



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos considerando $K$ equipos heterogéneos**

**Rodrigo Andrés Gómez Montoya**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2015

# **Problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos considerando $K$ equipos heterogéneos**

Putaway and Picking batching and routing  
problems considering  $K$  heterogeneous material  
handling equipment.

**Rodrigo Andrés Gómez Montoya**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Doctor en Ingeniería: Industria y Organizaciones**

Director:

Alexander Alberto Correa Espinal, Ph.D.

Línea de Investigación:

Logística en la gestión de almacenes y Centros de Distribución

Grupo de Investigación:

Modelamiento para la Gestión de Operaciones (GIMGO)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2015

*A Dios rey supremo de mi vida, a su hijo Jesucristo mi compañero fiel y al Espiritu Santo cuya sabiduría me inspiró en todos los momentos de mi proceso de formación desde el pregrado, la maestría hasta el doctorado. A mi madre y mi abuela mujeres que me han acompañado incondicionalmente y han dado lo mejor para alcanzar esta gran meta en mi proyecto de vida.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi director Alexander Correa Espinal, que ha sido mi maestro académico cuya dedicación y paciencia conllevaron a la obtención de un producto de calidad y sello Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

Al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid que me apoyó incondicionalmente en el proceso de formación doctoral no solo a nivel económico, sino también con descargas de tiempo para alcanzar esta meta.

Al profesor Pablo Cortés Achedad por su orientación científica durante la pasantía de investigación desarrollada en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Un gran referente académico cuyas enseñanzas consolidaron mi proceso de formación doctoral.

A mi familia especialmente mi madre por creer de manera incondicional en mis capacidades y competencias para el logro de los objetivos académicos trazados.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en la cual me formé como Ingeniero Industrial, Magister en Ingeniería: Ingeniería Administrativa y ahora como Doctor en Ingeniería: Industria y Organizaciones. La Universidad no sólo me formó técnicamente, sino que también como persona y profesional orientado a contribuir al desarrollo de Antioquia y Colombia.

## Resumen

Esta tesis doctoral tiene como objetivo modelar problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos. En la preparación de pedidos, se modeló un problema que considera  $K$  equipos de materiales (EMMateriales) heterogéneos,  $n$  productos,  $m$  posiciones de almacenamiento y la condición de disponibilidad del inventario, lo cual permite superar las limitaciones detectadas en la literatura científica. De otra parte, al revisar el estado del arte del acomodo no se identificaron problemas que abordan la formación de lotes con ruteo, sino que únicamente solucionan el problema de asignación de posiciones de almacenamiento (*Slotting*). Para solucionar la conformación de lotes en cada uno de los problemas modelados, se desarrollaron reglas de prioridad y metaheurísticos basados en búsqueda local inteligente. En tanto, para resolver el ruteo se modelaron metaheurísticos de búsqueda tabú híbridos con estrategias de intensificación y diversificación. Las reglas y metaheurísticos para cada problema, se integraron a un *WMS (Warehouse Management System)* y fueron modelados considerando las características y restricciones particulares de estas operaciones del Centro de Distribución (CEDI). Diseños de experimentos (*Designs of Experiment\_DoE*) de parcelas divididas no sólo fueron implementados para validar los problemas modelados sino también para realizar un análisis numérico exhaustivo que permitió identificar las combinaciones de niveles de los factores significativos que generan los menores tiempos promedios totales y la mayor eficiencia en el acomodo y la preparación de pedidos. El uso de diseños de parcelas divididas puede considerarse un aporte metodológico al estado del arte, ya que este enfoque no fue detectado en la literatura para resolver este tipo de problemas. A partir del análisis experimental se identificó que los metaheurísticos para la formación de lotes, *INS (Intelligent Neighborhood Search)* y *PNS (Picking Neighborhood Search)*, generaron las mejores soluciones para el acomodo y la preparación de pedidos. De otra parte, los metaheurísticos híbridos RABTIN (Ruteo acomodo búsqueda tabú intensificación) y RUPBTDI (Ruteo preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación) 3-Opt Inserción produjeron las mejores soluciones para el ruteo de estas operaciones.

**Palabras clave:** Conformación de lotes, ruteo, acomodo, preparación de pedidos, metaheurísticos, Sistema de Administración de Almacenes y diseño de experimentos.

## Abstract

The aim of doctoral thesis is to model and valid the order batching and routing problem in the putaway and picking operation. In the picking operation was modelled a problem, took in account  $K$  Material Handling Equipment,  $n$  products,  $m$  storage locations and a condition of available inventory. This approach contributed to overcome the gaps detected in the scientific literature. On the other hand, a significant contribution to the knowledge was achieved in the putaway operation since the batching and routing problems had not been detected in the systematic literature review (SLR) results. This is raised because the slotting problem was only approach identified for the putaway operation in the scientific literature. Priority rules and metaheuristics based on intelligent local search were developed to solve the order batching component in each modelled problem. Meanwhile, hybrid tabu search metaheuristics with intensification and diversification strategies were implemented to sort out routing component in the putaway and picking problem. In addition, the priority rules and metaheuristics developed not only were integrated a *WMS (Warehouse Management System)* but these were modelled considering the specific characteristics and constrains of the putaway and picking operation. A DOE (*Design of Experiment*) named Split Plot not only was implemented to valid the modelled problems but also performed an exhaustive numeric analysis, enabled to identify the combination of significant factors levels that generated the shortest average times and the higher efficiency in the putaway and picking operation. Split plot design could be considered a methodological contribution to the state of the art since this approach was not identified in the scientific literature for solving is kind of problems. Based on results of experiments it was detected that *INS (Intelligent Neighborhood Search)* and *PNS (Picking Neighborhood Search)* metaheuristics generated the best solutions for solving the order batching component in the putaway and picking operation. Meanwhile, the hybrid metaheuristics called RABTIN (Putaway routing using intensification strategy with tabu serach) and RUPBTDI (Picking routing using diversification strategy with tabu search) 3-Opt produced the best solution for sorting out the routing component of these operations.

### Keywords:

Order batching, routing, picking, putaway, metaheuristics, Warehouse Management System, and Design of Experiment.

# Contenido

	Pág.
Resumen .....	V
Lista de figuras .....	X
Lista de tablas .....	XIII
Introducción .....	1
<b>1. Revisión Sistemática de la Literatura (SLR – Systematic Literature Review) .....</b>	<b>3</b>
1.1 Resultados de la metodología (SLR) .....	5
1.1.1 Problemas de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos y el acomodo .....	6
1.1.2 Resultados SLR: Problema HVRP en la conformación lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos .....	14
1.1.3 Resultados SLR: Modelos de DOE en la conformación de lotes con ruteo .....	18
1.2 Oportunidades de investigación .....	19
1.3 Posibles Aportes .....	22
1.4 Objetivos de la tesis .....	23
1.4.1 Objetivo general .....	23
1.4.2 Objetivos específicos .....	23
<b>2. Estructura general de los problemas de conformación de lotes con ruteo .....</b>	<b>25</b>
2.1 Estructura y componentes de los problemas de conformación de lotes con ruteo .....	26
2.2 Simultaneidad en la conformación de lotes con ruteo .....	28
2.3 Diferencias en las restricciones de los problemas para la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación pedidos respecto al HVRP clásico .....	30
<b>3. Problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo considerando K EMMateriales heterogéneos: Formulación y métodos de solución .....</b>	<b>32</b>
3.1 Estructura del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo, en el acomodo .....	33
3.2 Formulación de la función objetivo y restricciones del problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo .....	35
3.3 Regla de prioridad y metaheurísticos integrados a WMS para solucionar problema en estudio .....	37
3.3.1 Regla FCFS para la generación de lotes de acomodo .....	39
3.4 Metaheurístico INS para la formación de lotes .....	41

3.5	Variantes de metaheurístico de búsqueda tabú para el ruteo integrado a la conformación de lotes en el acomodo.....	46
3.5.1	Metaheurístico de búsqueda tabú clásico para el ruteo en el acomodo (RABTCLA).....	46
3.5.2	Híbridos de metaheurístico de búsqueda tabú 2-Opt intercambio e inserción, en el ruteo del acomodo.....	49
3.5.3	Híbrido metaheurístico de búsqueda tabú RABTIN para resolver el problema de ruteo.....	53
3.5.4	Híbridos de metaheurístico de búsqueda tabú 3-OPT intercambio e inserción, en el ruteo del acomodo.....	58
<b>4.</b>	<b>Validación experimental del problema de conformación de lotes con ruteo para el acomodo.....</b>	<b>62</b>
4.1	Preguntas de experimentación (PE).....	63
4.2	Unidad experimental para la conformación de lotes con ruteo para el.....	64
4.3	Factores y niveles en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.....	67
4.4	Variables de respuesta en la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo de acomodo.....	69
4.5	Selección y modelamiento algebraico de <i>DOE</i> , incluyendo el diseño del plan experimental, que permite ejecutar la validación en el problema en estudio. .	69
4.6	Respuestas de las PE basado en el análisis del <i>DOE</i> .....	73
4.6.1	Soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.....	74
4.7	Principales hallazgos y conclusiones de las PE.....	90
<b>5.</b>	<b>Problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos con <i>K</i> equipos heterogéneos e inventario disponible.....</b>	<b>94</b>
5.1	Estructura del problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.....	95
5.2	Formulación matemática del problema de conformación de lotes con ruteo de preparación de pedidos.....	98
5.3	Representación problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.....	100
5.4	Modelamiento de regla y metaheurísticos integrados a un <i>WMS</i> en el <i>PCLRP</i> .....	102
5.4.1	Reglas de prioridad para conformación de <i>LP'</i> con ruteo.....	103
5.4.2	Metaheurístico para la conformación de lotes de preparación de pedidos <i>LP'</i> con ruteo, considerando <i>K</i> EMMateriales heterogéneos y el inventario disponible.....	105
5.4.3	Metaheurísticos de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo de mínimo tiempo integrado a la conformación de lotes $LP' \in CSLPr$ .....	111
<b>6.</b>	<b>Validación experimental del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.....</b>	<b>130</b>
6.1	Preguntas de experimentación en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.....	131
6.2	Unidad experimental para la conformación de lotes con ruteo de la preparación de pedidos de mínimo tiempo.....	133
6.3	Factores y niveles en la conformación de lotes con ruteo para la preparación de pedidos.....	134



6.4	Variables respuesta en la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo de preparación de pedidos.....	137
6.5	Selección y descripción de modelos de <i>DOE</i> que soportan las respuestas a las PE.....	137
6.5.1	Modelos de <i>DOE</i> seleccionados para responder las PE1, PE2, PE4 y PE5.....	138
6.5.2	Modelos de <i>DOE</i> seleccionados para responder la PE3.....	140
6.6	Respuestas de las PE basado en el análisis del <i>DOE</i> .....	142
6.6.1	Representación de las soluciones de las combinaciones de niveles de los factores para el problema en estudio.....	143
6.6.2	Respuestas a las cinco PE planteadas.....	147
6.7	Principales hallazgos y conclusiones de las PE.....	162
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>166</b>
7.1	Conclusiones.....	166
7.1.1	Conclusiones generales.....	166
7.1.2	Conclusiones enfocadas en la preparación de pedidos:.....	168
7.1.3	Conclusiones enfocadas en el acomodo:.....	171
7.2	Futuras líneas de investigación.....	172
<b>Anexos</b>		
<b>A.</b>	<b>Características computacionales de los metaheurísticos y reglas integrados a un <i>WMS</i> en el acomodo y la preparación de pedidos.....</b>	<b>174</b>
<b>B.</b>	<b>Preguntas de experimentación (PE) y pruebas de hipótesis en el acomodo ..</b>	<b>181</b>
<b>C.</b>	<b>Preguntas de experimentación (PE) e hipótesis en la preparación de pedidos</b>	<b>183</b>
<b>D.</b>	<b>Plan de experimentación en el acomodo .....</b>	<b>186</b>
<b>E.</b>	<b>Plan de experimentación en la preparación de pedidos .....</b>	<b>193</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>207</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1-1: Estructura de metodología <i>SLR</i> .	4
Figura 1-2: Componentes evaluados en el enfoque uno.	6
Figura 1-3: <i>DOE</i> en la conformación de lotes con ruteo.	18
Figura 2-1: Estructura y componentes de problemas de conformación de lotes con ruteo.	26
Figura 2-2: Relación de la conformación de lotes con ruteo	28
Figura 2-3: Restricción entre $n$ productos $i$ , $m$ posiciones $j$ y $K$ EMMateriales heterogéneos.	30
Figura 3-1: Estructura del problema conformación de lotes con ruteo, considerando $K$ equipos heterogéneos.	34
Figura 3-2: Reglas y metaheurísticos en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo.	38
Figura 3-3: Regla de prioridad <i>FCFS</i> para la conformación de lotes.	40
Figura 3-4: Movimientos de productos $i$ entre y dentro $LA'$ para generar un $CSLA_{L_{nuevo}}$	44
Figura 3-5: Movimiento de intercambio RABTCLA	47
Figura 3-6: Movimiento de inserción RABTCLA	47
Figura 3-7: Grupo de funciones objetivo para los movimientos de intercambio e inserción en el RABTCLA	48
Figura 3-8: Representación de movimientos RABTDI 2-Opt Intercambio	50
Figura 3-9: Representación de movimientos RABTDI 2-Opt Inserción.	51
Figura 3-10: Grupos de funciones objetivo para RABTDI 2-Opt Intercambio e RABTDI 2-Opt Inserción.	52
Figura 3-11: Grupo de funciones objetivos para RABTIN.	57
Figura 3-12: Representación de movimientos RABTDI 3-Opt Inserción.	59
Figura 3-13: Representación de movimientos RABTDI 3-Opt Intercambio.	59
Figura 3-14: Grupos de funciones objetivo para RABTDI 3-Opt Inserción y RABTDI 3-Opt Intercambio.	60
Figura 4-1: Etapas validación experimental con <i>DOE</i> , en el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.	62
Figura 4-2: <i>Layout</i> del CEDI multipasillo paralelo	65
Figura 4-3: Cantidad de veces que la regla o metaheurístico <i>NS</i> produjeron la mejor solución para la conformación de lotes.	77
Figura 4-4: Cantidad de veces que un metaheurístico de búsqueda tabú genera la ruta de menor tiempo promedio total.	77

