejorar los tiempos de alistamiento de pedidos, siendo las más utilizadas: (1) La política de almacenamiento, (2) la política de ruteo y (3) la política de conformación de lotes. Esta investigación presenta un estudio del problema de conformación de lotes para el alistamiento de pedidos en almacenes de rollos de tela, validando las políticas consideradas, en el contexto real de una empresa representativa del sector textil colombiano; sin embargo, los métodos acá presentados serán útiles en otras industrias.

El documento se estructura de la siguiente manera: En la sección 2 se presentan los objetivos propuestos y la metodología de investigación. En la sección 3 se encuentra la revisión de literatura, la cual está enfocada en el proceso de alistamiento de pedidos y el problema de conformación de lotes. La sección 4 presenta una caracterización de la operación de los almacenes de rollos tela. En la sección 5 se explican el modelo matemático y los métodos de conformación de lotes estudiados. La sección 6 detalla la política de ruteo utilizada para evaluar los tiempos de alistamiento, la cual corresponde a una adaptación de la política de punto medio para almacenes de bloque sencillo. La sección 7 resume las características de la simulación realizada. La sección 8 presenta los supuestos de la simulación y en la sección 9 se presenta la validación, mencionando algunos de los problemas que puede resolver la conformación de lotes en un almacén de rollos de telas del sector textil y las instancias utilizadas para validar el estudio. En la sección 10 se muestra el análisis estadístico, que permitió comparar los métodos de conformación de lotes estudiados en función de las variables de interés. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## 2. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. OBJETIVO GENERAL.

Definir políticas de conformación de lotes en almacenes de materias primas del sector textil colombiano, para identificar aquella que arroje mejores resultados sobre los tiempos de alistamiento de pedidos.

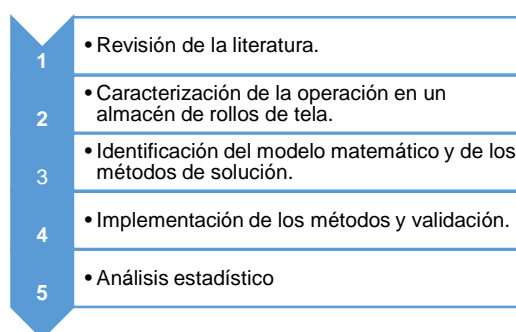
### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar una revisión de literatura acerca del problema de conformación de lotes (Order Batching Problem) para estudiar a profundidad ese problema de decisión del proceso de alistamiento de pedidos.
- Diseñar el modelo matemático para resolver el problema de conformación de lotes (OBP) en almacenes de materias primas del sector textil colombiano.
- Utilizar métodos de solución a través de heurísticas y metaheurísticas (algoritmos semilla, algoritmos FCFS y algoritmos genéticos), para definir políticas de conformación de lotes en almacenes de materias primas del sector textil colombiano.
- Realizar un análisis estadístico para identificar entre las políticas de conformación de lotes estudiadas, aquella que arroje mejores resultados sobre los tiempos de alistamiento en almacenes de materias primas del sector textil colombiano.

### 2.3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La metodología que facilitó el desarrollo de esta investigación consta de cinco etapas representadas en la **figura 1**. Este trabajo tuvo como punto de partida la revisión de literatura; luego se realizó la modelación matemática y se definieron los métodos de conformación de lotes estudiados. A continuación, por simulación se obtuvieron datos para cada método de conformación de lotes en las variables de interés, que son los tiempos de alistamiento, las distancias recorridas y los tiempos de cómputo. Al final se efectuó el análisis estadístico, que permitió generar conclusiones y recomendaciones.

FIGURA 1. Metodología de la investigación.



- *Revisión de la literatura.* Se realizó una búsqueda en bases de datos internacionales utilizando palabras claves como *picking* (alistamiento de pedidos), *batching* (conformación de lotes), *routing policy* (política de ruteo), entre otras. Se encontraron 54 artículos asociados al alistamiento de pedidos y el OBP, lo que permitió conocer el modelo

matemático de este problema y distintos métodos de solución utilizados para resolverlo, identificando aquellos que presentaron mejores resultados. La revisión bibliográfica también permitió identificar la metodología utilizada para estudiar el OBP y los espacios de investigación disponibles. Como producto de esta revisión de literatura se publicó el trabajo de **Cadena & Díaz (2014)**.

- *Caracterización de la operación en el almacén estudiado.* En la literatura no es común encontrar caracterizaciones de un sector de la industria en particular para aplicar los métodos de conformación de lotes. Las investigaciones tienen un propósito académico, y se evalúan instancias donde se agrega complejidad en variables como el sistema de preparación de pedidos, el número de bloques en el almacén, considerar desplazamientos verticales, etc. Una de las excepciones es el estudio aplicado de **De Koster et al. (1999a)**.

Esta investigación presenta un estudio validado para un almacén de dos bloques, el alistamiento se realiza en las ubicaciones de almacenamiento de altura por personas, y en las ubicaciones altas con elevadores de tijera operados también por personas. Los productos a recoger son rollos de tela.

- *Identificación del modelo matemático y de los métodos de solución.* El OBP es un problema combinatorio NP-hard por ser una variante del problema del vendedor viajero. Esta investigación introduce dos variantes al modelo general del OBP: (1) la división de órdenes para la conformación de lotes y (2) el uso de múltiples recursos de alistamiento. Además, los modelos son probados en un almacén de dos bloques. De la literatura se extraen la heurística FCFS y los algoritmos semilla de buen comportamiento en **Ho et al. (2008)** para compararlos con los métodos propuestos en este documento, que son un Algoritmo Genético –AG- y algoritmos semilla que contemplan la división de la orden de pedido.
- *Implementación en una herramienta tecnológica y validación de los métodos de conformación de lotes estudiados.* Se elaboró en MATLAB una herramienta de simulación para obtener de cada método estudiado el tiempo de alistamiento, las distancias recorridas y los tiempos de cómputo. Para la validación se utilizó una muestra de pedidos reales, obteniendo resultados en 20 instancias distintas para diferente número de pedidos.
- *Análisis estadístico.* Utilizando el software SPSS se realizaron pruebas ANOVA para identificar entre los métodos de conformación de lotes estudiados, aquellos con mejor desempeño en las variables de interés.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

**De Koster, Le Duc & Zaerpour (2011)** definen el alistamiento de pedidos como el proceso de recuperación de productos de la zona de almacenamiento como respuesta a una petición específica del cliente. Una definición más completa es mencionada en **Hall (1993)**: Es un proceso por el cual los elementos se recuperan de lugares de almacenamiento. Las tareas de este proceso comienzan con la conversión de una orden o pedido de los clientes en una lista de preparación, que especifica la ubicación de cada tipo de artículo, sus cantidades y la secuencia en la que serán recuperados de la zona de almacenamiento por el alistador. Este último, es la persona que se desplaza a través del almacén recogiendo los artículos y los lleva a una ubicación específica para su embalaje y transporte.

En la literatura de gestión de almacenes se resalta la importancia del proceso de alistamiento de pedidos. Un primer factor que demuestra su relevancia, es su alta participación en los costos totales de almacenamiento. **Ghiani, Laporte & Musmanno (2004)** agrupan los costos de almacenamiento en cuatro actividades principales: (1) la recepción de los productos, (2) mantener inventarios, (3) el alistamiento de pedidos y (4) el embalaje y transporte de los pedidos, siendo el alistamiento la más costosa de esas actividades con un 50% de participación. **Coyle, Bardi & Langley (1996)** mencionan que el alistamiento de pedidos representa entre el 50% y el 75% de los costos totales del almacén.

Un segundo factor que le añade trascendencia al alistamiento de pedidos, es la relación que existe entre este proceso y las decisiones estratégicas de las organizaciones. **Dekker, De Koster & Roodbergen (2004)** señalan que el proceso demanda eficiencia debido a los cambios en los requerimientos de los clientes, quienes ahora tienden a pedir tarde y esperan entregas más rápidas.

En la literatura se presentan tres decisiones para mejorar los tiempos de alistamiento que están bajo el control de las organizaciones: (1) La política de almacenamiento; (2) la política de ruteo y (3) la conformación de lotes.

Una política de almacenamiento busca proveer una forma efectiva de localizar los artículos con el fin de reducir los esfuerzos en la preparación de pedidos (**Pan, Shih & Wu, 2012**). Las tres políticas más comunes son almacenamiento aleatorio, almacenamiento dedicado y almacenamiento por clases (**Hausman, Schwarz & Graves, 1976**). La primera asigna cada producto a una posición vacía arbitrariamente seleccionada en el almacén, la segunda determina para cada producto una posición fija en el almacén y la tercera elige el lugar de almacenamiento dependiendo del tipo de producto, las características físicas, la cantidad de alistamientos o cualquier combinación de esas tres características (**Dekker et al., 2004**). **De Koster, Le-Duc & Roodbergen (2007)** describen las políticas de almacenamiento con más detalle y complementan la clasificación antes mencionada con dos políticas de almacenamiento adicionales. Una es la ubicación más cercana abierta, donde los mismos operarios seleccionan el lugar de almacenamiento, y la otra es el almacenamiento por rotación (*full-turnover*), donde los productos con altos niveles de ventas se almacenan en los lugares de más fácil acceso y los productos de bajo movimiento se almacenan en lugares alejados.

La política de ruteo consiste en encontrar una secuencia en la que los productos son recuperados de su lugar de almacenamiento de tal forma que las distancias de viaje sean mínimas (**Roodbergen & De Koster, 2001**). Este problema se ha resuelto en la literatura por métodos exactos o por heurísticas. Un algoritmo óptimo de ruteo –método exacto- para almacenes con dos pasillos transversales fue desarrollado por **Ratliff & Rosenthal (1983)**, pero extenderlo para almacenes con más pasillos no es sencillo, por esta razón se utilizan heurísticas.

Las heurísticas para resolver el ruteo se plantean en la literatura de acuerdo al diseño del almacén. En la **figura 2** se observan las heurísticas para almacenes de bloque sencillo (dos pasillos transversales), las cuales son explicadas en **De Koster et al. (2007)**.

**FIGURA 2. Políticas de ruteo para almacenes de bloque sencillo (heurísticas).**



**Fuente:** Design and control of warehouse order picking: A literature review. De Koster et al (2007).

Para almacenes con más de dos pasillos transversales (que tienen más de un bloque) en **Roodbergen & De Koster (2001)** se presentan cuatro tipos de heurísticas para realizar ruteo, dos son adaptaciones de políticas de almacenes de bloque sencillo: la política de forma de S y la del mayor espacio. La tercera heurística es la estrategia propuesta por **Vaughan & Petersen (1999)**; ellos demostraron utilizando un algoritmo de programación dinámica, que el tiempo de alistamiento disminuye a medida que aumentan los pasillos transversales, bajo la premisa que los pasillos longitudinales se visitan una sola vez. La cuarta heurística es un método de heurísticas combinadas que también utiliza programación dinámica, pero el recorrido no se realiza visitando pasillos completos, sino que cada subpasillo longitudinal se visita una sola vez.

La tercera decisión o política que se utiliza para disminuir los tiempos de alistamiento es la conformación de lotes, que es el problema objeto de estudio en esta investigación. La conformación de lotes es una estrategia que reúne productos de órdenes diferentes y los recoge juntos, lo que resulta en la disminución de las distancias de viaje y menor tiempo de recolección (**Lin & Lu, 1999**). Es conocido por sus siglas en inglés como el OBP (Order Batching Problem) y es uno de los problemas más estudiados en la literatura de gestión de almacenes.

El OBP es un problema combinatorio complejo, por lo tanto cuando se estudian instancias grandes es complejo encontrar soluciones óptimas. **Hen & Wäscher (2012)** señalaron que para instancias

de varias órdenes es inevitable buscar la solución del problema de conformación de lotes a través de heurísticas y las agrupan en cinco tipos:

1. Algoritmos basados en una regla de prioridad (rule based algorithms),
2. Algoritmos semillas (seed algorithms),
3. Algoritmos de ahorro (saving algorithms),
4. Metaheurísticas y
5. Enfoques con minería de datos.

El algoritmo de conformación de lotes basado en una regla de prioridad más conocido es el **FCFS** (First Come First Served), donde las órdenes se atienden en el orden de llegada hasta cumplir la capacidad del recurso de alistamiento. Se utiliza como benchmarking para comparar el desempeño de esta heurística frente a otros métodos propuestos por los investigadores, por ejemplo en **De Koster, Van der Poort & Wolters (1999b)**, donde los algoritmos propuestos mejoran el desempeño de dicha regla.

La conformación de lotes por algoritmos semilla consta de tres componentes (**De Koster et al. (1999b)**): (1) la regla de selección de la semilla. (2) la regla de adición de órdenes y (3) la forma de acumulación de la semilla. La primera regla hace referencia a la forma en que se elige la orden semilla del conjunto de órdenes disponibles, por ejemplo, elegir una orden aleatoriamente. La segunda regla indica la forma en que son adicionadas las órdenes a la semilla hasta cumplir la capacidad del recurso de alistamiento, por ejemplo, la orden que genere una menor cantidad de pasillos adicionales para visitar. La tercera regla indica si la orden o pedido semilla se mantiene siempre y es elegida una sola vez (semilla sencilla), o si la semilla se renueva cada vez que ingresa una orden al lote (semilla acumulativa). En la literatura se ha demostrado en varios trabajos que la regla acumulativa ha dado mejores resultados que la sencilla (ver **De Koster et al., 1999b** y **Ho et al., 2008**).

Algunos trabajos de investigación donde se utilizan algoritmos semillas se mencionan a continuación. **Elsayed (1981)** presentó cuatro algoritmos para almacenes con AS/RS (sistemas automatizados de almacenaje y recuperación) en los cuales la principal diferencia es la selección de la semilla. Los resultados no muestran conclusiones concretas sobre la superioridad de alguno de los algoritmos. Sin embargo se concluyó que la naturaleza de las órdenes y la capacidad del vehículo tienen incidencia en los resultados. **Elsayed & Stern (1983)** examinaron 24 algoritmos para almacenes con AS/RS y ninguno presentó resultados superiores. Sin embargo concluyeron que la regla de selección acumulativa genera mejores resultados que la sencilla. **Hwang, Baek & Lees (1988)** basados en dos vectores de atributos y tres medidas de similaridad desarrollaron seis algoritmos para almacenes con AS/RS, dos de los cuales produjeron los mejores resultados y tuvieron un mejor desempeño que los de **Elsayed & Stern (1983)**. **Gibson & Sharp (1992)** para almacenes con AS/RS presentaron dos nuevos métodos para algoritmos semillas: SMD (Mínima distancia secuencial) y 4D SFC (Curvas de relleno en cuatro dimensiones). **Pan & Liu (1995)** estudiaron algoritmos semillas para almacenes con AS/RS y concluyeron que la capacidad de la máquina tiene incidencia en el desempeño de los algoritmos y recomiendan algunos dependiendo del tamaño de dicha capacidad. **Rosenwein (1996)** presentó algoritmos semillas para almacenes con sistemas de alistamiento manuales, donde el alistador extrae productos de la zona de almacenamiento (*picker to parts*), e introduce dos reglas de adición de las órdenes, el MAA (Mínima cantidad de pasillos adicionales) y el COG (Centro de gravedad). Ellos comparan su estudio con **Gibson & Sharp (1992)**, obteniendo un mejor desempeño. **Ho et al. (2008)** presenta algoritmos semilla para almacenes con sistema de alistamiento manual (*picker to parts*). Cada uno de estos métodos tiene como fundamento la selección de órdenes semilla y la selección de órdenes acompañantes. Ellos continuaron con el trabajo de **Ho y Tseng (2006)** analizando 11 reglas de selección de órdenes semilla y 14 reglas de selección de órdenes acompañantes. Además utilizaron una regla de semilla acumulativa. Los datos fueron analizados utilizando dos métodos de ruteo, el mayor espacio (Largest Gap) y una combinación del mayor espacio y una

metaheurística que utilizaba recocido simulado. Se identificaron las reglas de selección y adición con mejor comportamiento para los datos analizados.