Figura 4-5: Tiempo promedio total de acomodo, que produce el efecto de la interacción entre los factores ECL (F1) y TLAcomodo (F3)..... 80

Figura 4-6: Tiempo promedio total que produce el efecto de la interacción entre los factores ECL (F1) y Grupo de K EMMateriales heterogéneos (F5) ..... 81

Figura 4-7: Niveles del efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER)..... 83

Figura 4-8: Tiempos totales promedio efecto principal estrategia de ruteo (ER) (F2) ... 86

Figura 4-9: Gráficos de tiempos totales promedio efecto interacción estrategia de ruteo (ER)(F2) con los otros factores modelados. .... 86

Figura 4-10: Gráfico de medias de la interacción grupo de K EMMateriales heterogéneos (F5) y estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1)..... 88

Figura 4-11: Efecto grupo *K* EMMateriales heterogéneos (F5) con TLAcomodo (F3) .... 89

Figura 5-1: Estructura de problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. .... 96

Figura 5-2: Representación de la conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos..... 101

Figura 5-3: Regla y metaheurísticos para la conformación de lotes  $LP' \in CSLPr$  ..... 103

Figura 5-4: Regla *PEPR* para conformar  $LP' \in CSLPr$  ..... 104

Figura 5-5: Estructura que relaciona la conformación de lotes con ruteo en el PCLR.107

Figura 5-6: Vecindarios principal y secundario en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos. .... 108

Figura 5-7: Intercambio de movimientos de productos *i* entre y dentro  $LP'$  para generar  $CSLPr_{nuevo}$ ..... 109

Figura 5-8: Rutas de preparación de pedidos en un CEDI en forma de bloque con múltiples pasillos paralelos. .... 111

Figura 5-9: Movimiento de inserción RABTCLA ..... 114

Figura 5-10: Movimiento de intercambio RABTCLA..... 114

Figura 5-11: Grupo de funciones objetivo RUPBTCLA ..... 115

Figura 5-12: Representación de movimientos RUPBTDI 2-Opt Intercambio ..... 117

Figura 5-13: Representación de movimientos RUPBTDI 2-Opt Intercambio ..... 117

Figura 5-14: Grupos de funciones objetivo *RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt* Intercambio ..... 118

Figura 5-15: Representación de movimientos de inserción RUPBTDI 2-Opt Inserción120

Figura 5-16: Representación de movimientos de inserción RUPBTDI 3-Opt Inserción121

Figura 5-17: Grupos de funciones objetivo para RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción .... 121

Figura 5-18: Grupos de funciones objetivo RUPBTIN..... 127

Figura 6-1: Etapas de validación experimental con DOE ..... 130

Figura 6-2: Cantidad de veces que la regla de prioridad o el metaheurístico *PNS* produce la mejor solución..... 147

Figura 6-3: Cantidad de veces que un metaheurístico de ruteo genera la mejor solución..... 147

Figura 6-4: Tiempo promedio total de la interacción ECL (F1)\*TLPpedidos (F3). ..... 150

Figura 6-5: Tiempo promedio total del efecto ECL (F1)\*EMMateriales (F3)..... 150

Figura 6-6: Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción ECL (F1)\*PIinventario (F6)..... 151

Figura 6-7: Tiempo promedio total generado por el efecto principal ER (F2)..... 153

---

Figura 6-8: Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción entre ER (F1) con el grupo EMMateriales (F5) .....	155
Figura 6-9: Tiempo promedio de la interacción entre K EMMateriales (F5) y la ECL (F1) .....	158
Figura 6-10: Tiempo promedio total generado por la interacción entre el grupo de <i>K</i> EMMateriales heterogéneos (F5) y (TLPpedidos) (F3).....	158
Figura 6-11: Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción entre la Pinventario (F6) con la ECL (F1) .....	160
Figura 6-12: Tiempo promedio efecto entre Pinventario (F6) con el EMMateriales (F5)	160

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Síntesis del <i>SLR</i> en la conformación de lotes con ruteo.....	7
Tabla 1-2: Resultados del <i>SLR</i> para los componentes de la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos .....	10
Tabla 1-3: Reglas, heurísticos y metaheurísticos para resolver el problema en estudio.....	13
Tabla 1-4: Componentes para comparar problema <i>HVRP</i> clásico respecto a la conformación de lotes con ruteo. ....	15
Tabla 1-5: Síntesis del análisis comparativo del problema <i>HVRP</i> respecto a la conformación de lotes con ruteo. ....	16
Tabla 2-1: Conjunto de lotes con ruteo de mínimo tiempo. ....	29
Tabla 3-1: Regla <i>FCFS</i> para la conformación de $LA^l \in CSLA_L$ .....	40
Tabla 3-2: Clasificación de <i>EMMateriales K</i> , productos <i>i</i> y posiciones de almacenamiento <i>j</i> .....	42
Tabla 3-3: Estructura de $LA^l \in CSLA_{L_{inicial}}$ .....	42
Tabla 3-4: Estructura conformación de lotes con ruteo, en el acomodo .....	43
Tabla 3-5: Estructura de rutas de acomodo.....	53
Tabla 3-6: Estructura para registrar conteo <i>Cjt</i> en las rutas de acomodo.....	54
Tabla 3-7: Matriz de frecuencias <i>fjt</i> para las <i>n<sub>r</sub></i> rutas de acomodo $s^l_{nr} \in CRS_w$ .....	55
Tabla 4-1: Preguntas de experimentación en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.....	63
Tabla 4-2: Características equipos modelados en la experimentación.....	69
Tabla 4-3: Estructura de parcela dividida, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.....	70
Tabla 4-4: Patrones de referencia para la experimentación.....	75
Tabla 4-5: Soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo .....	76
Tabla 4-6: <i>ANOVA DOE</i> parcelas divididas PE1, InfoStat®.....	79
Tabla 4-7: <i>ANOVA DOE</i> Parcelas divididas PE2, InfoStat® .....	83
Tabla 4-8: Mejores soluciones para las combinaciones o escenarios con el factor estrategia de ruteo (ER) .....	84
Tabla 4-9: <i>ANOVA DOE</i> parcelas divididas PE3, InfoStat® .....	85
Tabla 4-10: <i>ANOVA</i> parcelas divididas, énfasis en el factor grupo <i>KEMMateriales</i> heterogéneos. ....	87
Tabla 4-11: Mejores Combinaciones de niveles de los factores obtenidas del análisis estadístico en PE.....	92

Tabla 5-1:	Relaciones de información y recursos, en el problema en modelamiento	102
Tabla 5-2:	Clasificación de $k \in K$ EMMateriales en el PCLRP. ....	106
Tabla 5-3:	Estructura de $LP \in CSLPr_{inicial}$ .....	107
Tabla 5-4:	Estructura de rutas $q'_{w n_i}$ representada en columnas (Ct) .....	124
Tabla 5-5:	Conteo de pos $j$ en columnas $y \in Y$ en las $n_i$ rutas $q'_{w n_i} \in CRQW$ .....	124
Tabla 5-6:	Matriz de frecuencias para posiciones de almacenamiento $j$ en $Ct(f_{jt})$ .....	125
Tabla 6-1:	Preguntas de experimentación (PE), con sus hipótesis nulas y alternas.	132
Tabla 6-2:	Características EMMateriales modelados en la experimentación. ....	136
Tabla 6-3:	Estructura de parcela dividida problema conformación de lotes. ....	138
Tabla 6-4:	Patrones de referencia para la experimentación.....	144
Tabla 6-5:	Tiempo promedio total y eficiencia de las soluciones del problema. ....	145
Tabla 6-6:	ANOVA DOE parcelas divididas para PE1 .....	148
Tabla 6-7:	ANOVA del diseño de parcelas divididas, con efecto principal e interacciones dobles del factor estrategia de ruteo (ER)(F2) .....	152
Tabla 6-8:	Mejores soluciones para el factor estrategia de ruteo (ER).....	154
Tabla 6-9:	ANOVA diseño parcelas divididas PE3.....	155
Tabla 6-10:	ANOVA parcelas divididas factor 5 EMMateriales en la PE4, InfoStat®...	157
Tabla 6-11:	ANOVA diseño parcelas divididas (Pinventarios) (F6) en la PE5, InfoStat®.....	159
Tabla 6-13:	Mejores Combinaciones de niveles de los factores obtenidas del análisis estadístico en PE.....	164

# Introducción

En el ámbito del Centro de Distribución (CEDI), el acomodo y la preparación de pedidos suelen ser las operaciones más relevantes de este proceso logístico respecto a los costos y la eficiencia en la manipulación de los productos. La preparación de pedidos representa entre un 50 y 65% de los costos del CEDI, y tiene un impacto en la satisfacción del cliente de la cadena de suministro. Por su parte, el acomodo representa aproximadamente un 15% de los costos del CEDI y afecta la eficiencia de la gestión del almacenamiento y la preparación de pedidos, de allí la importancia de su adecuado modelamiento (Frazelle y Rojo, 2006; Bartholdi y Hackman, 2011).

Según Henn (2012), las siguientes tres decisiones del nivel táctico-operativo son relevantes en un CEDI: i) asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*), ii) conformación de lotes en la preparación de pedidos y iii) diseño de rutas en la preparación de pedidos. En la presente tesis doctoral, se abordan las decisiones ii y iii. Por su parte la decisión i esta relacionada con la asignación de posiciones de almacenamiento, que no se considera en el alcance de la tesis.

De los resultados de la metodología del *SLR (Scientific Literature Review)*, no se detectaron artículos que modelaran en el problema de la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, considerando  $K$  equipos de manejo de materiales (EMMateriales) heterogéneos,  $n$  productos,  $m$  posiciones de almacenamiento y la condición de disponibilidad del inventario. Adicionalmente, se identificó que el problema de ruteo de la preparación de pedidos, fue principalmente solucionado con heurísticos como el *S-Shape*, *Largest Gap* y *Combinated*, los cuales generan un patrón de secuencia para la recogida. Debe resaltarse, que los heurísticos listados producen una única solución, ya que no ejecutan búsquedas sistemáticas en vecindarios como los metaheurísticos. Por este motivo, los heurísticos suelen producir soluciones de menor calidad, lo cual puede impactar negativamente en la eficiencia de esta operación del CEDI.

Con relación al acomodo, en el *SLR* no se identificaron artículos que representaban y resolvían el problema de conformación de lotes con ruteo, sino que se enfocaban únicamente en la asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*). De allí, la importancia de solucionar este vacío, lo cual no sólo permitiría contribuir al avance de esta línea de investigación en estado del arte, sino también mejorar las capacidades para gestionar y mejorar esta operación en el ámbito empresarial.

Por los motivos expuestos, la presente tesis doctoral tiene como objetivo modelar problemas para la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos, considerando *KEM* Materiales heterogéneos y sus restricciones asociadas. Para solucionar estos problemas, se desarrollan metaheurísticos integrados a un *WMS*, con el fin de obtener soluciones del menor tiempo total posible y adecuada eficiencia operacional. De esta manera, se busca aportar al estado del arte en el CEDI y resolver los vacíos detectados de los resultados de la metodología *SLR*.

Finalmente, la presente tesis doctoral se encuentra estructurada en los siguientes siete capítulos. En el capítulo 1, se presenta la síntesis de los resultados del *SLR*, se establecen las oportunidades de investigación, los posibles aportes al conocimiento y los objetivos de la tesis doctoral. En el capítulo 2, se desarrolla la estructura de los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos, incluyendo la justificación del enfoque de su solución de manera integrada y simultánea. En los capítulos 3 y 4, se modela el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo, y se desarrolla su validación experimental utilizando diseño de experimentos (*DOE\_Design of Experiments*). En los capítulos 5 y 6, se desarrolla el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, el cual también se valida con *DOE*. Finalmente, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones y las líneas de investigación de la tesis doctoral.



# 1. Revisión Sistemática de la Literatura (SLR – *Systematic Literature Review*)

El Centro de Distribución (CEDI) es un tipo de almacén de producto terminado, que permite amortiguar la oferta y la demanda en la cadena de suministro, a través de la administración del inventario de producto terminado, la planeación, ejecución y control de operaciones como: recepción, acomodo, almacenamiento, preparación de pedidos y despacho (Frazelle y Sojo, 2006; Min, 2009; Bartholdi y Hackman, 2011). Dentro del CEDI, se hace necesario la implementación de modelos o técnicas cuantitativas, que apoyen decisiones de diseño, mejoramiento y gestión que le permitan un funcionamiento eficiente y orientado a la satisfacción de los clientes en la cadena de suministro (Bartholdi y Hackman, 2011), (Henn, 2012). El CEDI en la última década ha cobrado importancia en el ámbito de la cadena de suministro, ya que no sólo impacta en la atención de las necesidades de los clientes, sino que representa aproximadamente el 20% de los costos totales de la cadena logística (Baker y Halim, 2007; Min, 2009).

La conformación de lotes con ruteo en el CEDI es una actividad que permite agrupar órdenes de productos, asignar recursos y diseñar rutas con secuencias de posiciones de almacenamiento del menor tiempo posible en el acomodo o preparación de pedidos. Por lo tanto, la conformación de lotes con ruteo impacta en la eficiencia, la productividad y la satisfacción de las necesidades de los clientes internos y externos del CEDI en la cadena de suministro (Henn, 2012; Henn y Wäscher, 2012). La conformación de lotes con ruteo ha cobrado relevancia en el ámbito científico, no sólo por su aporte a la eficiencia y eficacia del CEDI, sino también por la complejidad del modelamiento matemático y computacional, de allí, la importancia de estudiar sus antecedentes y estado del arte (Albareda, Alonso, Molina y De Blas, 2009) (Henn y Wäscher, 2012; Kulak *et al*, 2012; Henn, 2013).

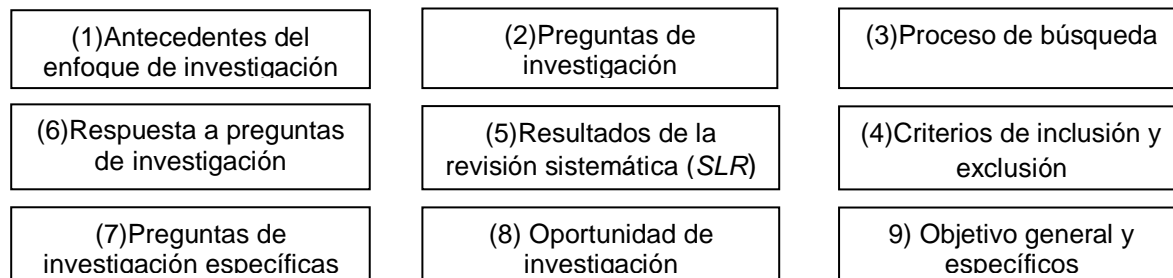
Debido a la importancia de los modelos y técnicas cuantitativas en el CEDI, este capítulo tiene como objetivo analizar los antecedentes y el estado de arte del modelamiento de metaheurísticos y modelos estadísticos como el *DOE(Design of Experiment)* que apoyan

decisiones de gestión, diseño y mejoramiento de sus operaciones. En el análisis, se realiza énfasis en modelos que permitan conformar lotes con ruteo en el acomodo y preparación de pedidos como un problema *HVRP (Heterogeneous Vehicle Routing Problem)* o enfoques similares, que consideren  $K$  EMMateriales y se resuelvan con metaheurísticos. La justificación de enfatizar en este componente del CEDI, se basa en los resultados de una revisión exploratoria de la literatura, en la cual, se evidenciaron oportunidades de investigación relacionadas con desarrollo de metaheurísticos que permitan resolver el problema conformar lotes con ruteo.

El análisis de los antecedentes y el estado del arte, se realiza con una adaptación a la metodología de la revisión sistemática de la literatura (*SLR – Systematic Literature Review*) desarrollada por Kitchenham (2004). La metodología *SLR* adaptada, se diferencia a la original, ya que incluye una etapa de preguntas específicas, que permite detallar el análisis y facilitar la identificación de oportunidades de investigación

A continuación, se presentan las 9 etapas de la metodología *SLR* adaptada (Figura 1-1).

**Figura 1-1:** Estructura de metodología *SLR*.



La metodología *SLR* adaptada (Figura 1-1), parte del establecimiento de los antecedentes y las preguntas generales de investigación, que se relacionan con el desarrollo de metaheurísticos, diseño de experimentos, control estadístico y conformación de lotes con ruteo. Posteriormente, se procede a la estructuración del proceso de búsqueda, en el cual, se definen las palabras claves y ecuaciones de búsqueda en las bases de datos de artículos científicos. Otro aspecto importante de la metodología, consiste en establecer los criterios de inclusión o exclusión, que permiten seleccionar los artículos que se incluyen en el análisis del estado del arte. Después de recolectar la información, se procede a responder las preguntas de investigación generales. En caso que sea necesario, se plantean y responden preguntas específicas de investigación, con el fin de profundizar el análisis del estado del arte o aclarar

hallazgos en las áreas problemáticas de investigación identificadas. A partir de las respuestas a las preguntas de investigación, se identifican las oportunidades de investigación, se formulan los posibles aportes al conocimiento, y se plantean los objetivos de la tesis de doctorado, los cuales, deben permitir la generación de conocimiento en la agenda científica del tema.

Debido al alcance del presente documento, las siguientes etapas se desarrollan de manera detallada en este capítulo:

- Los resultados de la metodología *SLR* (Etapa 5).
- Oportunidades de investigación detectadas (Etapa 7).
- Objetivo general y objetivos específicos (Etapa 9).

Las otras seis etapas de la metodología *SLR*, se presentan de manera detallada en el proyecto de tesis doctoral denominado: Metaheurísticos para la conformación de lotes con ruteo considerando  $K$  equipos de manejo de materiales (EMMateriales) heterogéneos en el acomodo y preparación de pedidos.

## 1.1 Resultados de la metodología (*SLR*)

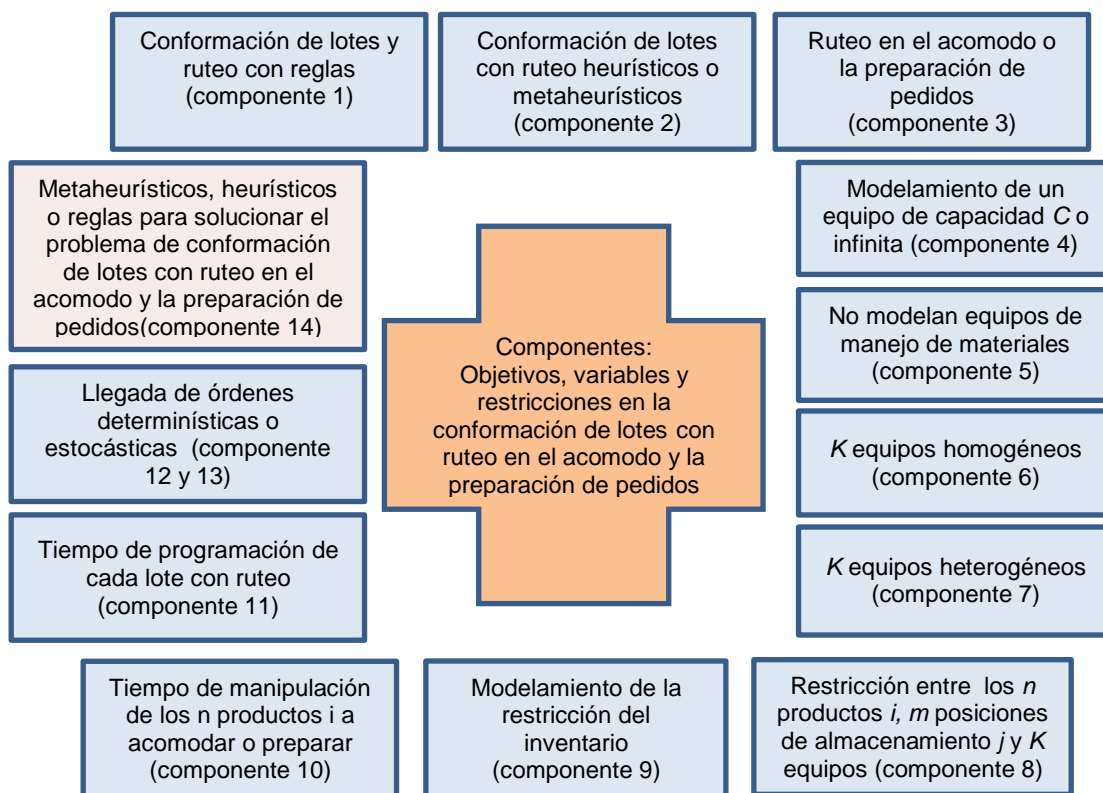
En este subnumeral, se presentan los resultados de la metodología (*SLR*), que se obtuvieron del análisis y evaluación de los artículos detectados en la literatura. En el estado del arte, se estudiaron tres enfoques: i) problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos; ii) diferencias entre el *Heterogeneous Vehicle Routing Problem (HVRP)* y la conformación de lotes con ruteo; y iii) diseño de experimentos en el problema en estudio.

Para facilitar la presentación de resultados de la metodología *SLR*, inicialmente, se sintetizan los principales hallazgos obtenidos de los tres enfoques descritos. Posteriormente, se identifican las oportunidades de investigación y se formulan los objetivos que soportan el desarrollo de la tesis doctoral.

### 1.1.1 Problemas de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos y el acomodo

En este apartado, se sintetizan los resultados de la metodología *SLR* para enfoque 1, relacionado con el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos y el acomodo. Para detectar los hallazgos, se realizó una evaluación de 14 componentes del problema, que consideraban variables, recursos y métodos cuantitativos implementados para su solución (Figura 1-2).

**Figura 1-2:** Componentes evaluados en el enfoque uno.



Nota: Debido a la importancia del componente 14 en los resultados del *SLR* este se estudiará de manera independiente.

A continuación, se representa una estructura (Tabla 1-1), que permite establecer que componentes fueron modelados por los autores analizados en el *SLR*. De esta manera, se facilita la detección de los hallazgos en los problemas en análisis. Adicionalmente, en la Tabla 1-1,  $C_i$  representa el número del componente descrito en la Figura 1-2, la letra A significa acomodo y la P preparación de pedidos.

**Tabla 1-1:** Síntesis del SLR en la conformación de lotes con ruteo

Autores	C1		C2		C3		C4		C5		C6	
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
Daniels <i>et al.</i> ,(1998)						X				X		
De Koster y Poort (1998)						X				X		
De Koster <i>et al.</i> ,(1999)		X						X				
Petersen y Schmenner(1999)						X				X		
Roodbergen y De Koster(2001)						X				X		
Dekker <i>et al.</i> ,(2004)										X		
Petersen y Aase(2004)		X								X		
Geng y Lim (2005)						X						X
Manzini <i>et al.</i> ,(2005)		X								X		
Roodbergen y Vis(2006)						X				X		
Koster <i>et al.</i> ,(2007)		X										
Rubrico <i>et al.</i> ,(2008)		X										X
Tsai <i>et al.</i> , (2008)				X				X				
Ho <i>et al.</i> ,(2008)				X				X				
Renaud y Ruiz(2008)						X				X		
Albareda <i>et al.</i> ,(2009)		X										X
Bessenouci <i>et al.</i> ,(2010)						X		X				
Henn <i>et al.</i> ,(2010a)		X						X				
Theys <i>et al.</i> , (2010)						X				X		
Xing (2010)						X		X				
Dharmapriya y Kulatunga (2011)						X		X				
Rubrico <i>et al.</i> ,(2011)		X										X
Henn(2012)		X						X				
Henn(2012b)		X										X
Henn y Wäscher(2012)		X						X				
Hong, Johnson y Peters(2012)		X						X				
Kulak <i>et al.</i> ,(2012)				X				X				
Azadnia <i>et al.</i> ,(2013)				X				X				
Henn y Schmid(2013)		X						X				
Öncan(2013)				X								X
Chen <i>et al.</i> ,(2014)						X						X
Matusiak <i>et al.</i> ,(2014)				X				X				

**Tabla 1-1:** (Continuación)

Autores	C7		C8		C9		C10		C11		C12		C13	
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
Daniels <i>et al.</i> ,(1998)										X				
De Koster y Poort (1998)														
De Koster <i>et al.</i> ,(1999)													X	
Petersen y Schmenner (1999)													X	
Roodbergen y De Koster(2001)													X	
Dekker <i>et al.</i> ,(2004)													X	
Petersen y Aase(2004)													X	
Geng y Lim (2005)														
Manzini <i>et al.</i> ,(2005)													X	
Roodbergen y Vis(2006)													X	
Koster <i>et al.</i> ,(2007)														
Ho <i>et al.</i> ,(2008)													X	
Renaud y Ruiz(2008)														
Rubrico <i>et al.</i> ,(2008)							X	X					X	
Tsai <i>et al.</i> ,(2008)													X	
Albareda <i>et al.</i> ,(2009)													X	
Bessenouci <i>et al.</i> , (2010)							X							
Henn <i>et al.</i> ,(2010a)													X	
Theys <i>et al.</i> , (2010)													X	
Xing <i>et al.</i> , (2010)							X							
Dharmapriya y Kulatunga (2011)														
Rubrico <i>et al.</i> , (2011)														X
Henn(2012)							X	X						X
Henn(2012b)													X	
Henn y Wäscher(2012)													X	
Hong <i>et al.</i> ,(2012)													X	
Kulak <i>et al.</i> ,(2012)													X	
Azadnia <i>et al.</i> ,(2013)													X	
Henn y Schmid(2013)													X	
Öncan(2013)													X	
Chen <i>et al.</i> ,(2014)							X							X
Matusiak <i>et al.</i> ,(2014)													X	

De los resultados de la metodología *SLR* (Tabla 1-1), no se identificaron artículos que modelarán  $K$  equipos de manejo de materiales (EMMateriales) heterogéneos y la condición del inventario, en el problema de conformación de lotes con ruteo en la

preparación de pedidos. Respecto al acomodo, no se detectaron artículos que modelarán la conformación de lotes con ruteo, sino que tenían como objetivo resolver el problema de asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*). Para solucionar este problema, los autores implementaron metaheurísticos (Muppanimuppant y Adil, 2008; Kim y Smith, 2012) y métodos de optimización (Takahama *et al.*, 2002; Heragu *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2010; Kutzelnigg, 2011).

Debe tenerse en cuenta que el *slotting*, se orienta principalmente en la asignación de las posiciones de almacenamiento, dónde se ubican los  $n$  productos  $i$  basándose en criterios como: clasificación ABC y relación con la preparación de pedidos (Frazelle y Rojo, 2006), (Muppanimuppant y Adil, 2008), (Bartholdi y Hackman, 2011), (Kim y Smith, 2012). Por su parte, la conformación de lotes con ruteo, permite configurar secuencias de mínimo tiempo o distancia, con el fin de acomodar los  $n$  productos  $i$  en las  $m$  posiciones  $j$  asignadas en el *slotting*, empleando  $K$  equipos heterogéneos (Albareda *et al.*, 2009), (Bartholdi y Hackman, 2011), (Henn, 2012). Por los motivos expuestos, cobra importancia estudiar el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, incluyendo su relación con el *slotting*, debido a su aporte potencial al avance de esta línea de investigación y el adecuado modelamiento de esta operación.

A continuación, se sintetizan los principales resultados obtenidos del análisis de los 13 componentes relacionados con la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos (Tabla 1-2).

De los resultados de la metodología *SLR* (Tabla 1-2), no se detectaron artículos del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, que modelaban  $n$  productos  $i \in OC$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ ,  $K$  EMMateriales heterogéneos y la condición de la disponibilidad del inventario. Adicionalmente, ninguno de los artículos revisados, representaron tiempos de manipulación, búsqueda y extracción variables que dependían de las características de los productos  $i$  a recoger y los EMMateriales asignados.