Respecto a los algoritmos de ahorro, **Elsayed & Unal (1989)** para almacenes con AS/RS presentan los siguientes algoritmos: EQUAL, SMALL-LARGE, MAXSAV Y CWRIGHT. De estos, el algoritmo SL mostró resultados superiores en el tiempo de viaje. El peor de los evaluados fue el algoritmo MAXSAV, que además fue ineficiente en tiempos de cómputo. **De Koster et al. (1999b)** evaluaron algoritmos de conformación de lotes por órdenes semilla y con algoritmos de ahorro. Los algoritmos de ahorro estudiados fueron un algoritmo para resolver el ruteo de vehículos propuesto por **Clarke & Wright (1964)**, y los algoritmos EQUAL y Small-Large que habían sido propuestos por **Elsayed & Unal (1989)**, encontrando en qué casos es más ventajoso utilizar cada algoritmo, dependiendo de la capacidad del recurso de alistamiento o el tamaño de las órdenes de pedido.

Las metaheurísticas también han sido utilizadas para resolver el problema de conformación de lotes. Por ejemplo, un algoritmo con búsqueda tabú fue utilizado por **Hen y Wäscher (2012)** y los algoritmos genéticos por **Hsu, Chen y Chen (2005)**. Así mismo, un trabajo de investigación que utiliza minería de datos se observa en **Chen, Huang & Chen (2005)**.

Para concluir, el estudio del proceso de preparación de pedidos se justifica por el impacto que tiene tanto a nivel operativo, como estratégico de las organizaciones. Los problemas más estudiados son las políticas de almacenamiento, las políticas de alistamiento y las políticas de ruteo con el fin de mejorar los tiempos de alistamiento. Para el sector textil, mejorar la eficiencia en el proceso de alistamiento de pedidos, impactará los costos y los acuerdos de niveles de servicio de los clientes.

#### **4. CARACTERIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL ALMACEN DE ROLLOS DE TELA ESTUDIADO.**

- **Sistema de preparación de pedidos.** Los sistemas de preparación de pedidos de rollos de tela carecen de automatización. Los alistadores recorren el almacén y se acercan a la ubicación que contiene los productos por alistar (*picker to parts system*). Este alistamiento puede ser en bajo nivel (*low level*), donde los alistadores a pie visitan los pasillos y recogen los productos, o en alto nivel (*high level*), donde el alistamiento se realiza en posiciones altas de la estantería y los alistadores utilizan equipos (montacargas, elevadores de tijera, etc.) para extraer los productos.
- **Número de bloques del almacén.** Las políticas de ruteo cuando se utilizan heurísticas son distintas en almacenes de un bloque respecto a las utilizadas en almacenes de múltiples bloques. Esta investigación realiza una adecuación de la política de ruteo de punto medio y la adapta para almacenes de múltiples bloques, ya que las empresas del sector textil son de diferente tamaño. Los datos de esta investigación son probados en un almacén de dos bloques.
- **Número de referencias.** Es común que el inventario en un almacén de rollos de tela cuente con un alto número de referencias. Para este trabajo se contempla un alistamiento para múltiples productos que tienen diferente consumo de capacidad en el recurso de alistamiento.
- **Características de los productos.** Los métodos de conformación de lotes fueron validados en un almacén de rollos de tela, que almacena rollos que oscilan entre 30 y 50 kilogramos, tienen 1.5 metros de largo y un diámetro entre 10 y 35 centímetros.

## 5. MODELO MATEMÁTICO Y MÉTODOS DE CONFORMACIÓN DE LOTES.

Esta investigación acotó el estudio del problema de conformación de lotes a dos tipos de heurísticas y una metaheurística:

1. Heurística de regla de prioridad FCFS.
2. Algoritmos semilla.
3. Algoritmos genéticos (metaheurística).

La política FCFS se utilizó como benchmarking. Los algoritmos semilla se estudiaron bajo dos enfoques, uno conservando la integridad de los pedidos para conformar los lotes que fueron tomados de **Ho et al. (2008)** también usados como benchmarking, y otro, dividiendo los pedidos para realizar los recorridos. Los algoritmos genéticos también se utilizaron en este documento, pero con diferencias respecto al AG presentado por **Hsu et al. (2005)** tales como: (1) El método de codificación; (2) el layout del almacén sobre el cual se probaron los datos, que es de dos bloques respecto al de bloque sencillo que ellos utilizaron lo cual incrementará la complejidad y afecta los tiempos de cómputo de la metaheurística; (3) la estrategia de selección de los padres y (4) el mecanismo de supervivencia de los individuos.

La variable de mayor interés y sobre la cual se quiso evaluar el desempeño de las distintas estrategias fue el tiempo de alistamiento total. La política de ruteo utilizada fue la política de punto medio, que fue adaptada para almacenes de más de un bloque, ya que en la literatura se presenta como una heurística para almacenes de bloque sencillo.

Los algoritmos que serán presentados tienen utilidad en almacenes de múltiples bloques y se podrán utilizar para múltiples recursos de alistamiento en sistemas de alistamiento manual (*picker to parts*), ya que el sector textil presenta sistemas de alistamiento donde las personas ya sea a pie o a bordo de un vehículo realizan la recolección de los pedidos. Los algoritmos fueron validados con información real de una representativa comercializadora de textiles en Colombia. La **figura 3** resume el framework de esta investigación.

### 5.1. MODELO MATEMÁTICO.

**Gademann & Van de Velde (2005)** y **Hen & Wäscher (2012)** plantean el modelo matemático del OBP, pero buscando minimizar las distancias recorridas y no el tiempo total de alistamiento, que es la variable desempeño objetivo en esta investigación. Sea  $J = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de órdenes por alistar en la ola o piscina de pedidos,  $S$  el conjunto de todos los lotes factibles,  $C$  la capacidad del recurso de alistamiento y  $c_j$  la capacidad requerida por cada orden  $j$  ( $j \in J$ ). Además, se asume que  $c_j \leq C$  para todos los  $j \in J$  y que  $\sum_{j=1}^n c_j \geq C$ , de lo contrario el problema es infactible o trivial respectivamente. Cada lote es representado por  $a_s = \{a_{1s}, \dots, a_{ns}\}$  donde  $a_{js} = 1$  si la orden  $j$  es incluida en el lote  $s$  o en caso contrario  $a_{js} = 0$ . Se define  $t_s$  como el tiempo total de alistamiento para recoger los ítems de todas las órdenes del lote  $s$ . Por otra parte se tiene la siguiente variable binaria:

$$x_s \begin{cases} 1 & \text{si el lote } s \text{ es elegido} \\ 0 & \text{el lote } s \text{ no es elegido} \end{cases}$$

El modelo matemático que explica de forma general el OBP es el siguiente:

$$\text{Minimizar: } \sum_{s \in S} t_s * x_s \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{s \in S} a_{js} * x_s = 1 \text{ para todo } j \in J \quad (2)$$

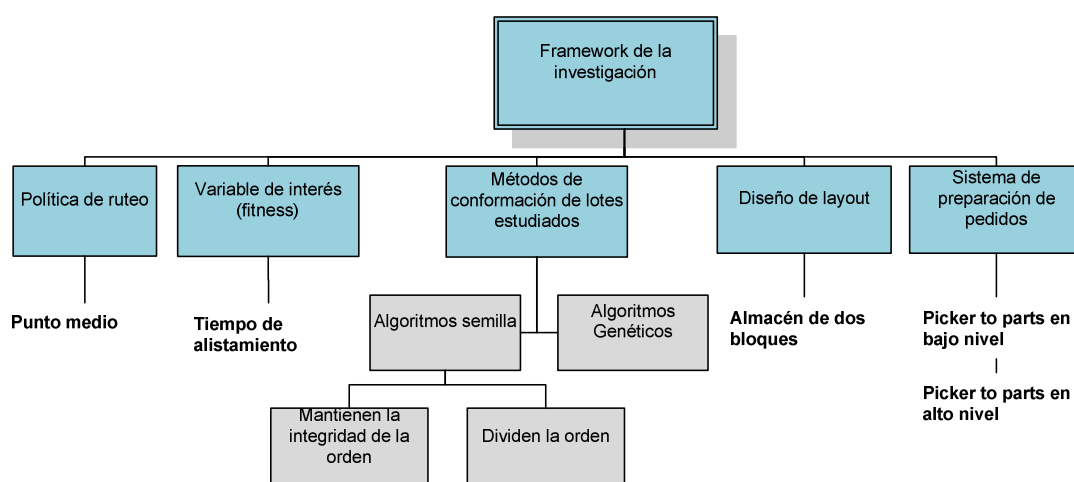
$$x_s \in \{0,1\} \text{ para todo } s \in S \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} c_j * a_{js} \leq C \text{ para todo } s \in S \quad (4)$$

Las restricciones (2) y (3) garantizan que cada orden es asignada a un único lote. La restricción (4) tiene como propósito no violar la capacidad del recurso de alistamiento. El modelo antes presentado es de tipo combinatorio complejo. **Gademann & Van de Velde (2005)** categorizan el OBP como un problema *NP-hard* si el número de órdenes en cada lote es mayor a dos.

El OBP tendrá dos variantes para esta investigación respecto al modelo general que se explicó antes. La primera, es que algunos métodos presentados permiten la división de las órdenes, por lo tanto los lotes se conformarán por productos. La segunda, es que existirán múltiples recursos de alistamiento para recoger las órdenes, pero cada orden o producto tiene asignado un recurso de alistamiento dependiendo de la altura donde se encuentren los ítems en el almacén. Por lo tanto, se resuelve el problema por separado para cada recurso, y luego se suma el tiempo de alistamiento de cada uno para calcular el tiempo total.

FIGURA 3. Framework de la investigación.



## 5.2. ALGORITMOS SEMILLA.

Las políticas de conformación de lotes por algoritmos semillas tienen dos enfoques: (1) Sin dividir los órdenes de pedido y (2) dividiendo los órdenes de pedido. Para el caso en que no se dividen los pedidos, se acotó la investigación en las reglas de selección de semilla SNPL, SNPA y SRCA propuestas por **Ho & Tseng (2006)** y que además presentaron buen comportamiento en la investigación de **Ho et al. (2008)**. Las reglas de adición estudiadas son SAMAD, SAMED, SAMRD y SNAPA que también presentaron buen comportamiento en el trabajo realizado por **Ho et al. (2008)**. Así mismo, se utiliza una regla de semilla acumulativa por haber presentado mejor desempeño en varios trabajos de investigación (**ver De Koster et al., 1999b; Ho et al. 2008**).

Para el caso en que se dividen los pedidos, esta investigación propone cuatro nuevas reglas de selección de semillas: (1) Producto con Distancia Euclidiana Menor al Centroide -PDEMC-; (2) Producto con Distancia Euclidiana Mayor al Centroide -PDEMAC-; (3) Producto con Distancia Euclidiana Menor al Depósito de pedidos -PDEMD- y (4) Producto con Distancia Euclidiana Mayor al Depósito de pedidos -PDEMAD-. Además, se proponen tres reglas de adición basadas en medidas de distancia: (1) El Ratio de Pasillo -RP-; (2) Distancia Euclidiana Promedio -DEP- y (3) Distancia Rectangular Promedio -DRP-.

Por lo tanto, se probarán 12 combinaciones de reglas de selección de semilla y de adición para el caso en que se mantiene la integridad de los órdenes y otras 12 combinaciones para el enfoque que permite la división de las mismas. Lo anterior implica un total de 24 combinaciones diferentes utilizando algoritmos semilla.

### 5.2.1. Reglas de selección de semilla cuando no se dividen los pedidos.

#### 5.2.1.1. SNPL (Smallest Number of Picking Locations).

Propuesta por **Ho & Tseng (2006)**. Elige como semilla la orden con menor número de ubicaciones por visitar. Sea  $R$  el conjunto de órdenes y  $P$  la piscina de órdenes de pedido. Primero se calcula  $PL(R)$ , -el número de ubicaciones que se deben visitar para alistar cada orden-. Se elige la orden  $R^*$  que tenga el menor  $PL(R^*)$  como la semilla.

#### 5.2.1.2. SNPA (Smallest Number of Picking Aisles).

Propuesta por **Ho & Tseng (2006)**. Elige como semilla la orden con menor número de pasillos de alistamiento. Sea  $R$  el conjunto de órdenes y  $P$  la piscina de órdenes de pedido. Primero se calcula  $PA(R)$ , que es el número de pasillos de alistamiento requeridos para recoger todos los productos de la orden  $R$ . Se elige la orden  $R^*$  que tenga el menor  $PA(R^*)$  como la semilla.

#### 5.2.1.3. SRCA (Smallest Rectangular Covering Area).

Propuesta por **Ho et al. (2008)**. Sea  $R$  el conjunto de órdenes y  $P$  la piscina de órdenes de pedido. Primero, para todas las órdenes en  $R$  calcular el menor rectángulo que cubre las ubicaciones necesarias para alistar todos los productos de cada orden. La orden con la menor área rectangular calculada es elegida como la semilla.

## 5.2.2. Reglas de adición de órdenes cuando no se dividen los pedidos.

### 5.2.2.1. SAMAD (Shortest Average Mutual-nearest-Aisle Distance).

Propuesta por **Ho et al. (2008)**. Calcula la distancia de pasillo promedio más cercana entre los ítems de la orden R y los ítems del lote B. Se adiciona la orden R\* con menor AMAD (R, B), cuyo cálculo se explica a continuación.