**Tabla 1-2:** Resultados del SLR para los componentes de la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos

	Acomodo	Preparación de pedidos
Conformación de lotes y ruteo con Reglas (componente 1).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un 39.9% de los artículos revisados, utilizaron reglas o heurísticas como: <i>S-Shape</i>, <i>Largest Gap</i> y <i>Combinated</i>, entre otras que permitían diseñar patrones o esquemas de rutas integradas a la conformación de lotes, en la preparación de pedidos. Una limitación de este enfoque, es que no se ejecutan búsquedas sistemáticas en vecindarios, sino que se modela una combinación factible.</li> <li>No se detectaron artículos en el acomodo (vacío).</li> </ul>	
Conformación de lotes y ruteo con heurísticos o metaheurísticos (componente 2).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un 21.2% de los artículos, implementaron métodos basados en búsqueda en vecindarios como los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, el enfriamiento simulado, para resolver los componentes del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.</li> <li>Cinco artículos presentan la limitación de modelar un único equipo de manejo de materiales, y otros dos representan K equipos homogéneos. Estas limitaciones afectan potencialmente, el adecuado modelamiento del problema.</li> <li>No se detectaron artículos en el acomodo (vacío).</li> </ul>	
Ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos (componente 3).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un 39.9% de los artículos, modelaron reglas, heurísticos y metaheurísticos para resolver un problema <i>TSP (Travelling Salesman Problem)</i> en el ruteo de la preparación de pedidos. En este enfoque, no modelaron la conformación de lotes.</li> <li>No se detectaron artículos en el acomodo (vacío).</li> </ul>	
No modelamiento de equipos en la conformación de lotes con ruteo(componente 4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>30,3% de los artículos, no modelaron EMMateriales en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. No modelar este recurso, reduce la complejidad de modelamiento y puede conllevar a una representación y análisis inadecuado de esta operación del CEDI.</li> </ul>	
Modelamiento de un equipo de capacidad finita <i>c</i> o infinita (componente 5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>45,5% de los artículos, modelaron un equipo de capacidad finita <i>C</i>, en los problemas de conformación de lotes con ruteo o configuración de rutas, en la preparación de pedidos. El modelamiento de un equipo, disminuye la complejidad de modelamiento de la operación, pero también reduce su capacidad de representar apropiadamente esta operación, y desarrollar análisis válidos.</li> <li>En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	
Modelamiento <i>K</i> equipos homogéneos (componente 6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>21,2% de los artículos modelaron <i>K</i> equipos homogéneos, en problemas de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. Con este enfoque, se limita potencialmente la capacidad de modelamiento del problema, ya que en los CEDI; se suelen emplear <i>K</i> equipos heterogéneos, que puede manipular diferentes tipos de productos (peso, volumen y naturaleza) y acceder a posiciones de almacenamiento ubicada a diferentes niveles de altura. De allí, la importancia de modelar <i>K</i> equipos heterogéneos, en el problema en estudio.</li> <li>En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío en el conocimiento).</li> </ul>	
Modelamiento de <i>K</i> EMMateriales heterogéneos (componente7)	<p>No se detectaron artículos, que modelaran <i>K</i> equipos heterogéneos en el acomodo, ni la preparación de pedidos, lo cual, permite detectar un vacío en el estado del arte.</p>	



**Tabla 1-2:** (Continuación)

<p>Restricción entre los <math>n</math> productos <math>i</math>, <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math> y <math>K</math> equipos (componente 8)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De los 33 artículos revisados, ninguno modeló la restricción entre los <math>n</math> productos <math>i</math>, las <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math> y los <math>K</math> equipos heterogéneos en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo o la preparación de pedidos.</li> <li>• El modelamiento de esta restricción, no sólo contribuye a la conformación de lotes con ruteo validos en el acomodo y la preparación de pedidos, sino que también determina la estructura de los vecindarios de búsqueda para los metaheurísticos, que se implementen para resolver el problema.</li> </ul>
<p>Tiempos de manipulación de los productos en los problemas de conformación de lotes con ruteo (componente 9)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un 15.1% de los artículos, modelaron el tiempo de manipulación de los <math>n</math> productos <math>i</math> en la función objetivo del problema.</li> <li>• En los artículos modelaron el tiempo de manipulación como una constante, que no dependía de las características de los <math>n</math> productos <math>i</math> recoger, las localizaciones de las <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math> a visitar y los equipos heterogéneos <math>k \in K</math> asignados a la conformación de lotes. Lo cual, representa una limitación, en el modelamiento.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente</li> </ul>
<p>Tiempos de programación en la conformación de lotes con ruteo (componente 10)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un 6% de los artículos, modelaron el tiempo de programación en la función objetivo, del problema de la conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos (Rubrico <i>et al.</i>, 2008), (Henn, 2012).</li> <li>• Una característica detectada en los artículos, se relacionaba con el modelamiento del tiempo de programación de los lotes con ruteo como un valor constante o fijo, que no dependía de las características y cantidad de los productos <math>i</math> pertenecientes a las órdenes de los clientes, las <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math> a visitar y los equipos <math>k \in K</math> asignados a la preparación de pedidos.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente.</li> </ul>
<p>Modelamiento del inventario, en la conformación de lotes con ruteo (componente 11)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Únicamente se detectó un artículo (3%), que modeló la restricción del inventario, en la configuración de rutas de preparación de pedidos.</li> <li>• Este hallazgo, permitió evidenciar, el nulo o bajo nivel de modelamiento de esta restricción en la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío en el conocimiento).</li> </ul>
<p>Llegadas de órdenes de los clientes de manera determinística (componente 12)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 90,9% de los artículos modelaron la llegada de órdenes de manera determinística. De esta manera, se disminuía la complejidad del modelamiento del problema, ya que se conocían con antelación las órdenes de los clientes, que se deben programar para la conformación de lotes con ruteo.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente.</li> </ul>
<p>Llegadas de órdenes en tiempo real o estocásticamente (componente 13)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Únicamente, un 9% de los artículos modelaron las llegadas de órdenes en tiempo real y estocásticamente, utilizando una distribución Exponencial o Poisson, que permitía generar arribos aleatoriamente, considerando un parámetro <math>\lambda(1/\lambda)</math>, que era determinado por la demanda de los clientes.</li> <li>• Ninguno de los artículos revisados sincronizaba la llegada de las órdenes con un <i>WMS</i> o <i>TIC</i>, que permitiera la gestión de la información de la preparación de pedidos.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente.</li> </ul>

Finalmente, del análisis del *SLR* tampoco se identificaron artículos que abordaban la conformación de lotes con ruteo en el acomodo. Este hallazgo permite detectar una oportunidad de investigación relevante en estado del arte, si se tiene en cuenta, que esta

operación representa aproximadamente el 15% de los costos del CEDI e impacta en la eficiencia de este proceso logístico.

- Metaheurísticos, heurísticos y reglas para solucionar el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo o la preparación de pedidos (Criterio 14).

En los resultados del *SLR*, el problema en estudio, se dividía en dos subproblemas denominados conformación de lotes y ruteo, los cuales, se resolvían implementando reglas, heurísticos o metaheurísticos. Aunque, el problema se fraccionaba, los autores modelaban la solución de los componentes de manera integrada, ya que a cada lote conformado, le diseñaban una ruta o secuencia de  $m$  posiciones de almacenamiento de mínimo tiempo o distancia posible. De otra parte, en algunos artículos, sólo se modeló el componente de ruteo de la preparación de pedidos, lo cual, redujo la complejidad de su modelamiento, ya que se simplificaba la estructura del vecindario de búsqueda y se disminuían la cantidad de restricciones a modelar.

En la Tabla 1-3, se presentan los hallazgos encontrados en el *SLR* relacionados con heurísticos, metaheurísticos y reglas, que permitían resolver el problema de conformación de lotes y la configuración de rutas, en la preparación de pedidos. De los resultados del componente 14, se identifica que los metaheurísticos de búsqueda tabú y algoritmos genéticos, suelen ser los más usados para resolver este subproblema, por la eficiencia y calidad de sus soluciones. En la literatura, también, se detectó que los heurísticos *Saving C&Wii*, búsqueda local y la regla *FCFS* suelen implementarse por su baja complejidad de modelamiento matemático y alta eficiencia computacional. Debe resaltarse, que estos heurísticos suelen producir soluciones de menor calidad que los metaheurísticos, debido a que ejecutan estrategias de búsqueda menos estructuradas y efectivas.

En el *SLR*, también, se identificaron artículos que modelaban metaheurísticos, heurísticos o reglas, que permitan solucionar el subproblema del ruteo integrado a la conformación de lotes o únicamente la configuración de rutas, en la preparación de pedidos. Debe indicarse, que heurísticos como el *S-shape*, *Largest Gap* y *Combinated* fueron los más utilizados para resolver este subproblema, ya que se detectaron 14 artículos, que los implementaron.

**Tabla 1-3:** Reglas, heurísticos y metaheurísticos para resolver el problema en estudio.

	<b>Conformación de lotes(componente 14.1)</b>	
	Acomodo	Preparación de pedidos
Metaheurísticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La búsqueda tabú (BT) y los algoritmos genéticos (AG), fueron los más implementados para conformar lotes de la preparación de pedidos, ya que se detectaron cinco artículos respectivamente.</li> <li>• Estos dos metaheurísticos fueron modelados por los autores, por su capacidad de realizar búsquedas exhaustivas en vecindarios y la flexibilidad en la configuración de sus parámetros, con el fin de generar y evaluar lotes factibles eficientemente.</li> <li>• En tres artículos, se detectó el uso de los metaheurísticos <i>ABHC (Attribute Based Hill Climber)</i> y <i>VNS (Variable Neighborhood Search)</i>. Por su parte, el <i>VNS</i> desarrolla estructuras de movimientos determinísticos y estocásticos en una secuencia de vecindarios, con el fin de conformar conjuntos de lotes eficientemente, basándose en heurísticos de búsqueda local (Albareda <i>et al.</i>, 2009; De Koster <i>et al.</i>, 1999; Matusiak <i>et al.</i>, 2014).</li> <li>• Otros metaheurísticos detectados en la literatura para este subproblema fueron: <i>simulated annealing (SA</i> o Enfriamiento Simulado) (dos artículos), colonia de hormigas (CH)(un artículo) y <i>Variable Neighborhood Descent (VND)</i>(un artículo).</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	
Heurísticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El algoritmo <i>saving C&amp;Wii</i> y la búsqueda local, son los más utilizados para resolver el problema de conformación de lotes, con ocho y cinco artículos detectados.</li> <li>• Se identifica la limitación, que no desarrollaron estrategias exhaustivas e inteligentes de exploración de vecindarios, como si se implementa en los metaheurísticos.</li> <li>• Los tiempos de procesamiento computacional en los heurísticos, pueden ser menores a los metaheurísticos, pero las soluciones de los lotes conformados suelen ser de menor calidad respecto al objetivo de la operación, debido a la estructura de vecindarios que desarrollan y la estrategia de búsqueda, que suelen implementar.</li> <li>• En la literatura, también, se detectaron otros heurísticos como: <i>C&amp;Wi</i>, <i>Nearest Neighbor</i>, <i>RPP</i> y <i>RBP</i>, los cuales, tienen características similares al <i>C&amp;Wii</i> y la búsqueda local, ya que realizan exploraciones simples de intercambio los vecindarios, con el fin de conformar lotes en la preparación de pedidos, con el menor tiempo o distancia posible.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	
Reglas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelen ser una estrategia de baja complejidad matemática y computacional, para conformar lotes de preparación de pedidos. Además, se resaltaba que sus resultados suelen tener baja calidad, lo cual, genera ineficiencias en la operación.</li> <li>• En siete artículos, se detectó la implementación de la regla <i>FCFS (First Coming First Served)</i> para la conformación de lotes, y medida de referencia, para establecer las diferencias o mejoras que se obtenían en los tiempos o distancias de la preparación de pedidos, cuando se implementaban heurísticos o metaheurísticos.</li> <li>• Otras reglas detectadas en la literatura fueron <i>Best Seed</i>, <i>Bin Pack</i>, <i>Equal</i>, entre otros.</li> <li>• En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	

**Tabla 1-3:** (Continuación)

Configuración de rutas(componente 14.2)		
	Acomodo	Preparación de pedidos
Metaheurísticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entre los metaheurísticos identificados para resolver el ruteo de la preparación de pedidos, se considera la búsqueda tabú (BT)( tres artículos), el enfriamiento simulado (SA)(2 artículos), la colonia de hormigas (CH) (2 artículos) y los algoritmos genéticos (AG) (2 artículos).</li> <li>Los diferentes metaheurísticos detectados, implementaban estrategias de búsqueda en vecindarios, desarrollaban estructura de movimientos simples de intercambio e inserción, cruzamientos y memorias de corto y largo plazo.</li> <li>En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	
Heurísticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>El <i>S-shape</i>, <i>Largest Gap</i>, <i>optimal</i> y <i>combined</i>, fueron los más implementados, ya que se detectaron 14,11, 6 y 4, artículos respectivamente.</li> <li>Una característica común en los heurísticos revisados, fue que permitían el diseño de patrones con secuencias de posiciones de almacenamiento a visitar, con el fin de recoger los productos asociados a los pedidos solicitados por los clientes, en el menor tiempo o distancia posible.</li> <li>Una limitante de los heurísticos descrito, era que no desarrollaban búsquedas en vecindarios, sino que generaban patrones o esquemas para configurar las rutas, lo cual, puede generar soluciones de baja calidad respecto al tiempo o distancia total recorrida en la operación.</li> <li>Otros heurísticos detectados fueron: <i>3-Opt</i>, <i>NN+Or-opt</i>, <i>Savings+2-Opt</i> que desarrollaban exploración de vecindarios para diseñar rutas de preparación de pedidos, sin modelar estrategias de búsqueda inteligentes y adaptativas, como los metaheurísticos, los cuales, generalmente conllevan a la obtención soluciones de mejor calidad y mayor eficiencia.</li> <li>En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	
Reglas	<ul style="list-style-type: none"> <li>La única regla, que detectada para el diseño de rutas, fue el <i>FCFS</i>, la cual, permitió generar secuencias de posiciones de almacenamiento, considerando el criterio la fecha de entrega de los pedidos de los clientes (Manzini <i>et al.</i>,2005). Inclusive, esta regla, también fue utilizada en siete artículos de los 33 revisados, como medida de referencia para comparar las mejoras en la reducción de tiempo o distancia respecto a heurísticos o metaheurísticos.</li> <li>En el acomodo, no se detectaron artículos en este componente (vacío).</li> </ul>	

Otro aspecto, que se destaca de los hallazgos de la metodología *SLR* (Tabla 1-3) fue que ninguno de los artículos representó *K* equipos heterogéneos, ni la condición de la disponibilidad del inventario en el ruteo de la preparación de pedidos. Este hallazgo evidencia un vacío en el estado del arte, que puede dificultar la apropiación de los resultados de los artículos evaluados en el ámbito empresarial del CEDI.

### 1.1.2 Resultados *SLR*: Problema *HVRP* en la conformación lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos

Este subnumeral tiene como objetivo presentar los resultados del *SLR* relacionados con el problema *HVRP* en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación

de pedidos. A partir del análisis de la literatura, se establecen las similitudes y diferencias entre ambos problemas, lo cual facilita la detección de las oportunidades de investigación y el aporte al conocimiento a alcanzar.

Del análisis del *SLR*, no se identificaron artículos que implementaran el problema *HVRP*, en el modelamiento de la conformación de lotes con ruteo o la configuración de rutas de mínimo tiempo, en el acomodo o la preparación de pedidos. Los artículos evaluados, se enfocaban principalmente, en el modelamiento del transporte, distribución u otros procesos logísticos genéricos con ruteo, que no consideraban las variables y restricciones de la operación del CEDI en estudio.

Debido a la ausencia de artículos del problema *HVRP*, que modelaran la conformación de lotes con ruteo en las operaciones del CEDI en estudio, se estableció la necesidad de realizar un análisis comparativo de sus componentes, variables y restricciones Para desarrollar la comparación, establecieron 10 componentes, que se obtuvieron de una revisión de la literatura, relacionado con la conformación de lotes con ruteo y el acomodo (Frazelle y Rojo,2006), (Bartholdi y Hackeman, 2011), (Takahama *et al.*,2002), (Heragu *et al.*,2005),(Hou *et al.*,2010),(Kutzelnigg, 2011),(Kulak *et al.*,2011), (Henn,2012). A continuación, se listan los componentes seleccionados para la comparación (Tabla 1-4).

**Tabla 1-4:** Componentes para comparar problema *HVRP* clásico respecto a la conformación de lotes con ruteo.

Acomodo	Preparación de Pedidos
Conformación de lotes ( <i>order batching</i> ) (componente 1)	
Ruteo (componente 2)	
$K$ equipos heterogéneos de diferentes capacidades de carga (componente 3)	
$K$ equipos heterogéneos de diferentes velocidades y acceso diferentes niveles de altura(componente 4)	
$n$ productos $i$ a acomodar (componente 5.1)	$n$ productos $i$ perteneciente a pedidos a preparar(componente 5.2)*
$m$ posiciones de almacenamiento $j$ (componente 6)	
Restricción de acceso a posiciones de almacenamiento $j$ , debido a las características del producto $i$ o equipo $k$ (componente 7)	
Tiempo de programación de cada lote (componente 8)	
Tiempo unitario de cargar y ubicar un producto $i$ , en la posición de almacenamiento $j$ , empleando el equipo $k$ (componente 9.1)	Tiempo unitario de extraer y descargar un producto $i$ de la posición de almacenamiento $j$ , empleando un equipo $k \in K$ (componente 9.2)*.
Disponibilidad del inventario de los $n$ productos $i$ a recoger en el CEDI (componente 10)*.	

A continuación, se presentan los resultados del análisis comparativo de los componentes del problema *HVRP* clásico respecto a la conformación de lotes con ruteo (Tabla 1-5). De

este modo, se establece cuales componentes fueron modelados en cada uno de los artículos evaluados en el *SLR*, y que vacíos existen en la literatura científica.

De los resultados obtenidos del *SLR* (Tabla 1-5), se valida que en la literatura no se han publicado artículos que modelen el problema *HVRP* para conformar lotes con ruteo de mínimo tiempo, costo o distancia en las operaciones del *CEDI* en análisis. A partir de este hallazgo, a continuación se describen las adaptaciones o inclusión de nuevas variables y restricciones, que se deberían modelar en el *HVRP* para representar el problema en estudio en el acomodo o la preparación de pedidos.

**Tabla 1-5:** Síntesis del análisis comparativo del problema *HVRP* respecto a la conformación de lotes con ruteo.

Autores	C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10*	
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	P	
Gendreau <i>et al.</i> ,(1999)			X	X	X	X					X	X	X	X						
Choi y Tcha(2007)			X	X	X	X					X	X								
Prado y Lopes(2007)			X	X	X	X					X	X	X	X						
Imran <i>et al.</i> ,(2009)			X	X	X	X					X	X								
Brandao <i>et al.</i> , (2009)			X	X	X	X					X	X								
Prins(2009)			X	X	X	X														
Rekersbrink <i>et al.</i> ,(2009)			X	X	X	X			X	X										
Ceschia <i>et al.</i> ,(2010)			X	X	X	X					X	X			X	X				
Euchi y Chabchoub(2010)			X	X	X	X					X	X	X	X						
Ozфирat y Ozkarahan(2010)			X	X	X	X					X	X								
Brandao (2011)			X	X	X	X					X	X								
Li <i>et al.</i> ,(2012)			X	X	X	X					X	X	X	X						
Duhamel <i>et al.</i> ,(2012)			X	X	X	X					X	X								
Prins(2012)			X	X	X	X					X	X			X	X				
Subramanian <i>et al.</i> ,(2012)			X	X	X	X					X	X								
De la Cruz <i>et al.</i> , (2013)			X	X	X	X			X	X	X	X								
Leung <i>et al.</i> ,(2013)			X	X	X	X			X	X	X	X	X	X						
Kritikos y Ioannou(2013)			X	X	X	X					X	X	X	X						
Bjelić <i>et al.</i> ,(2013)			X	X	X	X					X	X								

\*El criterio 10 evaluado en Tabla 1-5 aplica únicamente a la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.

- Integrar al ruteo un componente de conformación de lotes (componente 2). Ninguno de los artículos del problema *HVRP* modela la conformación de lotes, ni su integración con el ruteo (criterio 1), de allí la relevancia de esta diferencia.
- Modelar  $K$  EMMateriales heterogéneos de diferentes capacidades de carga, velocidades y manejo de productos en altura. El 100% de los artículos del *HVRP*, representaron equipos de diferentes capacidades de carga (componente 3), pero ninguno modeló la heterogeneidad de los equipos con diferencias en la velocidad y manipulación de productos en altura (componente 4).
- Modelar una restricción para la interacción entre los EMMateriales heterogéneo  $k \in K$ , los  $n$  productos  $i$ , y las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ . Esta restricción no fue detectada en ninguno de los artículos *HVRP*, y puede ser considerada determinante en la validez de la conformación de lotes con ruteo (componente 7).
- Representar los tiempos de programación y manipulación de los productos como valores variables. Esto se plantea, porque estos tiempos deben depender del tipo y cantidad de productos a recoger o acomodar, las posiciones de almacenamiento  $j$  a visitar, y las características técnicas de los  $K$  EMMateriales asignados (componente 8 y 9). En ninguno de los artículos evaluados del problema, se modelaron estos criterios, los cuales suelen ser críticos en la conformación de lotes con ruteo válidos, que permitan representar adecuadamente las operaciones.
- Verificar disponibilidad del inventario de los  $n$  productos  $i \in OC$  a preparar, incluyendo la integración con TIC como el *Warehouse Management System (WMS)*, que facilite la gestión de la información (componente 10). Ninguno de los artículos revisados del problema *HVRP* implementó este componente.

Adicionalmente, debe resaltarse que el criterio 6, es el único que no requiere modificación, ya que las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , en la conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, son equivalentes a los  $N$  nodos de la red de transporte y distribución modelados en los artículos del problema *HVRP*.

Finalmente, del análisis comparativo desarrollado se detecta la necesidad de modelar problemas de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos y acomodo. Estos problemas deben considerar  $K$  EMMateriales heterogéneos (diferentes velocidades, capacidades y manejo de altura),  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de

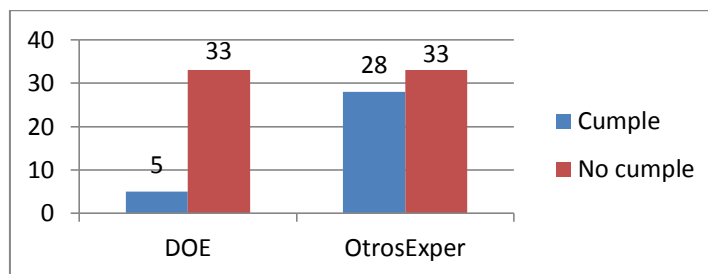
almacenamiento  $j$ , la verificación de disponibilidad del inventario y demás restricciones para estas operaciones. Con este enfoque, se cubriría el vacío detectado en el arte y aportaría al avance del conocimiento en estas operaciones del CEDI.

### 1.1.3 Resultados *SLR*: Modelos de *DOE* en la conformación de lotes con ruteo

En este apartado, se presentan los resultados del *SLR* relacionados con la implementación de modelos de *DOE* como método de experimentación y apoyo a la toma de decisiones en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos.

De los resultados del *SLR* (Figura 1-3), se identificó que únicamente cinco de los 33 artículos identificados utilizaron *DOE*, como método de experimentación, para analizar el impacto de diferentes factores sobre el tiempo o la distancia total de los lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. Debe resaltarse, que no se detectaron artículos, que implementaran modelos de *DOE*, como método experimentación y apoyo a la toma de decisiones en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo.

**Figura 1-3:** *DOE* en la conformación de lotes con ruteo



El modelo *DOE* más utilizado en el problema en estudio fue el diseño factorial completo, el cual, se detectó en cuatro de los cinco artículos revisados. En tanto, Manzini *et al.*,(2005), implementó un modelo de superficie de respuesta, con el fin de seleccionar los factores asociados a la conformación de lotes y ruteo, que le permitieran obtener el mínimo tiempo total en la preparación de pedidos.

De los resultados, se identificó un bajo nivel de utilización del *DOE* en la etapa de análisis, comparación y experimentación en la conformación de lote con ruteo en la preparación de pedidos. De otra parte, de los hallazgos del *SLR*, se detectaron 28



artículos que implementaron métodos de experimentación (OtrosExper) basados en ensayo y error, y análisis de escenarios, lo cual, permitió concluir acerca de su predominancia en el estado del arte (Figura 1-3). Una limitación de este último enfoque, es que no suele implementar metodologías sistemáticas, ni soportadas en criterios estadísticos como el *DOE*, que garanticen la validez de los análisis y la eficiencia de la experimentación.

## 1.2 Oportunidades de investigación

A partir del análisis de los resultados de la *SLR*, a continuación se presentan algunas oportunidades de investigación detectadas:

- Los artículos en la *SLR* que abordaban el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos consideraban únicamente un EM Materiales de capacidad fija o  $K$  homogéneos, y no modelaban la condición de disponibilidad del inventario (Daniels *et al.*, 1998; Petersen y Schmenner, 1999, Theys *et al.*, 2010). Estas limitaciones pueden conllevar a que los modelos identificados, no representen adecuadamente las variables, componentes y restricciones de la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, lo que puede generar soluciones no factibles.
- De los artículos estudiados, se detectó que la única restricción operativa modelada en los problemas de conformación de lotes con ruteo, fue el control de la capacidad de carga del EM Materiales. Por lo cual, no se consideraron otras restricciones relacionadas con los  $n$  productos  $i$  y las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  e inclusive otros factores de los EM Materiales (Rubrico *et al.*, 2008; Rubrico *et al.*, 2011).
- De los artículos revisados, ninguno modeló la restricción entre los  $n$  productos  $i$ , las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y los  $K$  EM Materiales heterogéneos en la conformación de lotes con ruteo. El modelamiento de esta restricción, no sólo contribuye a la obtención de soluciones factibles, sino que también determina la estructura de los vecindarios de búsqueda y el enfoque para modelar el problema.
- No se detectaron artículos que implementaran metaheurísticos u otros modelos cuantitativos sincronizados con una TIC (Tecnología de la Información y Comunicaciones) que permitieran resolver el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos. Adicionalmente, no se identificaron artículos, que representaban o solucionaban el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, lo cual, evidenció un vacío en el estado del arte.

- 
- Para resolver el subproblema de ruteo integrado a la conformación de lotes y configuración de rutas, se identificó que la implementación de heurísticos como: *S-shape*, *Largest Gap* y *combined* predominaron en la literatura. Una limitación en la utilización de estos heurísticos es que no implementan estrategias sistemáticas de exploración de vecindarios, sino que generaban patrones o esquemas para configurar las rutas. Este enfoque puede generar soluciones de baja calidad respecto al tiempo o distancia total recorrida en la operación.
  - En la literatura predominó el modelamiento de un EMMateriales de capacidad fija  $K$  homogéneos, en el problema en estudio. En algunos escenarios, la representación de  $K$  EMMateriales homogéneos puede generar soluciones no factibles o de baja calidad respecto a la eficiencia de la operación. Esto se plantea, porque en el acomodo o la preparación de pedidos pueden existir diferentes tipos de productos  $i$  y posiciones de almacenamiento  $j$  con diferentes niveles de altura, que requieren composición de flotas con EMMateriales heterogéneos. Por el motivo expuesto, existe una debilidad en el estado del arte relacionada con artículos, que consideren  $K$  EMMateriales heterogéneos, que permitan superar las limitaciones operativas descritas y aumenten la flexibilidad para modelar las operaciones del CEDI en estudio.
  - De los resultados del *SLR*, no se detectaron artículos que modelaran el ruteo integrado a la conformación de lotes o el diseño de rutas, en el acomodo, lo cual, evidencia un vacío significativo en el estado del arte. Los artículos identificados en el acomodo, se enfocaban en la asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*), sin considerar la formación de lotes, ni la configuración de secuencias de mínimo tiempo total para acomodar los productos, en las ubicaciones asignadas.
  - En los resultados de la metodología *SLR*, únicamente se identificaron 5 artículos que modelaron el tiempo de manipulación de los  $n$  productos  $i$  en la función objetivo del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos (Rubrico *et al.*,2011; Henn,2012; Chen *et al.*,2014; Bessenouci *et al.*,2010; Xing *et al.*,2010). Una limitante identificada en los artículos fue el modelamiento del tiempo de manipulación como un valor constante, que no dependía de las características de los productos  $i$  recoger o acomodar, las localizaciones de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  a visitar y los EMMateriales asignados. Al considerar, los tiempos de manipulación constantes se pueden generar imprecisiones en la medición del tiempo total de la

soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, que conlleven a conclusiones o decisiones inapropiadas.