Sea IS(R) el conjunto de ítems de la orden R, T el ítem T, SAD (T, B) la distancia de pasillo más pequeña entre la ubicación del ítem T y la ubicación el ítem más cercano de B :

$$ANAD_{R \rightarrow B} = \frac{\sum_{T \in IS(R)} SAD(T, B)}{\text{No ítems R}}$$

$$ANAD_{B \rightarrow R} = \frac{\sum_{T \in IS(B)} SAD(T, R)}{\text{No ítems B}}$$

$$AMAD(R, B) = (ANAD_{R \rightarrow B} + ANAD_{B \rightarrow R})/2$$

Se adiciona la orden R\* con menor AMAD (R\*, B).

### 5.2.2.2. SAMED (Shortest Average Mutual-nearest-Euclidean Distance).

Propuesta por **Ho et al. (2008)**. Calcula la distancia euclidiana promedio más cercana entre los ítems de la orden R y los ítems del lote B. Se adiciona la orden R\* con menor AMED (R, B), cuyo cálculo se explica a continuación.

Sea IS(R) el conjunto de ítems de la orden R, T el ítem T, SED (T, B) la distancia euclidiana más pequeña entre la ubicación del ítem T y la ubicación el ítem más cercano de B :

$$ANED_{R \rightarrow B} = \frac{\sum_{T \in IS(R)} SED(T, B)}{\text{No ítems R}}$$

$$ANED_{B \rightarrow R} = \frac{\sum_{T \in IS(B)} SED(T, R)}{\text{No ítems B}}$$

$$AMED(R, B) = (ANED_{R \rightarrow B} + ANED_{B \rightarrow R})/2$$

Se adiciona la orden R\* con menor AMED (R\*, B).

### 5.2.2.3. SAMRD (Shortest Average Mutual-nearest-Rectangular Distance).

Propuesta por **Ho et al. (2008)**. Calcula la distancia rectangular promedio más cercana entre los ítems de la orden R y los ítems del lote B. Se adiciona la orden R\* con menor AMRD (R, B), cuyo cálculo se explica a continuación.

Sea IS(R) el conjunto de ítems de la orden R, T el ítem T, SRD (T, B) la distancia rectangular más pequeña entre la ubicación del ítem T y la ubicación el ítem más cercano de B :

$$ANRD_{R \rightarrow B} = \frac{\sum_{T \in IS(R)} SRD(T, B)}{\text{No ítems R}}$$

$$ANRD_{B \rightarrow R} = \frac{\sum_{T \in IS(B)} SRD(T, R)}{\text{No ítems B}}$$

$$AMRD(R, B) = (ANRD_{R \rightarrow B} + ANRD_{B \rightarrow R})/2$$

Se adiciona la orden R\* con menor AMRD (R\*, B).

#### 5.2.2.4. SNAPA (Small Number of Additional Picking Aisles).

Propuesta por **Ho & Tseng (2006)**. Adiciona la orden con menor número de pasillos de alistamiento adicionales. Primero se calcula NAPA (R, B) que es el menor número de pasillos de alistamiento adicionales que se requieren para alistar los ítems de la orden R si se adiciona al lote B. Luego se elige como acompañante la orden R\* con menor NAPA (R\*, B).

#### 5.2.3. Reglas de selección de semilla cuando se dividen los pedidos.

##### 5.2.3.1. PDEMC (Producto con Distancia Euclidiana Menor hasta el Centroide).

Se propone por primera vez basándose en el método del centroide para localización de instalaciones. Busca elegir como semilla el ítem o producto más cercano a las coordenadas del centroide (Cx, Cy). Se calcula como se explica a continuación.

N: Número de ítems disponibles para alistar.

xi: Coordenada x donde se encuentra ubicado el ítem i.

yi: Coordenada y donde se encuentra ubicado el ítem i.

Dec: distancia euclidiana desde la ubicación del ítem i hasta el centroide (Cx, Cy).

Primero se calcula el centroide (Cx, Cy).

$$Cx = \frac{\sum_{i=1}^N xi}{N}$$

$$Cy = \frac{\sum_{i=1}^N yi}{N}$$

Luego se calcula la distancia euclidiana desde la ubicación de cada ítem hasta las coordenadas (Cx, Cy).

$$Dec = \sqrt{(xi - Cx)^2 + (yi - Cy)^2}$$

Por último se elige como ítem semilla P\* aquel con menor Dec\*.

##### 5.2.3.2. PDEMAC (Producto con Distancia Euclidiana Mayor hasta el Centroide).

Busca elegir como semilla el ítem o producto más lejano a las coordenadas del centroide (Cx, Cy). Su cálculo es similar al PDEMC, pero se elige como semilla el producto P\* cuyo Dec\* sea mayor.

### 5.2.3.3. PDEMD (Producto con Distancia Euclidiana Menor hasta el Depósito de pedidos).

Elige como semilla el producto más cercano al depósito de pedidos. Se propone en esta investigación basándose en el supuesto de que el depósito es el punto de inicio y partida del recorrido.

$x_i$ : Coordenada x donde se encuentra ubicado el ítem i.

$y_i$ : Coordenada y donde se encuentra ubicado el ítem i.

Ded: Distancia euclidiana desde la ubicación del ítem i hasta el depósito de pedidos.

$x_d$ : Coordenada x donde se encuentra ubicado el depósito de pedidos.

$y_d$ : Coordenada y donde se encuentra ubicado el depósito de pedidos.

Primero se calcula la distancia euclidiana de cada producto hasta el depósito de pedidos. Luego se elige como ítem semilla  $P^*$ , aquel con menor Ded\*.

$$Ded = \sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2}$$

### 5.2.3.4. PDEMAD (Producto con Distancia Euclidiana mayor hasta el Depósito de pedidos).

Elige como semilla el producto más lejano al depósito de pedidos. Se propone en esta investigación y su cálculo es similar al PDEMD pero se elige como ítem semilla el  $P^*$  con mayor Ded\*.

## 5.2.4. Reglas de adición cuando se dividen los pedidos

### 5.2.4.1. RP (Ratio de Pasillo).

Adicionará ítems de tal modo que se visiten los pasillos más cercanos al lote. Se propone en esta investigación.

$p_i$ : Pasillo del ítem i.

$RP_i$ : Ratio de pasillo del ítem i.

$PB_j$ : Pasillo j por visitar en el lote B.

n: Número de ítems del lote B.

Primero se calcula el ratio de pasillo de cada producto de la siguiente manera:

$$RP_i = \frac{\sum_{j=1}^n |PB_j - p_i|}{n}$$

Se adiciona al lote el ítem  $i^*$  con menor  $RP_i$  \*.

### 5.2.4.2. DEP (Distancia Euclidiana Promedio entre productos).

Adiciona al lote el ítem con menor distancia euclidiana promedio a los ítems del lote. Se calcula de la siguiente manera.

n: Número de ítems del lote B.

$De_i$ : Distancia euclidiana promedio del ítem i a los ítems del lote B.

$de_{ij}$ : Distancia euclidiana del producto i al producto j contenido en el lote B.

$$De_i = \frac{\sum_{j=1}^n de_{ij}}{n}$$

Se adiciona al lote el ítem  $i^*$  con menor  $De_i^*$ .

### 5.2.4.3. DRP (Distancia Rectangular Promedio entre productos).

Adiciona al lote el ítem con menor distancia rectangular promedio a los ítems del lote. Se calcula de la siguiente manera.

$n$ : Número de ítems del lote B.

$Dr_i$ : Distancia rectangular promedio del ítem  $i$  a los ítems del lote B.

$d_{rij}$ : Distancia rectangular del ítem  $i$  al producto  $j$  contenido en el lote B.

$$Dr_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{rij}}{n}$$

Se adiciona al lote el ítem  $i^*$  con menor  $Dr_i^*$ .

### 5.2.5. Zona de consolidación.

Cuando se dividen los pedidos es necesario reclasificar los productos en su orden respectiva luego del alistamiento. La zona de consolidación es aquella donde se realiza dicha reclasificación. Para este trabajo de investigación es un área aledaña al depósito de pedidos donde cada ubicación podrá almacenar dos lotes (área de color verde en la **figura 4**).

FIGURA 4. Zona consolidación.



El funcionamiento de esta área se describe a continuación:

- Cada lote ocupará una posición de estiba en una de las ubicaciones disponibles en la zona de consolidación, donde cada ubicación cuenta con una capacidad de almacenamiento de dos posiciones de estiba.
- Cada recurso llevará su lote alistado a una de las posiciones en la zona de consolidación.
- La actividad de dejar el lote en la zona de consolidación inicia y finaliza en el depósito de pedidos.
- Un alistador se encargará de realizar un recorrido para recoger los ítems de cada pedido en la zona de consolidación. Esta labor inicia y finaliza en el depósito.
- Cada rollo de tela tiene un tiempo de extracción de la ubicación donde se encuentre en la zona de consolidación.

- La zona de consolidación ocupa una hilera de estantería solo a dos niveles de altura para facilitar su extracción por los alistadores y para evitar el uso de equipos. Es decir, cuenta con una hilera de 32 posiciones a dos niveles, con una capacidad máxima de 64 lotes -suficiente para las instancias evaluadas-.
- Para los desplazamientos en esta zona se realiza un recorrido con una política de retorno. Para dejar y recoger cada lote se recorrerá el pasillo de la zona de consolidación iniciando y finalizando en el depósito de pedidos.

### 5.3. ALGORITMOS GENÉTICOS.

Los algoritmos genéticos –AG- se basan en una analogía biológica donde los individuos tienen ciertas características como resultado de la combinación de los cromosomas de sus padres. Utilizan poblaciones de cromosomas (soluciones) que se recombinan usando estrategias de *selección*, *cruce* y *mutación* para realizar una búsqueda guiada por la evaluación de la función objetivo de dichas soluciones. Basada en esta evaluación, los individuos con mejor desempeño en la función objetivo, tienen mayor probabilidad de sobrevivir y generar mejores descendientes **Glover & Kochenberger (2003)**.

A continuación se describe el paso a paso del algoritmo genético utilizado:

Paso 1. Definir una codificación para la solución.

Paso 2. Crear una población inicial  $P(0)$  aleatoria, para  $t = 0$ , que contiene un conjunto de  $x_i$  soluciones, siendo  $i = \{1, \dots, M\}$ ;  $M$  soluciones.

Paso 3. *Seleccionar*  $N$  padres con una probabilidad  $p(x_i, t)$  proporcional al desempeño en la función objetivo de  $x_i$ .

Paso 4. *Cruzar*  $N/2$  parejas aleatorias de los padres seleccionados en el paso 3 con una probabilidad de cruce dada.

Paso 5. *Mutar* los descendientes con una probabilidad de mutación dada.

Paso 6. Formar una nueva población usando un mecanismo de supervivencia.

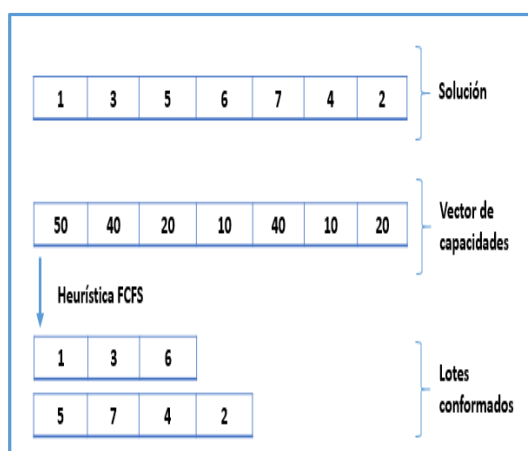
Paso 7. Hacer  $t=t+1$  y regresar al paso 3 si no se cumple el criterio de parada.

#### 5.3.1. Codificación de la solución.

Se presenta un nuevo método de codificación que utiliza la heurística FCFS para conformar los lotes a partir de la solución codificada. Respecto a la utilizada por **Hsu, et al. (2005)** tiene como ventaja que los lotes se construyen dinámicamente, asignando las órdenes a los lotes en la secuencia en que aparecen en la solución, teniendo en cuenta la restricción de capacidad del recurso de alistamiento, permitiendo que todas las soluciones sean factibles y no requieran una corrección luego del cruce, favoreciendo los tiempos de cómputo. Se acomoda a cualquier diseño de layout y cualquier cantidad de órdenes en la ola. En la **figura 5** se explica con un ejemplo el método de codificación utilizado, suponiendo que el recurso de alistamiento tiene una capacidad de 100.

Se aclara que para resolver el OBP utilizando AG solo se utilizaron lotes dados por órdenes completas, es decir, no se dividen los pedidos para este método de solución. La razón principal es la alta demanda que tendría el método en tiempos de cómputo ya que los cromosomas estarían conformados por ítems o productos.

FIGURA 5. Ejemplo Método de codificación.



### 5.3.2. Selección.

La selección consiste en determinar cuáles padres generarán descendientes en la población. Un operador de selección buscará dar prioridad a los individuos más aptos para ser padres. Sin embargo, para agregar un componente aleatorio se utiliza un método probabilístico para elegir dichos padres. Para tal fin, se calcula para cada solución una probabilidad dada por la fórmula que aparece en **Reeves (1995)**:

$$P(k) = \frac{2k}{M(M+1)}$$

Donde  $M$  es el número de soluciones y  $k$  es la  $k$ -ésima posición de la solución en orden descendente según el valor de la función de desempeño (tiempo total de alistamiento). Es decir, la solución con menor tiempo de alistamiento tendrá el mayor valor de  $k$ , procurando que los mejores individuos tengan mayor probabilidad de ser elegidos como padres. Al final se eligen  $N$  padres, donde  $N=M/2$ .

### 5.3.3. Cruce.

Los padres obtenidos por el método de selección serán cruzados con una probabilidad dada. El cruce es un operador que permite intensificar la búsqueda en el espacio de soluciones generando descendientes a partir de los cromosomas de los padres. El método de cruce utilizado en esta investigación es el propuesto por **Davis (1985)** denominado cruce OX1.

El cruce OX1 construye los hijos escogiendo una parte de la solución de un padre y preservando el orden de la solución del otro. Por ejemplo, consideremos las siguientes soluciones que representan dos padres:

P1= (1 2 3 4 5 6 7 8)  
 P2= (2 5 3 4 7 8 6 1)

Primero se eligen dos puntos de corte aleatorios en las soluciones que representan los padres, por ejemplo uno entre el segundo y tercer elemento y otro entre el quinto y sexto elemento.