- Únicamente se detectó un artículo, que consideró el inventario como una restricción en el ruteo de la preparación de pedidos (Daniels *et al.*, 1999). Este hallazgo, permitió evidenciar el bajo nivel de modelamiento de esta restricción en la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos. Debe tenerse, en cuenta, que el inventario, restringe e impacta la conformación de lote con ruteo factibles, incluyendo la estructura de su espacio de búsqueda. Esto se plantea, ya que si no existe disponibilidad de  $n$  productos  $i$  para atender las órdenes de los clientes, estas no se pueden programar y se pueden generar retrasos en la operación.
- Ninguno de los artículos del *HVRP* revisados abordaron el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos. Los artículos detectados, se enfocaban en la configuración de rutas de mínimo costo o tiempo, principalmente en los procesos transporte y distribución, considerando  $K$  vehículos de diferentes capacidades de carga. Por este motivo, en los resultados del *SLR* (1.1.3), se estableció la necesidad de adaptar o incluir los siguientes componentes en el *HVPR* para modelar el problema en estudio en el acomodo y la preparación de pedidos. Entre los componentes, se consideran: i) conformación de lotes con ruteo integrados; ii)  $K$  EM Materiales heterogéneos (diferentes capacidades de carga, velocidades y manejo de productos en altura); iii) restricción entre  $n$  productos,  $m$  posiciones de almacenamiento y  $K$  EM Materiales heterogéneos; iv) modelamiento de condición del inventario en la preparación de pedidos, v) integración TIC a los metaheurísticos para resolver los problemas en modelamiento. De esta manera, se establecen las diferencias entre el *HVRP* y la conformación de lotes con ruteo, en las operaciones en estudio, lo que evidencia el vacío existente en el estado del arte.
- En los problemas *HVRP* analizados, los vehículos heterogéneos únicamente ejecutaban movimientos horizontales. Por su parte, en el acomodo y la preparación de pedidos comúnmente se realizan movimientos horizontales y verticales (altura) para acomodar o recoger los  $n$  productos  $i$  en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ . Este vacío en el *HVRP* justifica la necesidad de modelar el problema de conformación de lotes con ruteo, en las operaciones de interés en el CEDI.
- En un 90% de los artículos revisados, se utilizaron métodos de experimentación basados en escenarios, o ensayo y error, que evaluaban un sólo factor a la vez, sobre

la variable de respuesta de interés, en la conformación de lotes con ruteo. Con la implementación de este enfoque, no sólo se aumenta el riesgo de obtener resultados no válidos, sino de generar ineficiencias respecto a costos y tiempos de experimentación.

- Utilización limitada de modelos estadísticos de *DOE* en la experimentación y apoyo en la toma de decisiones en la conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, ya que únicamente se detectaron 5 artículos en el *SLR*. Inclusive, en cuatro de los artículos identificados, se implementaron modelos factoriales completos, y uno sólo empleo un de superficie de respuestas. De este hallazgo, se detecta la baja utilización del *DOE* y la ausencia de metodologías o criterios, que permitan seleccionar el modelo más apropiado según las variables, factores y restricciones del problema de conformación de lotes con ruteo a estudiar.

### 1.3 Posibles Aportes

A partir de los resultados del *SLR* y las oportunidades de investigación detectadas, a continuación, se presentan algunos aportes, que se pretenden alcanzar con la tesis:

- Modelamiento de un problema conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, que considera  $K$  EMMateriales heterogéneos, múltiples órdenes de los clientes (*OC*) con  $n$  productos  $i$  a recoger,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , la condición de disponibilidad del inventario e integralidad para la recogida de las *OC*. El modelamiento de este problema, incluye el desarrollo de una regla y metaheurísticos sincronizados con un *WMS*, que permiten solucionar el problema de manera integrada y simultanea, con el fin de obtener lotes con ruteo de mínimo tiempo total.
- Desarrollo matemático y computacional de un problema de la conformación de lotes con ruteo en el acomodo, que incluya  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos  $i$  y  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ . Para resolver el problema, se modela una regla y metaheurísticos integrados a un *WMS*, que permita generar lotes con ruteo de mínimo tiempo en la operación. Debe resaltarse, que este problema sería uno de los primeros en abordar la conformación de lotes con ruteo en el acomodo.
- Para los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos, se modelan  $K$  EMMateriales heterogéneos de diferentes capacidades de carga  $c$ , velocidades  $v$  y manejo de productos en altura  $h$ . Debe tenerse en cuenta, que los EMMateriales pueden ejecutar movimientos horizontales y

verticales (altura), dependiendo de sus especificaciones técnicas. De esta manera, se busca contribuir al avance de esta línea de conocimiento y mejorar las capacidades de modelamiento de las operaciones del CEDI en estudio. Esto se plantea porque en la literatura científica, únicamente, se detectaron artículos que consideraban un equipo de capacidad  $c$  o  $K$  homogéneos (iguales).

- Identificación, selección e implementación de modelos estadísticos de diseño de experimentos (*DOE*), que permitan ejecutar procesos de experimentación eficientes respecto al tiempo y costo. Además, los diseños facilitan la detección de combinaciones de niveles de los factores, que generan las soluciones de menor tiempo total para los problemas de conformación de lotes con ruteo. Así, se pretende desmotivar el uso de los métodos basados en ensayo y error, o la utilización de modelos factoriales completos que predominan en los resultados del *SLR*. Finalmente, debe resaltarse, que este es un aporte metodológico al estado del arte.

## 1.4 Objetivos de la tesis

A continuación, se presentan los objetivos de la tesis que permiten desarrollar las oportunidades de investigación para generar conocimiento y contribuir al estado del arte.

### 1.4.1 Objetivo general

Modelar problemas para la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos, considerando  $K$  EM Materiales heterogéneos y sus restricciones asociadas; que se solucionen con metaheurísticos integrados a un *WMS*, y apoyan decisiones tácticas-operativas en las operaciones bajo modelamiento.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo de mínimo tiempo total posible, que se solucione con metaheurísticos integrados a un *WMS* y comprenda el modelamiento de  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y  $K$  equipos heterogéneos.
- Modelar un problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo, en la preparación de pedidos que se resuelva con metaheurísticos sincronizados a un *WMS*,

---

y considere  $n$  productos  $i$ ,  $K$  EM Materiales heterogéneos, la disponibilidad del inventario y la integralidad de la recogida de las órdenes de los clientes(OC).

- Validar con *DOE (Design of Experiments)*, los metaheurísticos integrados al *WMS*, que permitan identificar, cuales, combinaciones de los niveles de los factores de los problemas de conformación de lotes con ruteo, generan las soluciones de menor tiempo total para el acomodo y la preparación de pedidos, respectivamente.

## 2. Estructura general de los problemas de conformación de lotes con ruteo

En la presente tesis se tiene como propósito desarrollar el enfoque de modelamiento de problemas de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo, en el acomodo y en la preparación de pedidos. Estos problemas consideran  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y la disponibilidad del inventario. Esta última condición, se modela únicamente en la operación de preparación de pedidos, ya que no se pueden recoger productos que no se tengan disponibles en el CEDI.

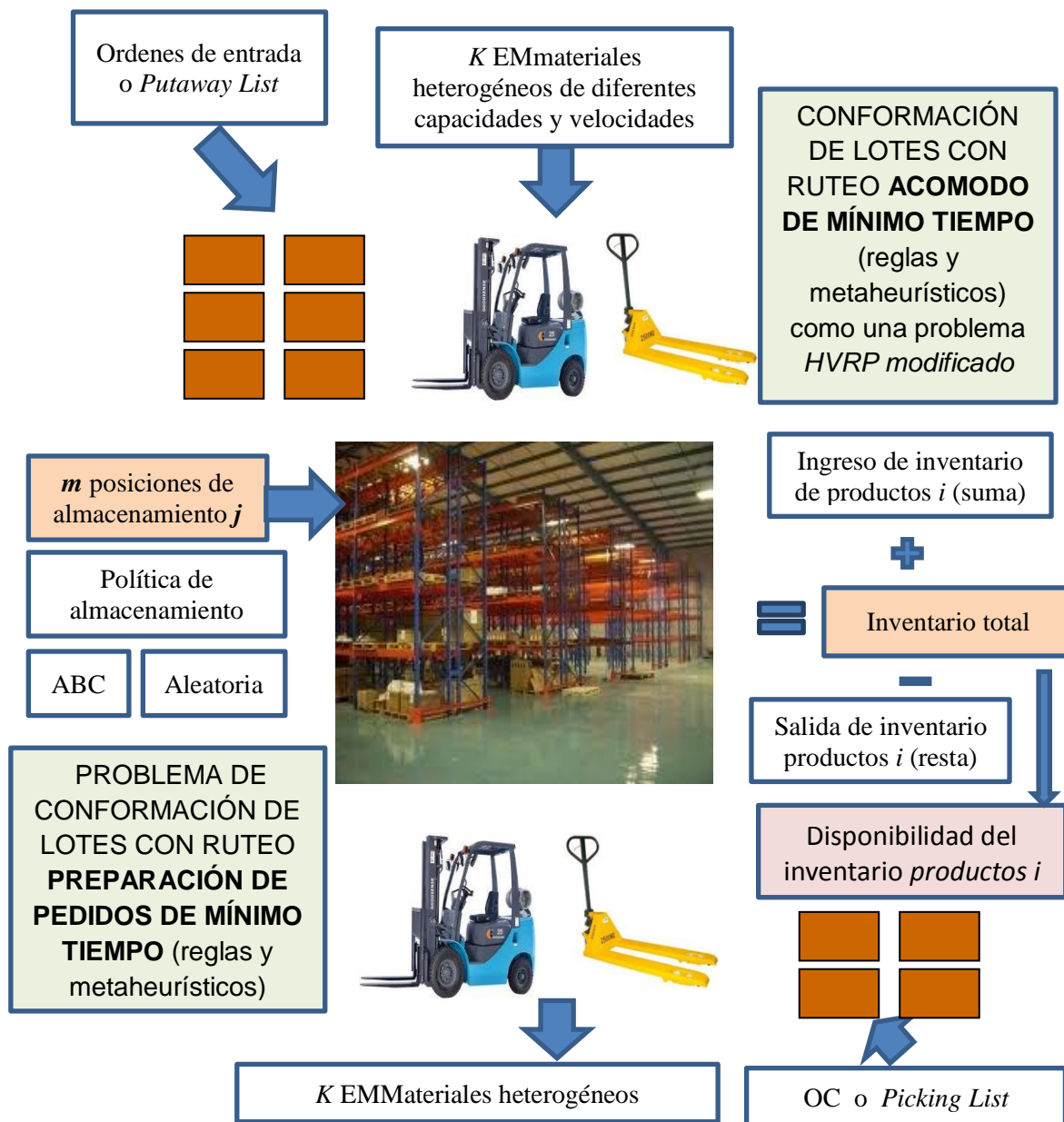
En los problemas en estudio, un grupo de EMMateriales heterogéneos, se compone de recursos que tienen diferentes capacidades de carga  $c$ , velocidades  $v$  de desplazamiento (horizontal) y manejo de productos en altura  $h$  (vertical). El modelamiento de los  $K$  EMMateriales heterogéneos es un componente que impacta en el tiempo de las operaciones y la conformación de lotes con ruteo válidos. A partir de los resultados del *SLR*, se justifica la importancia de modelar dos problemas para la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y en la preparación de pedidos, respectivamente. De esta manera, no solo se pretende contribuir al estado del arte del tema, sino también representar adecuadamente sus objetivos, componentes y restricciones, con el fin de obtener soluciones válidas.

Una vez justificada la oportunidad de investigación, en el presente capítulo se tiene como objetivo esquematizar la estructura y se desarrolla el enfoque de simultaneidad e integralidad que facilita el modelamiento y posterior solución de los problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos. Además, se describen las características de las restricciones más relevantes que estas poseen.

## 2.1 Estructura y componentes de los problemas de conformación de lotes con ruteo

Los problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos, se modelan como dos problemas independientes que se resuelven con reglas y metaheurísticos integrados a un *WMS*. A continuación, se presenta la estructura y componentes de los problemas incluyendo las variables comunes entre estos (Figura 2-1).

**Figura 2-1:** Estructura y componentes de problemas de conformación de lotes con ruteo





La conformación de lotes con ruteo en el acomodo o preparación de pedidos, inicia con la recepción de las ordenes de entrada (proveedores o fábricas) o los requerimientos de los clientes(OC), los cuales, contienen los  $n$  productos  $i$  a ubicar o recoger de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ (Figura 2-1). En la preparación de pedidos, se modela la condición de la disponibilidad del inventario y la integralidad de la recogida de los pedidos, los cuales afectan la factibilidad de las soluciones.

Posteriormente, se forma un conjunto de lotes con ruteo en el acomodo o preparación de pedidos, que se obtienen del modelamiento de reglas de prioridad o metaheurísticos de búsqueda en vecindarios integrados a un WMS. Al crear los lotes simultáneamente, se generan rutas que contienen secuencias de  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  a visitar con el EM Materiales  $k \in K$ , para acomodar o recoger los  $n$  productos  $i$ .

La conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos tienen estructuras similares, pero existen diferencias en sus funciones objetivo, variables y restricciones que conllevan a cambios en el modelamiento matemático y computacional. Por este motivo, se desarrollan dos problemas, que permiten representar cada una de las operaciones. En los capítulos 3 y 5 se modelan de manera detallada los problemas para las operaciones en estudio.

A pesar de las diferencias, entre los problemas para conformación de lotes con ruteo, estos comparten algunos componentes (políticas o variables) en el CEDI como: política de almacenamiento y gestión del inventario. La política de almacenamiento impacta en el modelamiento de los problemas, ya que esta determina dónde se ubican los  $n$  productos  $i$  a acomodar (*slotting*) o recoger de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  empleando un EM Materiales heterogéneo  $k \in K$ . Por este motivo, la implementación de una política de almacenamiento ABC, asignación de posiciones aleatorias, entre otras, puede afectar la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo. Por este motivo, esta política se convierte en un componente de interacción entre las dos operaciones, de allí, la importancia de incluirla en el modelamiento.