P1= (1 2| 3 4 5| 6 7 8)  
 P2= (2 5| 3 4 7| 8 6 1)

Luego se dejan en los hijos las partes de las soluciones definidas por los puntos de corte.

$$H1 = (X \ X | 3 \ 4 \ 5 | X \ X \ X)$$

$$H2 = (X \ X | 3 \ 4 \ 7 | X \ X \ X)$$

Por último, empezando por el segundo punto de corte, los elementos del primer padre se copian en el segundo hijo en el orden en que aparecen, evitando los valores repetidos. La misma operación se realiza con el segundo padre y el primer hijo.

$$D1 = (2 \ 7 \ 3 \ 4 \ 5 \ 8 \ 6 \ 1)$$

$$D2 = (2 \ 5 \ 3 \ 4 \ 7 \ 6 \ 8 \ 1)$$

### 5.3.4. Mutación.

La mutación es un operador que procura la diversificación. Se realiza luego del cruce, donde cada hijo o descendiente resultante del cruce de los padres tendrá una probabilidad de ser mutado. Su probabilidad de ocurrencia es baja, lo cual no le resta importancia. El papel de la mutación es insertar aleatoriedad en el espacio de búsqueda escapando de óptimos locales.

El operador de mutación utilizado en este trabajo consiste en elegir aleatoriamente dos elementos de la solución e intercambiarlos de posición. Sea la siguiente solución inicial:

$$S1 = (1 \ 2 \ 5 \ 4 \ 3 \ 7 \ 8 \ 6)$$

Luego de mutar intercambiando las posiciones 3 y 6 la solución tendrá la siguiente estructura:

$$S1' = (1 \ 2 \ 7 \ 4 \ 3 \ 5 \ 8 \ 6)$$

### 5.3.5. Supervivencia.

Para definir los individuos de la generación actual ( $t$ ) que sobreviven y pasan a la siguiente generación ( $t+1$ ) se utiliza un criterio elitista. Es decir, los padres e hijos de la generación actual con mejor comportamiento en la función de desempeño serán los sobrevivientes.

### 5.3.6. Parámetros del Algoritmo Genético.

**TABLA 1. Parámetros AG.**

Parámetro	Valor
Número de poblaciones ( $p$ )	$p = 30, 40, 50$ . Se evalúan tres valores distintos.
Probabilidad de cruce ( $p_c$ )	$p_c = 0,9$
Probabilidad de mutación ( $p_m$ )	$p_m = 0,05$
Tamaño de la población ( $M$ )	$2l$ , siendo $l$ el número de órdenes en la ola o piscina de pedidos.

El algoritmo genético estudiado utilizó los parámetros de la **tabla 1**. El único parámetro sobre el cual se realizó análisis de sensibilidad fue el número de poblaciones, dado que a medida que aumenta también lo hacen los tiempos de cómputo. A pesar que un mayor número de poblaciones puede mejorar las soluciones, al ser el OBP un problema operativo, tiempos de cómputo muy grandes afectan la utilidad de la metaheurística para resolverlo.

## 6. FUNCIÓN DE DESEMPEÑO.

La función de desempeño que se utiliza es el tiempo total de alistamiento. Sin embargo la simulación permite obtener datos de las distancias recorridas, el número de lotes y los tiempos de cómputo.

## 7. POLÍTICA DE RUTEO.

Es necesario establecer la forma como se recorre el almacén para recoger cada uno de los lotes conformados. Estos recorridos se determinan por la política de ruteo dada por la ubicación de los productos. Para esta investigación se utilizará una política de punto medio para almacenes de múltiples bloques. No todas las investigaciones utilizan almacenes de más de un bloque para probar sus datos, debido a que esto incrementa la complejidad de la simulación. Para una metaheurística por ejemplo, para evaluar el desempeño de cada solución se debe simular la política de ruteo para obtener el valor del tiempo de alistamiento. **Hsu et al. (2005)** y **Hen & Wäscher (2012)** estudiaron AG y Búsqueda Tabú respectivamente evaluando sus datos en un almacén de bloque sencillo, lo mismo sucede con los algoritmos semilla de **Ho & Tseng (2006)** y **Ho et al. (2008)**.

No se conoce en la literatura de un algoritmo para una política de ruteo de punto medio en almacenes de más de un bloque. Sin embargo, se puede adaptar la política de punto medio para almacenes de bloque sencillo (**De Koster et al., 2007**) para utilizarla en almacenes de dos o más bloques. Tal como en otras investigaciones, el recorrido inicia y finaliza en un depósito de pedidos. El paso a paso del algoritmo de esta política es el siguiente y su explicación gráfica se puede observar en el **anexo A**.

Paso 1: Determinar el pasillo más a la izquierda (suponiendo que el depósito de pedidos está en la parte izquierda del almacén) que contiene al menos una ubicación por alistar (*pasillo de alistamiento izquierdo*) y el bloque más lejano del depósito de pedidos que contiene al menos una ubicación con productos por alistar (*bloque más lejano*).

Paso 2: Caminar desde el depósito de pedidos hacia el *pasillo de alistamiento izquierdo* (a).

Paso 3: Atravesar el *pasillo de alistamiento izquierdo* hasta el pasillo transversal posterior del *bloque más lejano* recogiendo los productos de las ubicaciones de ese pasillo (b).

Paso 4: En este punto el alistador está en el *pasillo transversal posterior* de un bloque llamado *bloque actual*. Dividir el bloque en dos secciones iguales, la primera sección es la más cercana al depósito de pedidos y la segunda es la más alejada. Hay tres posibilidades:

4.1 Hay productos por alistar en la segunda sección del bloque actual. Ir al *pasillo más a la izquierda* de la segunda sección del bloque actual con productos por alistar (c, g) y luego al paso 5.

4.2 No hay productos por alistar en el bloque actual. Primero verificar si no quedan productos por alistar y de ser así ir al paso 9, de lo contrario continuar con este paso. Regresar al pasillo transversal delantero del bloque actual y volver al paso 4.

4.3. Solo hay productos por alistar en la primera sección del bloque actual. Ir al *pasillo más a la derecha* con productos por alistar caminando por el pasillo transversal posterior del bloque, recoger los productos del pasillo más a la derecha hasta llegar al pasillo transversal delantero del bloque y luego ir al paso 8.

Paso 5: Si es el único pasillo del bloque con productos por alistar recorrerlo todo recogiendo todos los productos e ir al paso 4, de lo contrario ir al paso 6.

Paso 6: Recoger los productos por alistar del *pasillo más a la izquierda* en la segunda sección del bloque, luego retornar al pasillo transversal posterior del bloque actual y repetir este paso hasta que solo quede un pasillo con productos por alistar en la segunda sección del bloque actual, llamado *pasillo más a la derecha* (d, h).

Paso 7: Ir hasta el *pasillo más a la derecha* y atravesarlo recogiendo todos los productos por alistar (e, i). Si hay productos por alistar en el bloque actual ir al paso 8 de lo contrario ir al paso 4.

Paso 8: Ir hasta el pasillo más cercano a la izquierda con productos por alistar y recoger los productos del *pasillo* entrando y saliendo por el pasillo transversal delantero del bloque actual, y repetir este paso con todos los pasillos con productos por alistar de la primera sección del bloque actual (f, j), luego ir al paso 4.

Paso 9: Llevar los productos al depósito de pedidos (k).

Es importante aclarar que cuando se dividen los pedidos para conformar los lotes, se calcula el tiempo de consolidación requerido para reclasificar los pedidos y se suma al tiempo de alistamiento dado por la política de ruteo explicada.

## 8. SIMULACIÓN.

La simulación se utilizó para evaluar el comportamiento de cada uno de los métodos para conformar lotes de órdenes de pedido en esta investigación. El software utilizado para comparar estas estrategias y observar su desempeño fue **MATLAB R2012a**. Los siguientes son los supuestos utilizados para realizar la simulación:

- El recurso de alistamiento puede recoger simultáneamente en ambos lados del pasillo de alistamiento.
- El layout que se utilizó para la investigación es de dos bloques, tiene ocho pasillos de alistamiento, cinco niveles de altura y 1280 ubicaciones.
- Se asumieron bahías de 2,4 metros de ancho y el alistamiento se realiza justo en el punto medio de cada bahía.
- La distancia entre pasillos longitudinales y transversales es de 6,7 metros.
- El recorrido inicia y finaliza en un depósito de pedidos.
- Los recursos que visitan posiciones de estantería altas, tienen un tiempo de servicio en cada bahía. Es decir, se tienen en cuenta desplazamientos verticales.
- Para recorrer el almacén se simula la política de punto medio explicada en la **sección 6** de este documento, teniendo en cuenta la ubicación en el almacén de cada uno de los ítems de los lotes conformados. Se obtienen por lo tanto datos de distancias recorridas y además, con las velocidades y tiempos de servicio de los recursos, el tiempo total de alistamiento.
- Los lotes no pueden violar la restricción de capacidad de peso y volumen de los recursos de alistamiento.
- Dependiendo de la altura donde se encuentren los productos, serán alistados por el recurso que tenga acceso a su lugar de almacenamiento.
- Cuando se dividen los pedidos se simula el tiempo de reclasificación de cada ítem en su orden respectiva y se suma al tiempo total de alistamiento.
- La zona de consolidación tiene una capacidad máxima de 64 lotes (32 posiciones de estiba a dos niveles).
- Se supone que existe una cantidad suficiente de cada tipo de recurso de alistamiento para alistar los lotes asignados.

## 9. VALIDACIÓN.

El sector textil de materias primas se caracteriza por ser dinámico, por ofrecer productos de distintos tipos de tejido cuyo valor agregado es escaso, y cuya oferta es elevada dentro y fuera del país. Despacha a segmentos, que programan pedidos que requieren tiempos de entrega cortos. Por lo tanto, llegar a tiempo es determinante para conservar los clientes.

Los métodos acá estudiados fueron validados en la empresa COMERTEX. Algunas razones que hacen atractiva la implementación de una política de conformación de lotes en esta empresa son las siguientes:

1. *La inexistencia de políticas de alistamiento.* Actualmente los pedidos se entregan ya sea por una política discreta (uno a uno) o se entregan en grupos de pedidos, en ambos casos bajo el criterio del supervisor del centro de distribución.
2. *La actividad que consume mayor tiempo en el proceso de alistamiento de pedidos es el desplazamiento.* **Páez & Pineda (2012)** realizaron un estudio del proceso de alistamiento de pedidos en la empresa COMERTEX. Mediante muestreo del trabajo identificaron que la actividad con mayor consumo de tiempo es el desplazamiento, aproximadamente 25% del tiempo total.
3. *Alta frecuencia de pedidos pequeños.* El 85% de los pedidos tiene entre 1 y 8 unidades de transporte por despacho, según histórico de todos los despachos del primer semestre del año 2013. La **tabla 2** muestra el Pareto según la frecuencia de unidades despachadas en los pedidos.

TABLA 2. Frecuencia de unidades despachadas por pedido, primer semestre año 2013.

Unidades	Fi	%	Acumulado
1	5528	39%	39%
2	2349	17%	56%
3	1301	9%	65%
4	919	7%	71%
5	787	6%	77%
6	500	4%	81%
7	335	2%	83%
8	313	2%	85%
> 8	2097	15%	100%

4. *Uso de múltiples recursos de alistamiento.* Para el alistamiento se utilizan alistadores, montacargas y elevadores de tijera. Los pedidos se entregan por el supervisor con base a su criterio y experiencia. Esto genera esperas cuando los pedidos se entregan a alistadores que no tienen acceso a lugares altos en el almacén, por lo tanto se están administrando de forma ineficiente los recursos de alistamiento.

Definir políticas de conformación de lotes puede impactar de una forma favorable los inconvenientes presentados en la operación de la empresa COMERTEX. Agrupar pedidos pequeños en lotes, asignar adecuadamente los recursos a las tareas, disminuir los desplazamientos, son algunas de las ventajas que permite la formulación de estas políticas.

Para validar los métodos de conformación de lotes en MATLAB, se utilizaron 20 instancias distintas en cantidad de órdenes y número de ítems, que resume la **tabla 3**. Estos datos se tomaron de una muestra de 1050 pedidos reales solicitados por clientes en el año 2013 de la empresa COMERTEX S.A. Los recursos de alistamiento que utiliza esta empresa son dos, uno son los alistadores cuya capacidad está restringida por una estiba que es recurso que pueden transportar utilizando un estibador manual. El segundo recurso es un elevador de tijera operado por una persona y cuya capacidad es la misma. Un tercer recurso que es un montacargas no se contempla, pues se utiliza de forma exclusiva para ciertos tipos de producto.

Los alistadores tienen una velocidad de 40 metros/minuto y los elevadores tienen una velocidad de 45 metros/minuto. El tiempo de recogida o extracción por rollo de tela en la zona de consolidación cuando se dividen los pedidos es de 15 segundos. El tiempo de servicio para los elevadores (subida y bajada) es de 0.975 minutos para el tercer nivel, 1.04 minutos para el cuarto nivel y 1.3 minutos para el quinto nivel, los niveles 1 y 2 no requieren tiempo de servicio.

**TABLA 3. Resumen muestra pedidos empresa COMERTEX S.A.**

Ola	Pedidos	Ítems	Ola	Pedidos	Ítems
1	5	26	11	55	307
2	10	51	12	60	224
3	15	63	13	65	271
4	20	75	14	70	300
5	25	96	15	75	274
6	30	125	16	80	268
7	35	100	17	85	337
8	40	154	18	90	349
9	45	175	19	95	328
10	50	188	20	100	321

## 10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Para evaluar los resultados obtenidos se realizaron pruebas ANOVA utilizando el software **SPSS (versión 20)** y otros análisis. El resultado se presenta a continuación.

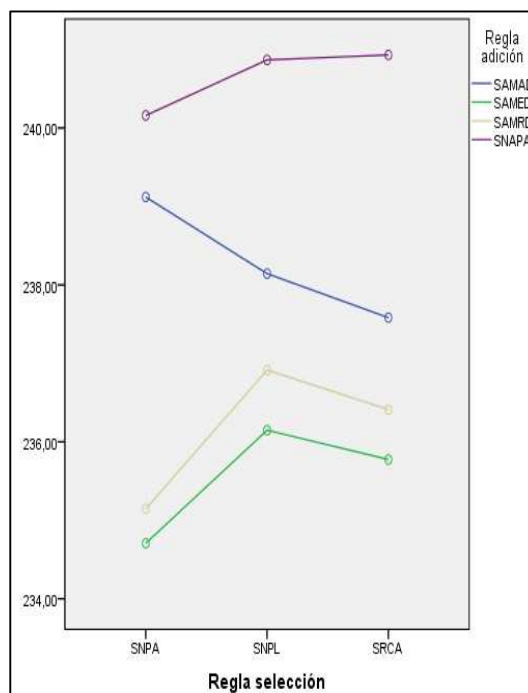
### 10.1. TIEMPO TOTAL DE ALISTAMIENTO.

Primero se estudia el comportamiento de los métodos evaluados sobre el tiempo total de alistamiento. Los datos de esta medida de desempeño se presentan en el **anexo B.1** para los algoritmos semilla. Para la heurística **FCFS** y los **AG** con 30, 40 y 50 poblaciones se observan en el **anexo B.2**.