El inventario es otro componente que se comparte entre el acomodo y la preparación de pedidos. Esto se plantea, porque los  $n$  productos del conjunto de lotes en el acomodo, que se ubican en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  asignadas, se suman al inventario total de cada producto  $i$  en el CEDI. Por su parte, en la preparación de pedidos, se conforman lotes con ruteo para recoger  $n$  productos  $i$  solicitados en las OC o

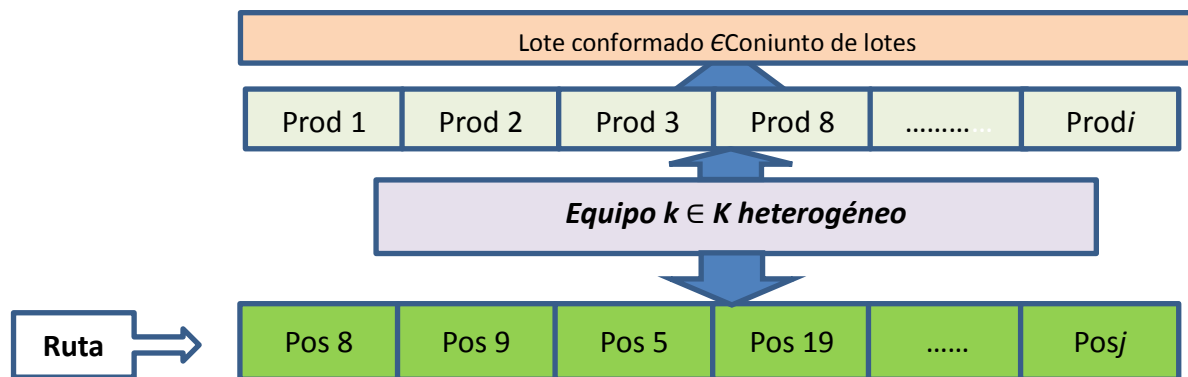
*picking list*, siempre que exista inventario disponible. Por esta situación, se generan dos listas o vecindarios de búsqueda para el problema en la preparación de pedidos. El primer vecindario, se compone de las OC o *picking list* con  $n$  productos  $i$  con inventario disponible. El segundo, contiene con las OC con faltantes de inventario. Por el motivo expuesto, la condición del inventario genera diferencias, en el modelamiento matemático y computacional de los problemas de conformación de lotes con ruteo, entre el acomodo y la preparación de pedidos.

Finalmente, se puede indicar, que la conformación de lotes con ruteo de las dos operaciones en estudio, se modela como dos problemas independientes pero comparten dos componentes denominados política de almacenamiento y el inventario. En términos generales, debe tenerse en cuenta que el acomodo permite incrementar el inventario total y la preparación de pedidos, su disminución, ya que se recogen  $n$  productos  $i$  para atender los requerimientos de los clientes.

## 2.2 Simultaneidad en la conformación de lotes con ruteo

Los problemas de conformación de lotes con ruteo en el acomodo o preparación de pedidos, se modelan con un enfoque de simultaneidad e integralidad. Esto se plantea, ya que al conformar conjuntos de lotes con  $n$  productos  $i$  simultáneamente se diseñan rutas integradas con  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , que se deben visitar para ejecutar las operaciones. A continuación, se representa un lote con ruteo en el acomodo o preparación de pedidos (Figura 2-2).


**Figura 2-2:** Relación de la conformación de lotes con ruteo



Para los problemas de modelamiento, la estructura y el número de lotes con ruteo de un conjunto a formar, se determina por la cantidad de  $K$  EMMateriales disponibles en el CEDI o los  $n$  productos  $i$  a acomodar o recoger. La selección de uno de los dos criterios depende de las características y dinámica de la operación de acomodo o preparación de pedidos en modelamiento. A continuación, se representa la estructura genérica del conjunto de lotes con ruteo para las operaciones del CEDI en estudio (Tabla 2-1).

**Tabla 2-1:** Conjunto de lotes con ruteo de mínimo tiempo.

Conformación de lote $r \in$ Conjunto						$Cu_r \leq$	$C_{dr}$
<b>Conjunto de lotes</b>	Lote 1	EM $k$	P <sub>11</sub>	P <sub>21</sub>		Cu <sub>1</sub>	Cd <sub>1</sub>
			Pos <sub>1</sub>	Pos <sub>8</sub>			
	Lote 2	EM $k$		P <sub>42</sub>	P <sub>22</sub>	Cu <sub>2</sub>	Cd <sub>2</sub>
				Pos <sub>9</sub>	Pos <sub>9</sub>		
	.....		.....	.....	.....	.....	.....
			.....	.....	.....		
	Lote $r$	EM $k$	P <sub>1r</sub>	P <sub>2r</sub>	P <sub>6r</sub>	Cu <sub><math>l</math></sub>	Cd <sub><math>l</math></sub>
			Pos <sub><math>j</math></sub>	Pos <sub><math>j</math></sub>	Pos <sub><math>j</math></sub>		



$Pos_j$	Posición de almacenamiento $j$
$P_{ir}$	Producto $i \in$ Lote $r$
EM $k$	EMMateriales $k \in K$
Cu <sub><math>r</math></sub>	Capacidad utilizada del Lote $r$
Cd <sub><math>l</math></sub>	Capacidad disponible del Lote $r$

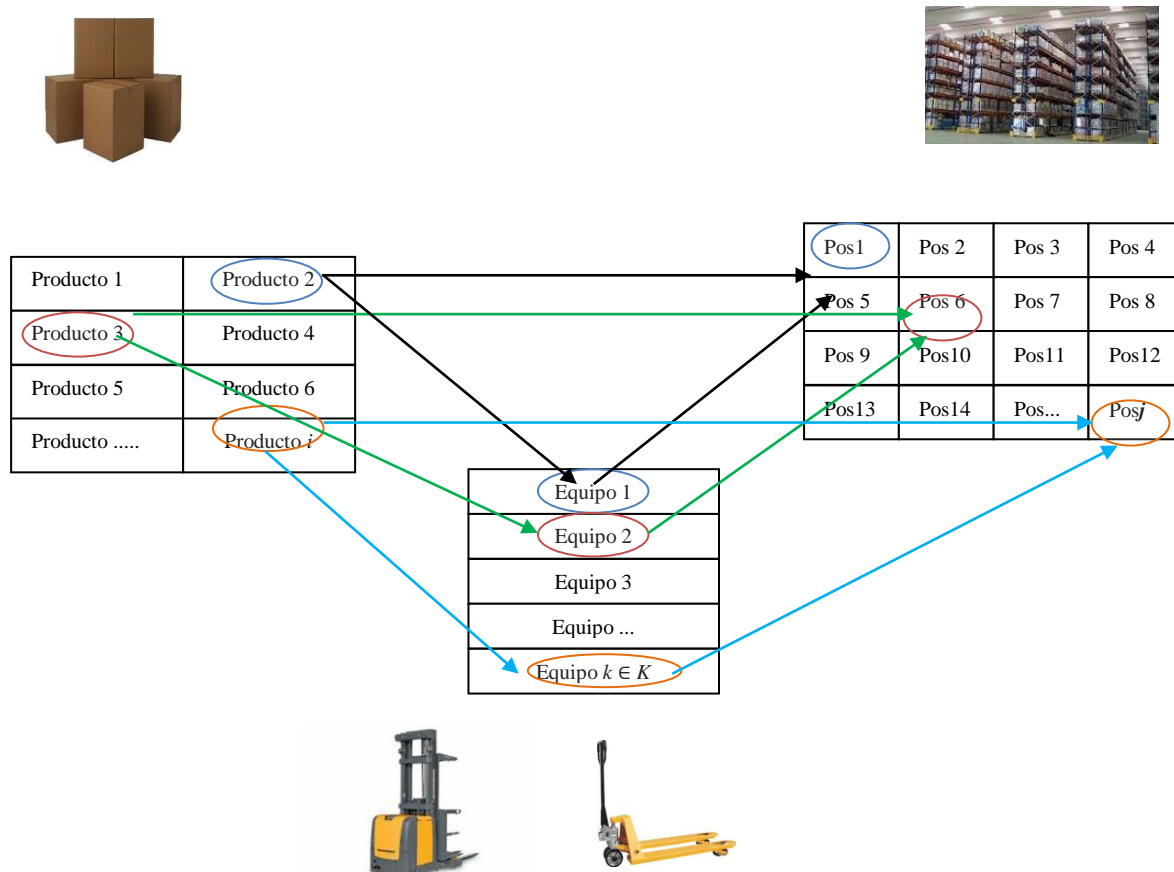
Los problemas de conformación del conjunto de lotes con ruteo de mínimo tiempo, se solucionan en dos etapas integradas y simultáneas (Tabla 2-1). En una primera etapa, se forma un conjunto de lotes (etapa 1) implementando reglas de prioridad o metaheurísticos  $NS$  (*Neighbor Search*) integrados a  $WMS$ . De manera simultánea en una segunda etapa, se configuran secuencias o rutas con las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  a visitar para acomodar o preparar los  $n$  productos  $i$  de cada uno de los lotes de conjunto conformado. Para generar cada una de las rutas, se implementa un metaheurístico de búsqueda tabú (clásico, intensificación o diversificación) que busca producir soluciones del menor tiempo total posible para las operaciones en estudio. En los capítulos 3 y 5 se modelan de manera detallada los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos.

## 2.3 Diferencias en las restricciones de los problemas para la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación pedidos respecto al *HVRP* clásico.

Una característica, que diferencia los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos, respecto a otros procesos logísticos, como el transporte y distribución representados en el *HVRP*, son las restricciones entre los  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y  $K$  EMMateriales heterogéneos.

En la conformación de un lote con ruteo, la restricción más relevante que existe, se presenta entre los  $n$  productos  $i$ , las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y los  $K$  EMMateriales heterogéneos. Por este motivo, primero se asigna o establece la relación entre los  $n$  productos  $i$  a las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y posteriormente, se determinan cuáles de los EMMateriales  $k \in K$  disponibles pueden ser programados para ejecutar la operación. A continuación, se representa la restricción descrita (Figura 2-3).

**Figura 2-3:** Restricción entre  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones  $j$  y  $K$  EMMateriales heterogéneos



Las posiciones de almacenamiento  $j$  (nodos) a visitar en las operaciones de acomodo y preparación de pedidos presentan diferencias respecto a los clientes (nodos), que se modelan en otros procesos logísticos como el transporte y la distribución. Esto se plantea, porque las posiciones de almacenamiento  $j$  en el CEDI pueden tener diferentes niveles de altura, lo cual, conlleva a que los EMMateriales heterogéneos  $K$  ejecuten movimientos horizontales y verticales para acomodar o recoger los  $n$  productos  $i$ . De allí, la necesidad de modelar la restricción entre los  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones  $j$  y  $K$  equipos heterogéneos en la conformación de lotes con ruteo para el acomodo y la preparación de pedidos.

Por su parte, en los procesos de transporte y distribución la restricción de acceso a los  $N$  nodos (clientes) por alguno de los  $K$  camiones se basa en una estrategia operacional, más que por limitaciones técnicas de los equipos como se presenta en el acomodo y la preparación de pedidos (Ceschia et al., 2010; Prins, 2012). Adicionalmente, en el proceso de transporte y distribución los  $K$  camiones únicamente ejecutan desplazamientos horizontales para entregar o recoger la carga. De esta manera, se identifica que el modelamiento de esta restricción en el problema *HVRP* es simplificada respecto a la conformación de lotes con ruteo (Ceschia et al., 2010).

A partir de los resultados del análisis realizado, se evidencia la necesidad de modelar los problemas de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo en el acomodo y la preparación de pedidos. Esto se establece por las características de la restricción entre los  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones  $j$  y  $K$  EMMateriales heterogéneos y sus diferencias con el problema *HVRP*.

Finalmente, como resultado del presente capítulo se plantea un enfoque integrado y simultáneo para modelar y solucionar los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo o la preparación de pedidos, el cual no había sido detectado en los resultados del *SRL*. De esta manera, se busca contribuir al avance del estado del arte y mejorar las capacidades de modelamiento de estas dos operaciones del CEDI

### **3. Problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo considerando $K$ EMMateriales heterogéneos: Formulación y métodos de solución**

El acomodo es una operación del CEDI que permite trasladar los productos desde el muelle de descargue o de recepción a las posiciones de almacenamiento asignadas utilizando equipos de manejo de materiales (EMMateriales) o personal (Frazelle y Sojo, 2006; Van der Berg, 2007). Para Bartholdi y Hackman (2011) el acomodo representa aproximadamente el 15% de los costos en CEDI no automatizados, ya que en este tipo de almacén, se suelen requerir cantidades considerables de personal y equipos para ubicar los productos.

En la gestión del acomodo, se consideran decisiones de: a) asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*) y b) conformación de lotes con ruteo para ubicar los productos en las posiciones de almacenamiento (Van der Berg, 2007; Bartholdi y Hackman, 2011; Henn, 2012). A partir de los resultados de la *SLR*, sólo se identifican modelos de optimización y metaheurísticos que apoyan decisiones de *slotting*, los cuales no consideraban los componentes de la conformación de lotes con ruteo.

Para superar ese vacío en el estado del arte, se estableció como objetivo modelar un problema de conformación de lotes con ruteo, que se soluciona con reglas y metaheurísticos integrados a *WMS*, con el fin de obtener el menor tiempo total posible para la operación. Con este enfoque, no sólo se busca contribuir a la eficiencia y eficacia del acomodo, sino también a la generación de conocimiento en esta línea de investigación.

Por los motivos expuestos, el presente capítulo tiene los siguientes objetivos:

- Representar la estructura del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo en el acomodo.
- Modelar algebraicamente la función objetivo y restricciones del problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo
- Desarrollar los metaheurísticos y regla de prioridad integrados a un *WMS* que permiten solucionar el problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo.

A continuación cada uno de los objetivos listados serán desarrollados en su respectivo orden.

### 3.1 Estructura del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo, en el acomodo

En este apartado, se presenta la estructura del problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, que se soluciona con metaheurísticos y una regla de prioridad sincronizados a un *WMS*, que permitan obtener tiempos mínimos totales en la operación. La estructura que se desarrolla, se basa en los hallazgos obtenidos en el *SLR* y el análisis del problema de conformación de lotes con ruteo.