El primer análisis se realizó para los algoritmos semilla que mantienen la integridad de la orden. El resumen del ANOVA para un diseño factorial con  $\alpha=0.05$  se presenta en el **anexo C.1**. Con este experimento se quiso analizar el efecto de la regla de selección de la semilla, la regla de adición y la interacción de dichas reglas sobre el tiempo total de alistamiento. El número de pedidos en la ola o piscina se utilizó como bloque para aislar su efecto sobre la variable de desempeño. Se puede observar que el aislar el efecto del número de pedidos en la ola es adecuado porque sí se

presentan diferencias en el tiempo total dependiendo del número de pedidos en la ola. Además, estadísticamente no hay diferencias significativas entre las tres reglas de selección de semilla evaluadas. Por el contrario, se encontró diferencia significativa dependiendo de la regla de adición utilizada.

FIGURA 6. Desempeño tiempo promedio reglas selección y adición sin dividir órdenes.

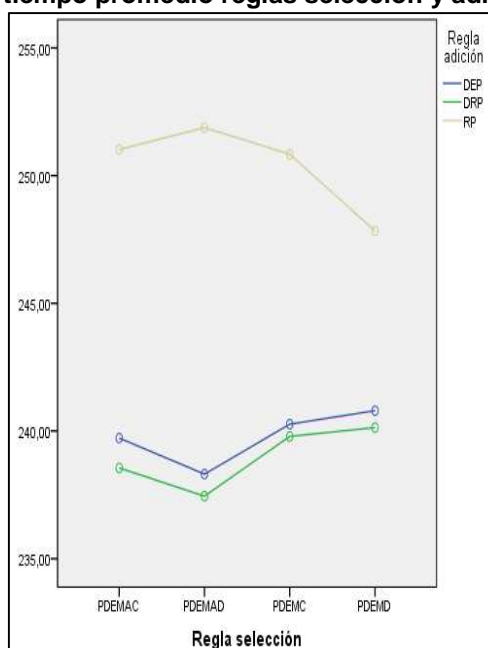


Se realizaron pruebas post hoc para comparar las reglas de adición de los algoritmos semilla que no dividen la orden utilizando los test DHS de Tukey, Scheffe, DMS y Bonferroni. En la **anexo C.2** se presenta el resultado para el test DHS de Tukey, pero los 4 test mostraron las mismas conclusiones, siendo la regla de adición **SNAPA** la que presenta un comportamiento más desfavorable con una diferencia estadísticamente significativa respecto a las otras tres reglas de adición. La regla de adición **SAMED** por el contrario, muestra el mejor comportamiento, presentando diferencias significativas respecto a las reglas **SAMAD** y **SNAPA** y un menor tiempo promedio respecto a la regla **SAMRD**. Por otra parte, en el **anexo C.1** se observa que las interacciones entre las reglas de selección y adición no presenta diferencia estadística, sin embargo se puede concluir que existe mayor eficiencia en el tiempo total promedio en los datos arrojados por la combinación de la regla de selección **SNPA** y la regla de adición **SAMED**, como se observa en la **figura 6**.

Un análisis posterior se ejecutó para los algoritmos semilla cuando se permite dividir las órdenes de pedido, que son métodos propuestos en este documento. El resumen del ANOVA con  $\alpha=0.05$  se presenta en el **anexo C.3**. Este experimento permitió evaluar el efecto sobre el tiempo de total de alistamiento de las reglas de selección, las reglas de adición y la interacción de la combinación de dichas reglas, utilizando como bloque el número de pedidos en la ola. Se puede identificar que utilizar como bloque el número de pedidos es conveniente pues este factor presentó diferencia significativa sobre el tiempo total en las instancias evaluadas. No se encontró diferencia significativa entre las cuatro reglas de selección de semilla utilizadas. Por el contrario, las reglas de adición sí presentaron diferencias estadísticamente significativas sobre la variable de interés. Para comparar las reglas de adición se realizaron los test post hoc DHS de Tukey, Scheffe, DMS y

Bonferroni. En el **anexo C.4** se presentan los resultados para el test DHS de Tukey, pero las cuatro pruebas presentaron las mismas conclusiones, donde el **RP** (RATIO DE PASILLO) fue la única regla de adición con una diferencia estadísticamente desfavorable respecto a las otras dos reglas estudiadas, esto se observa en la **figura 7.** Las reglas de adición **DEP** y **DRP** no mostraron diferencia estadísticamente significativa pero se encontró mejor comportamiento en el tiempo total promedio cuando se utilizó la regla de adición **DRP**. En el **anexo C.3** también se puede observar que la interacción entre las reglas de selección y adición no presenta diferencias estadísticamente significativas.

FIGURA 7. Desempeño tiempo promedio reglas selección y adición dividiendo órdenes.

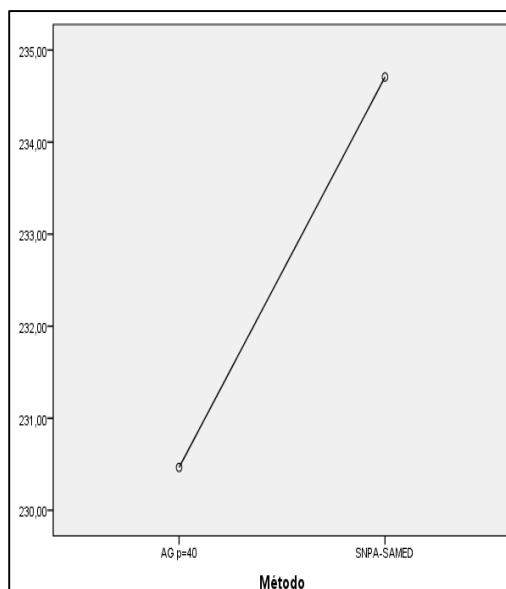


Otro aspecto por revisar es la incidencia en los tiempos de alistamiento al tomar la decisión de mantener o no la integridad de las órdenes al utilizar algoritmos semilla. El resumen del ANOVA con  $\alpha=0.05$  se muestra en el **anexo C.5**, utilizando como bloque el efecto del número de órdenes en la ola. A partir de este experimento se identifica que sí existe diferencia significativa en el tiempo de alistamiento al tomar la decisión de dividir o no la orden. Al revisar los tiempos de alistamiento totales promedio, se pudo identificar mayor eficiencia en el tiempo total de alistamiento cuando no se dividen los pedidos, como se observa en el **anexo C.6**.

En un análisis posterior, se quiso comparar los algoritmos semillas con la regla **FCFS** (sin dividir los pedidos), que siempre es un punto de referencia en la literatura por ser una política de conformación de lotes sencilla. Se realizó un ANOVA de efectos principales con  $\alpha=0.05$  (que se resume en el **anexo C.7**), tomando cada combinación de regla de selección y adición como un método independiente (dividiendo órdenes y sin dividirlos), es decir, se compararon 25 formas diferentes de conformar lotes, y se usó como bloque el número de órdenes en la ola. Como se observa en el **anexo C.7**, el nivel de significancia muestra que existe una diferencia en el tiempo total de alistamiento en al menos una de las 25 combinaciones evaluadas. Para identificar cuáles presentan diferencia se realizaron pruebas post hoc con  $\alpha=0.05$  de Tukey, Scheffe, Bonferroni y DMS. Los test mostraron un comportamiento desfavorable en las combinaciones donde se utilizó el **RP**. Por otra parte, la regla **FCFS** a excepción de los métodos donde se utiliza el **RP** como método de adición, tuvo el peor desempeño respecto a los demás en el tiempo total, a pesar que en los

métodos que la mejoran se dividen los pedidos y es necesaria una reclasificación de los mismos al terminar los recorridos. Además, el método con mejor desempeño en el tiempo total promedio entre los 25 evaluados fue la combinación dada por la regla de selección **SNPA** y la regla de adición **SAMED**.

FIGURA 8. Comparación tiempos totales promedio AG con población=40 vs combinación SNPA-SAMED.



Otra parte del análisis estadístico se centra en el **AG** que es la metaheurística propuesta en este documento. Primero se evaluó el impacto del número de poblaciones en el tiempo total de alistamiento. Este parámetro fue el único sobre el cual se hizo análisis de sensibilidad. Su importancia radica en que al ser el OBP un problema operativo, un mayor número de poblaciones implica mayores tiempos de cómputo, lo cual puede ir en contravía de la utilidad de este método de solución. El **anexo C.8** resume el ANOVA que analiza el impacto del número de poblaciones del AG en el tiempo total de alistamiento, donde se identifica una diferencia estadísticamente significativa en al menos un tamaño de población. Se realizaron test post hoc con  $\alpha=0.05$  DHS de Tukey, Scheffe, DMS y Bonferroni. El **anexo C.9** presenta la prueba DHS de Tukey, pero los cuatro test arrojaron los mismos resultados, donde se identificó estadísticamente que el **AG** con 30 poblaciones tiene un desempeño desfavorable frente a los **AG** que utilizaron 40 y 50 poblaciones. Por otra parte, estadísticamente no hubo una mejora al pasar de 40 a 50 poblaciones. Inclusive, el tiempo de alistamiento total promedio tuvo un mejor desempeño en las iteraciones con 40 poblaciones. Es importante resaltar, que se realizó una sola corrida por cada instancia.

Por último, se desea evaluar el desempeño del **AG** propuesto frente a la combinación de la regla de selección y adición que utilizando algoritmos semilla tuvo mejor desempeño en el tiempo total de alistamiento en esta investigación y que además había presentado un comportamiento favorable en la investigación de **Ho et al. (2008)**. Para este fin, los tiempos arrojados por el AG de 40 poblaciones se comparan con los de la combinación de la regla de selección **SNPA** y la regla de adición **SAMED**. El **anexo C.10** resume el ANOVA de efectos principales con  $\alpha=0.05$  que compara estos dos métodos y que utiliza también como bloque el tamaño de la ola de pedidos. Allí se observa que estadísticamente existe una diferencia en el tiempo total de alistamiento. Al revisar los tiempos de alistamiento promedio (**figura 8**) se identifica que el AG propuesto en este trabajo tiene

el mejor comportamiento en el tiempo total de alistamiento frente a la mejor combinación utilizando algoritmos semilla, y por consiguiente, respecto a todos los demás métodos estudiados.

## 10.2. DISTANCIA TOTAL RECORRIDA.

La segunda variable de desempeño analizada es la distancia total recorrida. El tiempo de alistamiento y la distancia recorrida guardan una alta correlación, pero como en esta investigación se utiliza una zona de consolidación para los algoritmos semilla que hacen división de las órdenes, existe una sobrecarga importante en el tiempo de alistamiento debido a los tiempos de reclasificación de los ítems en sus órdenes respectivas. Por lo tanto, concluir sobre las distancias es interesante, para observar el comportamiento de esta variable cuando se dividen las órdenes respecto a los métodos que no lo hacen. Los resultados sobre las distancias recorridas se observan en el **anexo D.1** para algoritmos semilla y en el **anexo D.2** para AG y la heurística FCFS. El análisis estadístico de la distancia recorrida se realizó dividiendo en cuatro grupos los métodos estudiados: algoritmos semilla sin dividir órdenes, algoritmos semilla dividiendo órdenes, AG y la heurística FCFS. Se realizó un ANOVA de efectos principales con  $\alpha=0.05$  tomando como bloque el número de pedidos en la ola, el resumen se observa en el **anexo E.1**. Existe diferencia significativa en la distancia recorrida entre los cuatro grupos. Para identificar en cuáles se da esta diferencia, se realizan con  $\alpha=0.05$  pruebas post hoc DHS de Tukey, Scheffe, DMS y Bonferroni. En el **anexo E.2** solo se presentan los resultados para la prueba DHS de Tukey, pero todas arrojan la misma conclusión principal: el efecto de dividir los pedidos que son métodos propuestos en este documento, presentan una alta favorabilidad para mejorar las distancias recorridas, que ya incluyen los desplazamientos en la zona de consolidación. Además, nótese que el AG presenta el mejor desempeño entre los grupos de métodos que no dividen las órdenes y el menos eficiente fue la heurística FCFS.

El comportamiento desfavorable que se observa en el tiempo total de alistamiento para los algoritmos semilla que dividen órdenes, se debe al tiempo de extracción de los rollos en la zona de consolidación, que como un promedio observado es de 15 segundos. Una estrategia de reclasificación de las órdenes más eficiente, podría arrojar mejores tiempos de alistamiento para estos métodos, razón por la cual se realiza el análisis de sensibilidad de la sección **10.3**.

## 10.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS TIEMPOS DE EXTRACCIÓN EN ALGORITMOS SEMILLA CUANDO SE DIVIDEN LAS ÓRDENES.

Un método de reclasificación más eficiente de los ítems en sus órdenes respectivas podría mejorar el tiempo total de alistamiento en los algoritmos semilla que permiten la división de órdenes. Además, los métodos acá propuestos pueden ser utilizados en industrias distintas al sector textil, donde las unidades sean más fáciles de manipular y permitan implementar métodos de reclasificación más eficientes.

El análisis de sensibilidad que se presenta en el **anexo F**, indica cuántos segundos se requieren en el tiempo de extracción unitario por rollo para igualar los tiempos del AG de 40 poblaciones, método que presentó mejor comportamiento en el tiempo total de alistamiento. Se observa que dichos tiempos promedio oscilan entre 8.1 y 11.2 segundos. Esto quiere decir, que el método de extracción requiere una mejora entre el 25% y el 46% para igualar los tiempos de alistamiento del AG de 40 poblaciones, esto es una mejora notable.

## 10.4. TIEMPOS DE CÓMPUTO

El OBP es un problema operativo y por lo tanto los tiempos de cómputo de los algoritmos deben ser tan cortos como sea posible. Para realizar la simulación, se utilizó un computador personal con un procesador *i5 de 2.50 GHz* y una memoria *RAM de 8.00 GB*. El **anexo G.1** presenta el resultado

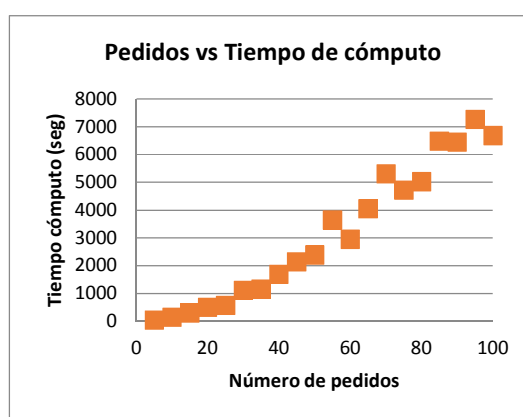
de los tiempos de cómputo para los algoritmos semilla, el **anexo G.2** para la heurística FCFS y los AG.

Se puede observar que los algoritmos semilla que dividen la orden y la heurística FCFS son los más eficientes en tiempos de cómputo, con corridas de pocos segundos. Los algoritmos semilla que no dividen las órdenes, si bien son menos eficientes que los dos grupos de métodos anteriores, también tienen tiempos de cómputo muy aceptables para los datos estudiados, con duraciones de aprox. 5 minutos para las instancias más prolongadas.

Los AG demandan mayor tiempo de cómputo de todos los métodos estudiados. A medida que aumentan los pedidos en la ola también aumenta esta variable, como se observa en la **figura 9**, que presenta un diagrama de dispersión para el AG con 40 poblaciones.

Los parámetros del AG también inciden en la misma. Es claro por ejemplo, que aumentar el número de poblaciones representará mayores tiempos de corrida, si se comparan los 3 escenarios de número de poblaciones acá estudiados. Por otra parte, aunque acá no se hizo análisis de sensibilidad de los operadores genéticos, las probabilidades de cruce y mutación también incidirán en la duración de las iteraciones, cuando estas suben aumenta la diversificación e intensificación, pero también lo harán los tiempos de procesamiento del computador.

**FIGURA 9. Comportamiento tiempos de cómputo AG cuando aumenta número de pedidos.**



Todo lo anterior indica que implementar este método para un caso real demandará un equilibrio en los parámetros utilizados y la búsqueda de estrategias, como por ejemplo generar una mejor población inicial o utilizar un computador con mayor velocidad de procesamiento. También dependerá de características propias de la operación la empresa donde se utilice, como la cantidad de pedidos que se generan en las olas y la periodicidad de ocurrencia de las mismas.

## 11. CONCLUSIONES.

- En esta investigación se estudió el problema de conformación de lotes, con el propósito de reducir el tiempo de alistamiento, validado en un almacén de rollos de tela en Colombia. Los métodos de conformación de lotes propuestos, son replicables en otros sectores. El almacén utilizado para la validación del problema tiene dos bloques; se consideraron movimientos horizontales y verticales en un sistema de preparación de pedidos, donde los alistadores recorren el almacén a pie o a bordo de un elevador. Se proponen reglas de selección y adición para algoritmos semilla que permiten la división de los pedidos, además de un algoritmo genético. Se utilizaron como punto de comparación la heurística FCFS y, las reglas de selección y adición que presentaron buen resultado en los algoritmos semilla estudiados por **Ho et al. (2008)**.
- El AG propuesto arrojó el menor tiempo total de alistamiento, al compararlo con las combinaciones de las reglas de selección y adición tomadas de **Ho et al. (2008)**, con la heurística FCFS y con los algoritmos semilla propuestos que dividen la orden.
- En los algoritmos semilla no hubo incidencia estadística sobre el tiempo total de alistamiento, al variar las reglas de selección de la semilla; caso contrario se presentó con las reglas de adición de órdenes. Por lo tanto, en la validación no fue significativa la semilla, sino la forma como se adicionaron órdenes o productos al lote.
- En los algoritmos semilla que no permiten dividir la orden, la combinación de la regla de selección de semilla SNPA y la regla de adición SAMED, presentó el menor tiempo total promedio de alistamiento. Para el caso de algoritmos semilla que dividen las órdenes, las reglas de adición DRP y RP, mostraron el mejor y peor desempeño respectivamente, en el tiempo total de alistamiento.
- Respecto a la distancia recorrida, los algoritmos semilla que dividen las órdenes arrojaron los mejores resultados, en comparación con los demás métodos estudiados. Sin embargo, el tiempo de extracción en la zona de consolidación genera mayor tiempo de alistamiento total para este grupo de métodos; por lo que una forma más eficiente de reclasificación de los productos, permitiría un menor tiempo de alistamiento.
- Para un problema operativo como el OBP, los tiempos de cómputo mostrados por los algoritmos semilla y la heurística FCFS fueron los mejores. El AG por su parte, requiere un mayor tiempo de procesamiento del computador y su utilidad dependerá del tiempo disponible para realizar las corridas.
- Para el sector textil, utilizar métodos de conformación de lotes: (1) garantiza el aprovechamiento de los recursos de alistamiento, (2) aumenta la eficiencia de los desplazamientos, y (3) disminuye el tiempo de alistamiento.

## 12. RECOMENDACIONES.

- La implementación de métodos de conformación de lotes, demanda inversión en tecnología en las compañías, dados los siguientes requerimientos:
  - ✓ Todos los métodos de conformación de lotes estudiados necesitan que la localización geográfica de los productos sea conocida, para medir distancias, e identificar la ubicación o el pasillo donde se encuentran. Por lo anterior, se debe utilizar un sistema de información WMS (Warehouse Management System) que permita conocer la ubicación de los productos almacenados, o un sistema de información que cumpla esta función.
  - ✓ Los algoritmos semilla que dividen las órdenes, requieren una tecnología adicional para garantizar la trazabilidad de los productos y facilitar su reclasificación al finalizar el alistamiento; esto implica el uso de códigos de barra o RFID, además de terminales e impresoras portátiles para etiquetar los productos durante el alistamiento.
  - ✓ Para evaluar el tiempo de alistamiento, los algoritmos genéticos necesitan una política de ruteo estándar al interior del almacén. Por lo tanto, es necesario un sistema de información que indique la ruta para alistar los productos de cada lote de pedidos.
- Antes de implementar un método de conformación de lotes, se recomienda analizar el perfil de los pedidos de cada empresa, ya que estos métodos son útiles para aquellas organizaciones con órdenes de pedidos pequeñas y susceptibles de agrupar en lotes. Además, estos métodos serán más útiles con un volumen de trabajo que justifique realizar los cambios tecnológicos y demás requeridos.
- Para futuras investigaciones se recomienda:
  - ✓ Estudiar estrategias para mejorar los tiempos de cómputo del AG, tales como introducir buenas soluciones en la población inicial a través de heurísticas u otros métodos, hacer un análisis más profundo de los parámetros para buscar convergencias más rápidas, o utilizar un computador de mayor rendimiento para el procesamiento de los datos.
  - ✓ Para los algoritmos semilla que dividen las órdenes, se recomienda diseñar y probar el desempeño de métodos de reclasificación de órdenes más eficientes que el propuesto, ya que las mejoras en la distancia recorrida en el almacén fueron sustanciales respecto a los métodos que no dividen las órdenes. Así mismo, deberían ser probados como un caso aplicado en otras industrias, donde los productos alistados sean más fáciles de manipular y reclasificar.

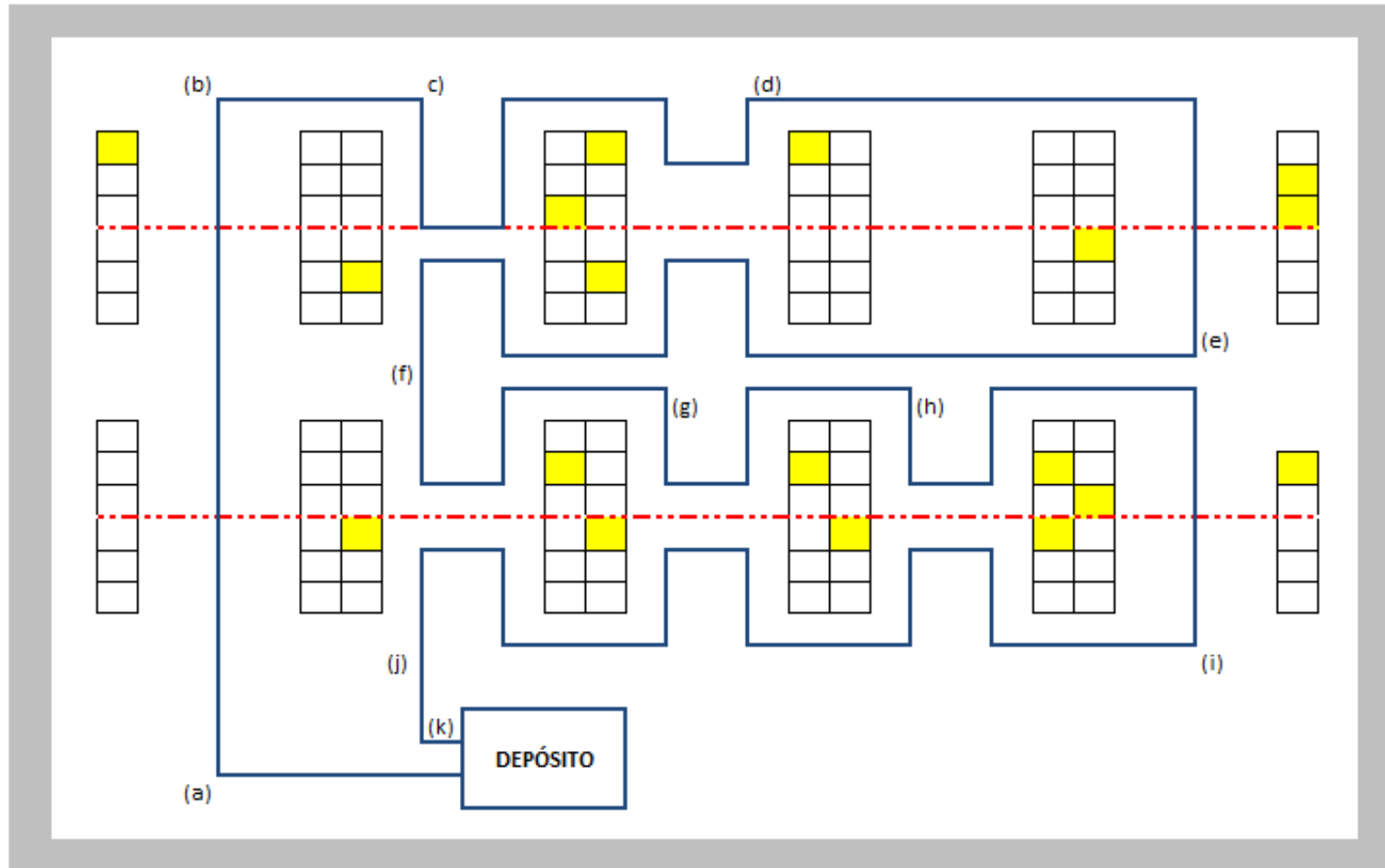
## BIBLIOGRAFÍA

- CADENA, Julián y DIAZ, Carlos. Decisiones fundamentales para estudiar el proceso de alistamiento de pedidos: Revisión de literatura. En: Revista Gerencia Tecnológica Informática. 2014, vol. 12 no. 34, p. 17-28.
- COYLE, John, BARDI, Edward y LANGLEY, John. The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective. Saint Paul, Estados Unidos: West Publishing, 1996. 736 p.
- CHEN, Mu-Chen., HUANG, Cheng-Lung, CHEN, Kai-Ying y WU, Hsiao-Pin. Aggregation of orders in distribution centers using data mining. En: Expert Systems with Applications. 2005, vol. 28 no. 3, p. 453-460.
- CLARKE, G. y WRIGHT, W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. En: Operations Research. 1964, vol. 12, p. 568-581.
- DAVIS, Lawrence. Applying Adaptive Algorithms to Epistatic Domains. En: Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1985, vol. 1, p. 162-164.
- DE KOSTER, René, ROODBERGEN, Kees Jan y VAN VOORDEN, Ronald. Reduction of walking time in the distribution center of De Bijenkorf. En: New Trends in Distribution Logistics, 1999a, p. 215-234.
- DE KOSTER, René, LE-DUC, Tho y ROODBERGEN, Kees Jan. Design and control of warehouse order picking: A literature review. En: European Journal of Operational Research. 2007, vol. 182 no. 2, p. 481-501.
- DE KOSTER, René, LE-DUC, Tho, y ZAERPOUR, Nima. Determining the number of zones in a pick-and-sort order picking system. En: International Journal of production Research. 2011, vol. 50 no. 3, p. 1-15.
- DE KOSTER, M., VAN DER POORT, E. y WOLTERS, M. Efficient Order Batching Methods in Warehouses. En: International Journal of Production Research. 1999b, vol. 37 no. 7, p. 1479-1504.
- DEKKER, R., DE KOSTER, M., ROODBERGEN, K. y Van KALLEVEEN, H. Improving Order-Picking Process Response Time at Ankor's Warehouse. En: Interfaces. 2004, vol. 34 no.4, 303-313.
- ELSAYED, E.A. Algorithms for optimal material handling in automatic warehousing systems. En: International Journal of Production Research. 1981, vol. 19 no. 5, 525-535.
- ELSAYED, E.A. y STERN, R.G. Computerized algorithms for order processing in automated warehousing systems. En: International Journal of Production Research. 1983, vol. 21 no. 4, 579-586.
- ELSAYED, E.A. y UNAL, O.I. Order batching algorithms and travel-time estimation for automated storage/retrieval systems. En: International Journal of Production Research. 1989, vol. 27 no. 7, p. 1097-1114.
- FRAZELLE, Edward. Supply Chain Strategy: The Logistics of supply chain management. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2001. 357 p.
- GADEMANN, Noud y VAN DE VELDE Steef. Order batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. En: IIE Transactios. 2005, vol. 37, p. 63-75.
- GHIANI, Gianpaolo, LAPORTE, Gilbert y MUSMANNO, Roberto. Introduction to Logistics Systems and Planning Control. Chichester, Inglaterra: Wiley, 2004. 352 p.

- GIBSON, David y SHARP, Gunter. Order batching procedures. En: European Journal of Operational Research. 1992, vol. 58 no.1, p. 57–67.
- GLOVER, Fred y KOCHENBERGER Gary. Handbook of metaheuristics. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2003. 556 p.
- HALL, Randolph. Distance approximation for routing manual pickers in a warehouse. En: IIE Transactions. 1993, vol. 25, p. 77–87.
- HAUSMAN, Warren H., SCHWARZ, Leroy B. y GRAVES, Stephen C. Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. En: Management Science. 1976, vol. 22 no. 6, p. 629–638.
- HENN, Sebastian y WÄSCHER, Gerhard. Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. En: International Journal of Production Research. 2012, vol. 222, p. 484-494.
- HO, Ying-Chin, SU, Teng-Sheng. y SHI, Zhi-Bin. Order batching methods for an order-picking warehouse with two cross aisles. En: Computers & Industrial Engineering. 2008, vol. 55 no. 2, p. 321-347.
- HO, Y.C. y TSENG, Y.Y. A study on order-batching methods of order-picking in a distribution center with two cross aisles. En: International Journal of Production Research. 2006, vol. 44 no. 17, p. 3391-3417.
- HWANG, Hark, BAEK, Won Jang, y LEES Moon-Kyu. Clustering algorithms for order picking in an automated storage and retrieval system. En: International Journal of Production Research. 1988, vol. 26 no. 2, p. 189-201.
- HSU, Chih-Ming, CHEN Kai-Ying, y CHEN, Mu-Chen. Batching orders by minimizing travel distance with genetic algorithms. En: Computers in Industry. 2005, vol. 56 no. 2, p. 169-178.
- INEXMODA. Observatorio económico nacional del sistema moda plataforma de innovación. En: <http://observatorioeconomico.inexmoda.org.co/As%C3%ADva/Elsectorencifras.aspx>. . 2012.
- LIN Che Hung y LU luan Yuan. The procedure of determining the order picking strategies in distribution center. En: International Journal of Production Economics. 1999, vol. 60 no. 61, p. 301-307.
- PÁEZ, Ana Milena y PINEDA, Julieth Katerine. Evaluación del proceso de alistamiento de pedidos y análisis de las mejores prácticas del proceso para la empresa COMERTEX S.A. Trabajo de Grado Ingeniería Industrial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de estudios industriales y empresariales. 2012. 136 p.
- PAN, C-H. y LIU S-Y. A comparative study of order batching algorithms. En: Omega International Journal of Management Science.1995, vol. 23 no. 6, p. 691-700.
- PAN, Jason Chao-Hsien, SHIH, Po-Hsun y Wu, Ming-Hung. Storage assignment problem with travel distance and blocking considerations for a picker-to-part order picking system. En: Computers & Industrial Engineering. 2012, vol. 62 no.2, p. 527–535.
- RATLIFF, Donald y ROSENTHAL, Arnon. Order picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem. En: Operations Research.1983, vol. 31 no.3, p. 507–521.
- REEVES, Colin. A genetic algorithm for flow shop secuencing. En: Computers and Operations Research. 1995, vol. 22, p. 5-13.
- ROODBERGEN, Kees Jan y DE KOSTER, René. Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. En: International Journal of Production Research. 2001, vol. 39 no.9, p. 1865–1883.

- ROSENWEIN M.B. A comparison of heuristics for the problem of batching orders for warehouse selection. En: International Journal of Production Research. 1996, vol. 34 no. 3, p. 657-664.
- VAUGHAN, T.S. y PETERSEN, Charles. The effect of warehouse cross aisle on order picking efficiency. En: International Journal of Production Research. 1999, vol. 37 no. 4, p. 881–897.

**ANEXO A.** Ejemplo de recorrido en el almacén con una política de punto medio para almacén de más de un bloque.



## ANEXO B. Resultados sobre el tiempo total de alistamiento para los métodos estudiados.

### B.1. Resultados sobre el tiempo de alistamiento para algoritmos semilla (minutos).

No	Método selección	Método adición/ No Órdenes en la ola	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	SNPA	SAMAD	35,89	68,34	79,52	100,58	105,64	171,51	130,77	187,55	212,18	214,79	361,79	258,34	302,72	381,00	333,88	315,12	396,75	375,48	392,02	358,52
2		SAMED	35,95	75,71	77,65	100,43	101,04	167,81	132,35	184,17	208,67	212,50	346,87	262,72	296,80	374,81	323,24	309,73	382,93	361,35	389,41	349,99
3		SAMRD	35,95	75,71	78,52	100,43	101,04	169,13	132,88	182,74	212,20	212,50	347,66	259,48	296,62	374,64	327,49	312,40	385,19	363,41	383,61	351,35
4		SNAPA	35,89	74,85	81,66	103,20	104,25	172,02	134,63	192,19	215,61	220,86	359,37	262,18	297,99	374,77	332,74	312,81	396,50	379,35	390,31	362,01
5	SNPL	SAMAD	35,89	68,34	79,52	100,58	106,89	171,51	130,77	185,25	216,28	209,78	359,07	256,11	301,71	375,98	333,50	319,43	392,86	374,93	390,08	354,38
6		SAMED	35,95	75,71	78,18	102,43	101,04	167,81	132,35	182,39	214,01	215,49	355,35	259,97	298,16	372,65	322,93	310,95	385,55	364,08	395,66	352,31
7		SAMRD	35,95	75,71	78,78	100,43	101,04	169,13	132,88	186,27	213,49	215,49	359,52	261,20	301,54	375,61	327,49	313,98	387,85	366,71	385,13	350,10
8		SNAPA	35,89	74,85	81,66	103,20	104,25	172,02	134,63	191,70	216,78	220,23	365,74	258,05	304,03	375,81	333,93	317,98	399,18	374,14	393,91	359,37
9	SRCA	SAMAD	35,89	68,74	79,56	100,77	105,54	171,10	131,90	187,11	212,67	213,90	355,65	258,37	299,04	374,30	335,95	314,42	396,91	366,60	389,65	353,58
10		SAMED	35,95	75,71	79,16	103,35	101,04	169,11	133,40	183,85	216,97	209,52	356,58	265,66	290,71	370,81	327,27	307,98	386,71	360,78	392,03	348,90
11		SAMRD	35,95	75,71	78,78	103,35	101,04	170,34	133,63	183,05	210,36	213,76	359,22	259,48	298,70	365,15	333,72	320,94	381,86	363,27	392,30	347,63
12		SNAPA	35,89	70,81	80,16	104,56	104,95	171,94	134,67	191,23	216,90	222,46	361,43	258,98	301,14	380,64	335,76	317,08	396,16	377,46	400,76	355,63
13	PDEMC	RP	43,22	74,49	83,09	103,86	105,46	173,34	140,86	189,76	224,99	220,49	379,14	267,77	315,87	398,88	329,49	337,55	431,78	380,00	429,99	386,68
14		DEP	42,30	77,23	86,41	107,57	110,94	173,21	144,04	183,04	220,33	222,78	349,36	260,03	300,67	365,24	323,22	320,97	394,35	368,26	401,74	353,64
15		DRP	42,30	77,23	84,78	106,55	110,24	166,76	144,76	187,68	221,73	223,67	349,05	263,09	300,70	359,92	310,51	327,65	403,20	366,77	394,89	354,30
16	PDEMAC	RP	41,38	74,83	83,77	109,76	108,74	175,77	143,29	188,58	225,17	223,29	374,20	258,37	315,68	385,33	327,83	337,77	436,42	391,32	433,50	385,39
17		DEP	43,79	76,67	85,07	104,79	108,99	171,40	141,69	188,56	218,89	225,43	351,28	259,56	301,22	363,00	314,90	325,40	394,10	369,23	393,48	356,98
18		DRP	43,05	76,67	87,44	104,02	108,99	168,60	142,91	186,36	222,71	221,45	351,22	257,50	297,53	362,03	315,29	319,46	393,79	367,43	395,39	349,23
19	PDEMD	RP	42,30	74,49	85,90	103,89	107,41	178,30	144,80	188,28	226,94	220,22	378,85	263,33	311,02	385,41	326,28	332,79	416,25	386,12	411,73	372,38
20		DEP	42,30	76,42	88,71	109,53	110,17	171,08	144,27	189,87	220,12	225,21	354,53	261,31	301,51	363,35	320,85	324,76	398,33	364,59	395,25	353,78
21		DRP	42,30	77,15	87,74	107,31	113,13	171,30	144,27	188,87	222,66	224,55	352,81	260,87	299,75	362,15	317,24	327,40	391,36	364,44	391,44	355,94
22	PDEMD	RP	43,13	74,83	83,61	108,42	107,18	173,10	142,18	190,03	224,56	223,03	379,08	268,18	317,57	385,73	333,14	338,70	434,48	389,41	439,21	382,02
23		DEP	43,32	76,66	83,73	103,86	107,50	166,61	139,98	186,76	219,35	219,33	357,20	251,86	300,03	362,06	315,61	325,23	389,59	367,00	393,02	357,51
24		DRP	42,30	76,66	86,22	102,98	107,50	166,66	145,29	185,74	213,31	220,58	345,64	255,71	293,62	364,09	317,20	319,69	385,30	369,22	399,24	352,02

**B.2. Resultados sobre el tiempo de alistamiento para Algoritmos genéticos y heurística FCFS.**

Método/No órdenes		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
25	<b>AG p= 30</b>	35,89	68,34	75,99	97,86	96,04	163,06	129,47	178,45	206,64	207,32	349,63	251,70	293,10	359,91	316,12	311,85	387,57	361,34	391,91	348,45
26	<b>AG p= 40</b>	35,89	68,34	76,80	97,43	97,63	163,14	129,13	177,98	205,30	207,61	347,93	250,53	292,18	355,09	311,95	310,17	386,75	359,58	388,92	346,96
27	<b>AG p= 50</b>	35,89	68,34	76,54	96,54	97,04	163,97	128,39	176,87	206,34	207,18	347,93	251,06	292,42	358,20	313,44	312,01	385,66	357,77	389,76	347,04
28	<b>FCFS</b>	35,89	70,7	78,07	102,35	102,34	168,95	134,82	189,7	216,3	219,21	358,94	262,31	303,52	372,09	328,67	322,88	403,51	377,98	410,53	366,61

**ANEXO C. Resultado análisis estadístico para el tiempo total de alistamiento.**

**C.1. Resumen ANOVA para medir efecto en el tiempo total de los algoritmos semilla sin dividir las órdenes.**

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Efectos principales</b>					
Pedidos en la ola	3336902,485	19	175626,447	16976,107	,000
Regla selección	21,654	2	10,827	1,047	,353
Regla adición	964,680	3	321,560	31,082	,000
<b>Interacciones</b>					
Regla selección * Regla adición	65,450	6	10,908	1,054	,391

**C.2. Resumen pruebas post hoc (DHS de Tukey) para comparar las reglas de adición cuando no se dividen las órdenes.**

Test	(I)Regla adición	(J)Regla adición	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DHS de Tukey	SAMAD	SAMED	2,7385 <sup>*</sup>	,58724	,000	1,2177	4,2593
		SAMRD	2,1235 <sup>*</sup>	,58724	,002	,6027	3,6443
		SNAPA	-2,3708 <sup>*</sup>	,58724	,000	-3,8917	-,8500
	SAMED	SAMAD	-2,7385 <sup>*</sup>	,58724	,000	-4,2593	-1,2177
		SAMRD	-,6150	,58724	,722	-2,1358	,9058
		SNAPA	-5,1093 <sup>*</sup>	,58724	,000	-6,6302	-3,5885
	SAMRD	SAMAD	-2,1235 <sup>*</sup>	,58724	,002	-3,6443	-,6027
		SAMED	,6150	,58724	,722	-,9058	2,1358
		SNAPA	-4,4943 <sup>*</sup>	,58724	,000	-6,0152	-2,9735
	SNAPA	SAMAD	2,3708 <sup>*</sup>	,58724	,000	,8500	3,8917
		SAMED	5,1093 <sup>*</sup>	,58724	,000	3,5885	6,6302
		SAMRD	4,4943 <sup>*</sup>	,58724	,000	2,9735	6,0152

**C.3. Resumen ANOVA para medir efecto en el tiempo total de algoritmos cuando se dividen las órdenes.**

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Efectos principales</b>					
Problema	3372050,633	19	177476,349	3579,032	,000
Regla selección	36,563	3	12,188	,246	,864
Regla adición	6495,708	2	3247,854	65,497	,000
<b>Interacciones</b>					
Regla selección * Regla adición	309,261	6	51,543	1,039	,401

**C.4. Resumen pruebas post hoc (DHS de Tukey) para comparar las reglas de adición cuando se dividen las órdenes.**

Test	(I)Regla adición	(J)Regla adición	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DHS de Tukey	DEP	DRP	,7926	1,11342	,757	-1,8356	3,4209
		RP	-10,6184 <sup>*</sup>	1,11342	,000	-13,2466	-7,9901
	DRP	DEP	-,7926	1,11342	,757	-3,4209	1,8356
		RP	-11,4110 <sup>*</sup>	1,11342	,000	-14,0393	-8,7827
	RP	DEP	10,6184 <sup>*</sup>	1,11342	,000	7,9901	13,2466
		DRP	11,4110 <sup>*</sup>	1,11342	,000	8,7827	14,0393

**C.5. Resumen ANOVA para medir efecto en el tiempo total por la decisión de dividir o no las órdenes en algoritmos semilla.**

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Pedidos en la ola	6704799,098	19	352884,163	6591,430	,000
División de la orden	3486,575	1	3486,575	65,125	,000

**C.6. Resultado en el tiempo promedio al comparar la decisión de dividir o no las órdenes.**

Decisión/ No órdenes	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
No dividir los pedidos	35,92	73,35	79,43	101,94	103,15	170,29	132,91	186,46	213,84	215,11	357,35	260,05	299,10	374,68	330,66	314,40	390,70	368,96	391,24	353,65
Dividir los pedidos	42,64	76,11	85,54	106,05	108,85	171,34	143,20	187,79	221,73	222,50	360,20	260,63	304,60	371,43	320,96	328,11	405,75	373,65	406,57	363,32

**C.7.** Resumen ANOVA para medir efecto de todas las combinaciones de los algoritmos semilla y regla FCFS en el tiempo total.

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Efectos principales</b>					
Pedidos en la ola	7000240,322	19	368433,701	9866,919	,000
Método	11395,949	24	474,831	12,716	,000

**C.8.** Resumen ANOVA para medir efecto del tamaño de la población del AG en el tiempo total.

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Efectos principales</b>					
Pedidos en la ola	810943,143	19	42681,218	48914,117	,000
Tamaño población	13,292	2	6,646	7,617	,002

**C.9.** Resumen Pruebas post hoc (DHS de Tukey) para analizar diferencias en el tiempo total por el tamaño de la población del AG.

Prueba	(I) Tamaño población	(J) Tamaño población	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DHS de Tukey	población=30	p=40	1,0665*	,29539	,002	,3461	1,7869
		p=50	,9125*	,29539	,010	,1921	1,6329
	población =40	p=30	-1,0665*	,29539	,002	-1,7869	-,3461
		p=50	-,1540	,29539	,861	-,8744	,5664
	población =50	p=30	-,9125*	,29539	,010	-1,6329	-,1921
		p=40	,1540	,29539	,861	-,5664	,8744

**C.10.** Resumen ANOVA que compara desempeño en tiempo total del AG y el mejor algoritmo semilla.

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Pedidos en la ola	537424,781	19	28285,515	2003,672	,000
Método	179,870	1	179,870	12,742	,002

**ANEXO D. Resultados sobre la distancia total recorrida para los métodos estudiados.**

**D.1. Resultados sobre la distancia total recorrida para algoritmos semilla (metros).**

No	Método selección	Método adición/Órdenes en la ola	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	SNPA	SAMAD	720	1286	1859	2169	2495	3732	2620	4321	4608	4576	7298	5524	6525	8270	7426	6255	8297	8419	8005	7798
2		SAMED	723	1617	1775	2163	2288	3609	2632	4235	4509	4484	6673	5779	6305	8038	6988	6129	7847	7844	7940	7462
3		SAMRD	723	1617	1814	2163	2288	3669	2656	4112	4668	4484	6709	5633	6299	7984	7195	6176	7949	7891	7679	7532
4		SNAPA	720	1579	1955	2288	2432	3755	2735	4532	4821	4848	7189	5708	6459	7990	7376	6215	8283	8601	7985	7880
5	SNPL	SAMAD	720	1286	1859	2169	2551	3732	2620	4217	4746	4361	7219	5423	6480	8044	7409	6449	8169	8394	7918	7612
6		SAMED	723	1617	1799	2253	2288	3609	2632	4155	4691	4618	7008	5656	6410	7953	6974	6184	8012	7967	8218	7566
7		SAMRD	723	1617	1825	2163	2288	3669	2656	4271	4668	4618	7195	5711	6520	8028	7195	6247	8010	8040	7791	7519
8		SNAPA	720	1579	1955	2288	2432	3755	2735	4510	4815	4819	7475	5522	6625	8037	7430	6390	8404	8425	8088	7769
9	SRCA	SAMAD	720	1304	1861	2178	2495	3714	2671	4312	4630	4536	7112	5525	6403	7969	7519	6282	8304	8019	7898	7576
10		SAMED	723	1617	1843	2294	2288	3668	2679	4220	4824	4350	7063	5853	6121	7858	7181	6006	8018	7862	8011	7413
11		SAMRD	723	1617	1825	2294	2288	3723	2690	4129	4585	4540	7182	5633	6437	7647	7476	6516	7799	7928	8023	7364
12		SNAPA	720	1397	1888	2349	2464	3751	2737	4489	4879	4920	7282	5564	6451	8254	7512	6408	8268	8516	8353	7664
13	PDEMC	RP	727	943	1255	1510	1454	2449	1883	2660	3195	2757	4647	3566	4219	5784	4221	4422	6002	4843	6115	5623
14		DEP	686	1066	1404	1663	1733	2441	2026	2565	3078	2856	3758	3295	3869	4648	4153	4136	4896	4541	5307	4491
15		DRP	686	1066	1331	1623	1701	2260	2047	2767	3095	2893	3734	3358	3910	4562	3748	4271	5117	4515	5043	4565
16	PDEMAC	RP	644	958	1282	1769	1583	2447	1934	2707	3209	2747	4501	3157	4260	5180	4249	4414	6311	5409	6228	5436
17		DEP	753	1040	1341	1546	1593	2357	1862	2806	3021	2956	3751	3173	3924	4517	3847	4092	4935	4535	5001	4589
18		DRP	719	1040	1442	1512	1593	2294	1906	2715	3132	2781	3828	3080	3767	4576	3911	3948	4824	4559	4934	4311
19	PDEMD	RP	686	943	1378	1505	1525	2615	1992	2767	3290	2702	4673	3314	3940	5257	4219	4332	5543	5043	5423	4959
20		DEP	686	1030	1458	1752	1699	2400	1968	2814	3076	2946	3880	3355	3854	4582	4107	4159	5024	4483	4967	4485
21		DRP	686	1062	1456	1658	1783	2411	1968	2783	3084	2872	3900	3287	3764	4532	4035	4235	4849	4385	4825	4542
22	PDEMD	RP	723	958	1278	1715	1518	2327	1942	2722	3200	2885	4770	3496	4443	5312	4348	4508	6236	5238	6521	5489
23		DEP	732	1040	1283	1499	1577	2255	1843	2679	2927	2745	3980	2898	3882	4531	3920	4123	4792	4436	4977	4465
24		DRP	686	1040	1395	1463	1577	2255	2071	2633	2727	2747	3583	3076	3566	4520	4037	3871	4614	4534	5148	4337

**D.2. Resultados sobre la distancia total recorrida para Algoritmos genéticos y heurística FCFS (metros).**

Método/No órdenes		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
25	<b>AG p= 30</b>	720	1286	1700	2047	2153	3395	2503	3921	4359	4254	6797	5295	6288	7365	6677	6223	8038	7852	8057	7422
26	<b>AG p= 40</b>	720	1286	1736	2028	2178	3355	2546	3900	4299	4264	6674	5242	6101	7151	6484	6148	7997	7762	7918	7221
27	<b>AG p= 50</b>	720	1286	1678	1987	2152	3393	2454	3907	4299	4244	6674	5208	6114	7303	6590	6229	7904	7743	7957	7282
28	<b>FCFS</b>	720	1392	1747	2249	2393	3617	2744	4436	4746	4774	7169	5714	6570	7913	7230	6657	8600	8531	8836	8087

### ANEXO E. Resultados análisis estadístico para la distancia total recorrida.

E.1. Resumen ANOVA para medir efecto de la división de los pedidos en la distancia total recorrida.

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Efectos principales</b>					
Pedidos en la ola	2277570900,620	19	119872152,664	366,659	,000
Grupo	464164385,709	3	154721461,903	473,254	,000

E.2. Pruebas post hoc para la distancia recorrida.

Prueba	(I)Grupo	(J)Grupo	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
						Límite inferior	Límite superior
DHS de Tukey	AG	DIVIDIENDO	1586,6033 <sup>*</sup>	82,52919	,000	1373,9179	1799,2888
		FCFS	-431,5317 <sup>*</sup>	147,63270	,019	-811,9949	-51,0684
		SIN DIVIDIR	-288,9058 <sup>*</sup>	82,52919	,003	-501,5913	-76,2204
	DIVIDIENDO	AG	-1586,6033 <sup>*</sup>	82,52919	,000	-1799,2888	-1373,9179
		FCFS	-2018,1350 <sup>*</sup>	133,07432	,000	-2361,0799	-1675,1901
		SIN DIVIDIR	-1875,5092 <sup>*</sup>	52,19604	,000	-2010,0232	-1740,9951
	FCFS	AG	431,5317 <sup>*</sup>	147,63270	,019	51,0684	811,9949
		DIVIDIENDO	2018,1350 <sup>*</sup>	133,07432	,000	1675,1901	2361,0799
		SIN DIVIDIR	142,6258	133,07432	,707	-200,3191	485,5708

**ANEXO F.** Tiempos de extracción unitario (segundos) en algoritmos semilla que dividen las órdenes que se requieren para igualar el tiempo total del AG con 40 poblaciones.

No	Método selección	Método adición/ No órdenes	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	PROMEDIO
13	PDEMC	RP	-1.92	7.76	9.01	9.86	10.11	10.10	7.96	10.41	8.25	10.89	8.90	10.38	9.75	6.24	11.16	8.87	6.98	11.49	7.49	7.58	8.56
14		DEP	0.21	4.54	5.85	6.89	6.68	10.17	6.05	13.03	9.85	10.16	14.72	12.46	13.12	12.97	12.53	12.58	13.65	13.51	12.65	13.75	10.27
15		DRP	0.21	4.54	7.40	7.70	7.12	13.26	5.62	11.22	9.37	9.87	14.78	11.64	13.11	14.03	15.32	11.09	12.07	13.76	13.91	13.63	10.48
16	PDEMAC	RP	2.33	7.36	8.36	5.14	8.06	8.94	6.50	10.87	8.19	10.00	9.87	12.90	9.80	8.95	11.52	8.82	6.16	9.54	6.85	7.82	8.40
17		DEP	-3.23	5.20	7.12	9.11	7.90	11.04	7.46	10.88	10.34	9.31	14.35	12.58	13.00	13.42	14.35	11.59	13.69	13.34	14.17	13.13	10.44
18		DRP	-1.52	5.20	4.87	9.73	7.90	12.38	6.73	11.74	9.03	10.58	14.36	13.13	13.82	13.61	14.27	12.92	13.75	13.65	13.82	14.58	10.73
19	PDEMD	RP	0.21	7.76	6.33	9.83	8.89	7.72	5.60	10.99	7.58	10.98	8.96	11.57	10.83	8.94	11.86	9.94	9.75	10.44	10.83	10.25	8.96
20		DEP	0.21	5.49	3.66	5.32	7.16	11.19	5.92	10.37	9.92	9.38	13.71	12.11	12.93	13.35	13.05	11.73	12.94	14.14	13.84	13.73	10.01
21		DRP	0.21	4.64	4.58	7.10	5.31	11.08	5.92	10.76	9.05	9.59	14.05	12.23	13.32	13.59	13.84	11.14	14.18	14.16	14.54	13.32	10.13
22	PDEMAD	RP	-1.71	7.36	8.51	6.21	9.03	10.22	7.17	10.31	8.40	10.08	8.91	10.27	9.38	8.87	10.36	8.61	6.50	9.87	5.80	8.45	8.13
23		DEP	-2.15	5.21	8.40	9.86	8.83	13.33	8.49	11.58	10.18	11.26	13.19	14.64	13.26	13.61	14.20	11.63	14.49	13.72	14.25	13.03	11.05
24		DRP	0.21	5.21	6.03	10.56	8.83	13.31	5.30	11.98	12.25	10.86	15.45	13.61	14.68	13.20	13.85	12.87	15.26	13.34	13.11	14.05	11.20

**ANEXO G. Resultados en tiempos de cómputo para los métodos estudiados.**

**G.1. Tiempos de cómputo para los algoritmos semilla (segundos).**

No	Método selección	Método adición/Órdenes en la ola	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1	SNPA	SAMAD	4,8	4,1	8,6	11,8	11,9	23,8	24,8	33,1	33,4	35,2	57,1	41,2	55,2	91,9	67,2	71,3	102,4	83,6	113,3	76,0
2		SAMED	2,4	4,3	8,6	12,1	11,8	23,3	22,3	32,5	33,8	35,2	58,4	41,5	54,9	89,3	68,8	70,3	98,4	83,5	112,3	74,4
3		SAMRD	2,4	4,2	8,1	12,2	11,8	24,4	23,8	25,9	34,0	35,1	56,5	40,9	55,2	91,5	74,9	81,1	116,4	89,1	124,2	88,0
4		SNAPA	2,3	4,2	9,0	12,0	11,1	22,8	21,7	24,0	36,0	34,6	60,0	43,5	53,2	88,7	68,0	70,3	97,3	79,7	106,1	68,2
5	SNPL	SAMAD	2,2	4,1	8,5	11,7	12,0	23,7	24,6	25,6	33,8	34,6	59,7	41,8	53,7	90,3	67,0	72,3	104,5	83,4	111,8	77,0
6		SAMED	2,4	4,3	8,5	11,9	11,8	23,3	22,3	26,8	34,8	35,9	58,4	41,1	55,7	89,3	70,9	71,2	112,8	85,4	116,8	82,3
7		SAMRD	2,3	4,2	7,9	12,4	11,8	24,3	23,9	36,2	46,2	53,4	77,5	53,9	74,5	122,3	91,8	98,1	141,5	112,9	153,9	109,1
8		SNAPA	2,2	4,3	9,1	11,9	11,0	22,9	21,7	32,6	44,5	43,4	74,6	51,5	69,5	115,2	87,6	90,6	135,3	103,8	144,1	94,8
9	SRCA	SAMAD	3,6	7,3	15,9	22,5	23,0	46,7	46,1	49,6	64,5	69,8	114,7	79,5	107,0	174,8	132,4	137,8	197,1	158,0	222,5	150,6
10		SAMED	3,7	7,7	16,0	22,8	22,6	45,5	44,1	66,2	90,9	92,4	152,9	110,1	147,9	231,1	188,5	191,0	283,2	229,2	304,1	222,1
11		SAMRD	3,6	7,7	15,3	22,6	22,7	46,5	46,3	70,0	85,3	93,4	151,3	105,9	146,6	239,3	189,1	194,1	271,0	218,6	312,4	207,8
12		SNAPA	3,3	7,7	14,8	22,2	20,9	45,3	44,0	65,0	88,0	88,3	152,3	105,6	137,9	230,9	169,2	178,2	252,2	211,3	289,9	185,5
13	PDEMC	RP	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,4	1,7	1,9	1,9	2,9	2,0	2,5	2,9	2,5	2,5	3,4	3,5	3,3	3,1
14		DEP	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,7	1,5	1,7	2,1	2,1	4,1	2,6	3,2	4,3	3,6	3,5	4,9	4,8	5,0	4,3
15		DRP	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,7	1,5	1,9	2,0	2,3	4,1	2,5	3,4	4,1	3,3	3,5	4,9	4,8	5,0	4,3
16	PDEMAC	RP	1,3	1,2	1,4	1,4	1,4	1,6	1,5	1,7	1,8	1,8	3,0	2,0	2,5	3,0	2,6	2,6	3,3	3,5	3,3	3,1
17		DEP	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,7	1,5	1,8	2,2	2,1	4,0	2,4	3,3	4,2	3,4	3,8	5,2	5,0	4,9	4,3
18		DRP	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,7	1,5	1,8	2,1	2,1	4,0	2,5	3,4	4,2	3,4	3,6	4,9	4,9	5,0	4,4
19	PDEMD	RP	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,6	1,5	1,7	1,8	1,8	2,9	2,2	2,6	3,0	2,6	2,5	3,6	3,5	3,4	3,1
20		DEP	1,2	1,2	1,3	1,4	1,4	1,7	1,5	1,8	2,0	2,4	4,0	2,7	3,2	4,4	3,4	3,5	5,1	4,9	5,1	4,3
21		DRP	1,2	1,2	1,3	1,3	1,5	1,7	1,5	2,0	2,1	2,3	4,0	2,6	3,2	4,2	3,6	3,4	4,9	4,8	5,1	4,4
22	PDEMAC	RP	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,6	1,5	1,7	1,8	1,8	3,0	2,0	2,5	3,0	2,5	2,6	3,3	3,6	3,4	3,1
23		DEP	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,7	1,5	1,8	2,1	2,2	4,1	2,5	3,5	4,3	3,5	3,5	5,0	4,9	5,2	4,6
24		DRP	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,7	1,5	1,8	2,0	2,2	4,2	2,4	3,2	4,3	3,3	3,5	4,9	4,8	5,0	4,4

**G.2. Tiempos de cómputo para AG y heurística FCFS (segundos).**

No	Método selección	Método adición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
25	AG POR PEDIDOS $\rho=30$		35,2	107,5	223,0	376,5	427,3	797,9	737,8	1314,9	1850,8	1752,4	2645,3	2256,0	3153,3	4506,4	3629,7	3881,4	5009,7	5082,4	5828,4	5359,1
26	AG POR PEDIDOS $\rho=40$		46,4	145,2	304,1	502,1	575,1	1104,5	1148,1	1687,2	2147,0	2393,3	3642,0	2952,5	4054,1	5313,5	4726,0	5032,3	6492,1	6459,2	7276,8	6695,0
27	AG POR PEDIDOS $\rho=50$		57,1	175,7	370,5	612,0	700,8	1335,5	1221,6	2051,0	2621,7	2869,2	4647,3	3770,2	5007,7	6581,3	5943,9	6311,4	8299,4	7491,5	9007,0	8415,8
28	FCFS		0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	1,1	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2	1,1	1,2	1,1