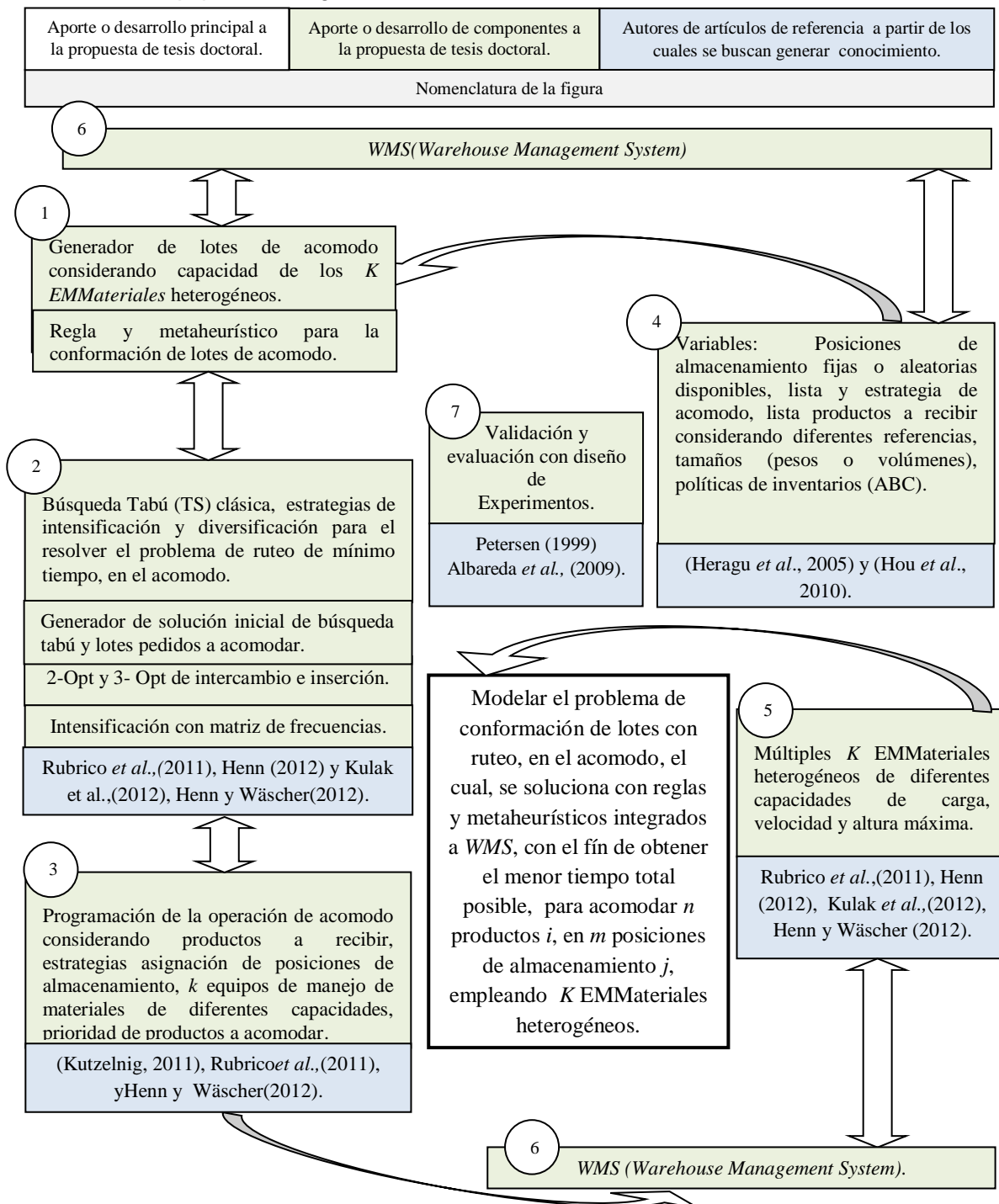
Para facilitar la representación de la estructura diseñada, esta es dividida en seis componentes, los cuales, presentan algunas interacciones y dependencias, que permiten el adecuado modelamiento y posterior solución del problema de modelamiento. Adicionalmente, en la estructura se emplea un código de colores, que permite diferenciar el aporte principal de la tesis (blanco), los componentes desarrollados (verde) y los autores referenciados para la construcción de la estructura (azul) (Figura 3-1).

Los componentes de conformación de lotes con ruteo en el problema en estudio (número 1 y 2), se solucionan de manera integrada y paralela (Figura 3-1). Esto se establece, ya que al crear un lote, que es una combinación factible de  $n$  productos  $i$  y un *EMMateriales* heterogéneo  $k \in K$ , inmediatamente, se genera una ruta de mínimo tiempo, que contiene  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  que se deben visitar para el acomodo.

Para resolver el primer componente (número 1) denominado conformación de lotes de acomodo, se modela una regla de prioridad denominada *FCFS* (*First Come First Served*) y un metaheurístico llamado *INS* (*Intelligent Neighbor Search*) que desarrolla búsquedas locales inteligentes. La regla de *FCFS* genera una única combinación factible de lotes,

considerando el orden de llegada de los productos que ingresan al CEDI. En tanto, el metaheurístico *INS* crea y evalúa combinaciones factibles de  $k \in K$  EMMateriales y  $n$  productos  $i$  a ubicar en las posiciones de almacenamiento  $m$ , garantizando el cumplimiento de las restricciones de la operación.

**Figura 3-1:** Estructura del problema conformación de lotes con ruteo, considerando  $K$  equipos heterogéneos.





El segundo componente (número 2) consiste en configurar rutas con secuencias de  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  para cada lote generado implementando un metaheurístico de búsqueda tabú o cinco variantes de estos, que modelan estrategias de diversificación e intensificación. Estos metaheurísticos, se seleccionan debido a su capacidad de explorar vecindarios de búsqueda eficientemente, y obtener soluciones factibles de adecuada calidad respecto al tiempo total de la operación (Rubrico *et al.*, 2008; Kulak *et al.*, 2012; Henn y Wäsher, 2012).

El componente de programación (número 3), consiste en determinar el orden de acomodo de los lotes conformados con ruteo (número 1;número 2), con el fin de ubicar los  $n$  productos  $i$  en las  $m$  posiciones de almacenamiento, empleando el EMMateriales  $k \in K$  asignado (número 5). En la programación se debe garantizar el adecuado modelamiento de las variables y parámetros asociados al problema (número 4). Por último, el resultado de la programación, se registra en el *WMS* (número 6).

Por su parte, componente de validación y evaluación experimental (número 7), consiste en la implementación de modelos de diseño de experimentos (*DOE, Design of Experiment*) como el factorial fraccionado  $2^{k-p}$  y las parcelas divididas. Estos diseños permiten determinar que regla y metaheurísticos de conformación de lotes con ruteo se deben modelar para obtener el menor tiempo posible de acomodo. Este componente debe considerarse como un aporte metodológico en el estado del arte.

Con la estructura planteada (Figura 3-1), se busca contribuir al estado del arte, ya que se pretende cerrar la brecha científica relacionada con la ausencia de reglas y metaheurísticos integrados a un *WMS* para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo. En el problema descrito, se consideran  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y  $n$  productos  $i$ .

### **3.2 Formulación de la función objetivo y restricciones del problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo**

En esta sección es formulado un modelo de optimización para el problema de conformación de lotes con ruteo (Kulak *et al.*, 2012; Henn y Schmid, 2013; Prins 2009 y Leung *et al.*, 2013). Este modelo se compone de la función objetivo, restricciones, variables de decisión y parámetros.

La notación del modelo es descrita a continuación:

#### Índices y conjuntos

$l \in L$	Lote de acomodo (LA) $l$ perteneciente a un conjunto de solución de lotes (CSLA) $L$ , los cuales tienen asociada una ruta de acomodo ( $s^l$ ) $w$ del conjunto de rutas (CRS) $W$
$e, f \in D$	Posiciones de almacenamiento.
$G \in D$	Subconjunto de posiciones de almacenamiento.
$k \in K$	EMMateriales disponibles en el CEDI.
$i \in I$	Producto $i$ perteneciente al total $I$ de las ordenes de recepción o lista de acomodo.

#### Parámetros:

$d^{ef}$	Distancia entre las posiciones de almacenamiento $e$ y $f$ .
$V_k^l$	Velocidad de viaje ( $m/s$ ) de un EMMateriales $k \in K$ asignado a un $LA^l \in CSLA_L$
$tbu_{kie}$	Tiempo de ubicación y manipulación de un producto $i \in LA^l$ en la posición de almacenamiento $e$ usando un EMMateriales $k \in K$ .
$b_i$	Cantidad de producto $i$ a ser acomodado en un lote $LA^l \in CSLA_L$ .
$ALC_k$	Capacidad de carga disponible de un EMMateriales $k \in K$ .

#### VARIABLES DE DECISIÓN

$S_{ef}^l =$	$\begin{cases} 1, \text{ Si un posición } e \text{ es visitada inmediatamente después de una posición } f \text{ en una} \\ \text{ruta asociada a un lote } LA^l \in CSLA_L \\ 0, \text{ De otro modo} \end{cases}$
$X_i^l =$	$\begin{cases} 1, \text{ Si un producto } i \text{ esta asignado a un } LA^l \in CSLA_L \\ 0, \text{ De otro modo} \end{cases}$
$Y_k^l =$	$\begin{cases} 1, \text{ Si un EMMateriales } k \text{ es asignado a una ruta asociada a un } LA^l \in CSLA_L \\ 0, \text{ De otro modo} \end{cases}$
$N_f^l =$	$\begin{cases} 1, \text{ Si una posición } f \text{ es visitada dentro de una ruta asociada a un } LA^l \in CSLA_L \\ 0, \text{ De otro modo} \end{cases}$

Formulación del modelo:

$$\begin{aligned} \text{Min } T = & \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{e \neq f \in D} \frac{d_{ef}}{v_k^l} \cdot d_{ef}^l \cdot Y_k^l \\ & + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{e \in D} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y_k^l \cdot X_i^l \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} X_i^l = 1 \quad \forall l \in L \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in I} b_i X_i^l \leq \sum_{k \in K} ALC_k Y_k^l \quad \forall l \in L, k \in K \quad (3.3)$$

$$\sum_{f \in S, f \neq e} S_{ef}^l = N_e^l \quad \forall l \in L, e \in D \quad (3.4)$$

$$\sum_{e \in S, f \neq e} S_{ef}^l = N_f^l \quad \forall l \in L, f \in D \quad (3.5)$$

$$\sum_{e \in g, e \in D \setminus g} S_{ef}^l \geq N_f^l \quad \forall l \in L, f \in D \quad (3.6)$$

$$d_{ef}^l, X_i^l, Y_k^l, N_e^l \in (0,1) \quad (3.7)$$

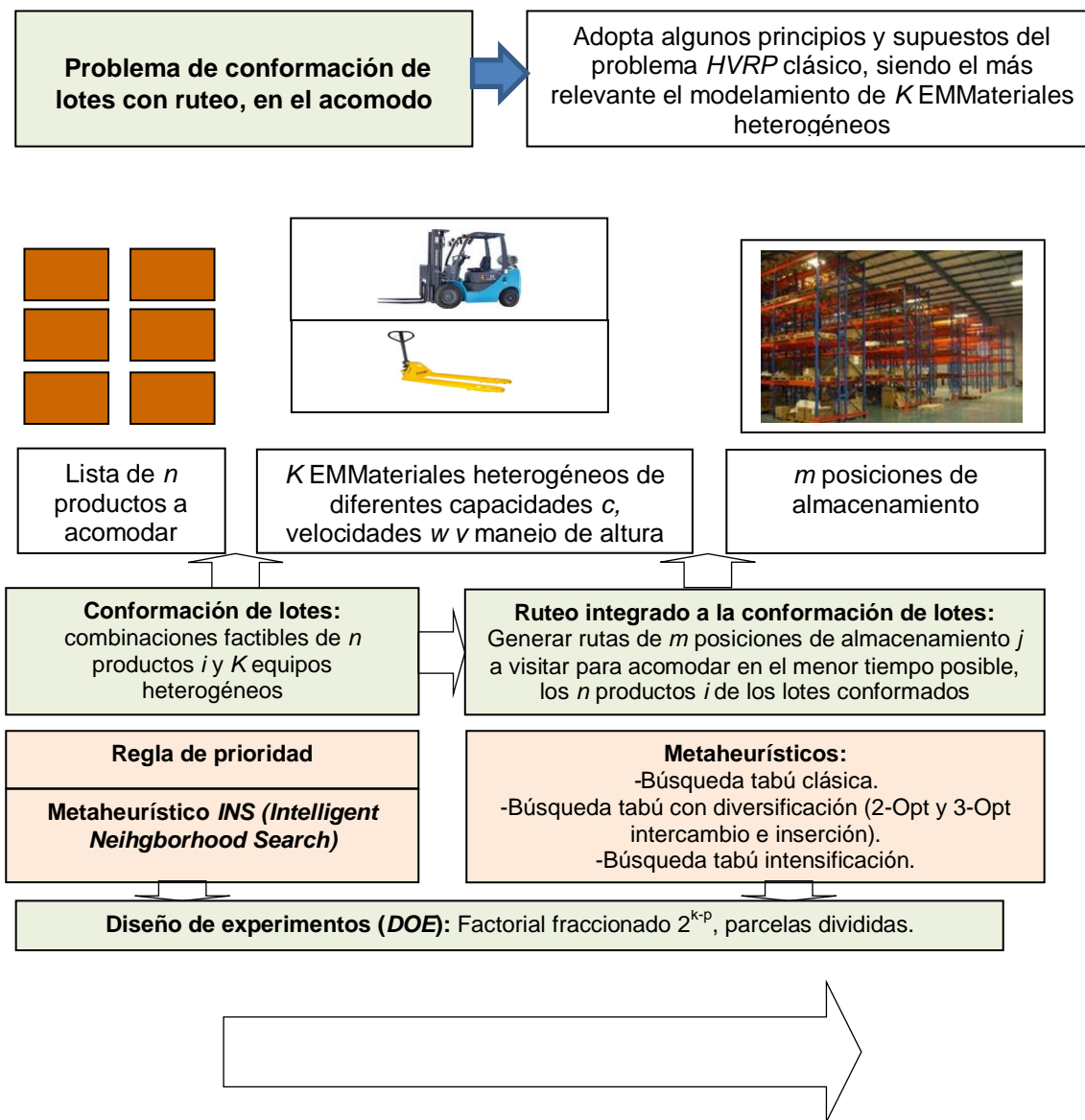
La función objetivo (3.1) minimiza el tiempo total para el conjunto de lotes con ruteo. La restricción (3.2) asegura que se asigna cada producto  $i$  a un  $LA^l \in CSLA_L$ . La restricción (3.3) asegura que la capacidad de carga de un EMMateriales  $k \in K$  no es excedida por la cantidad de productos  $i$  asignados al  $LA^l \in CSLA_L$ . Las restricciones (3.4) y (3.5) aseguran que cada posición de almacenamiento de una ruta asociada a un lote  $l \in L$  tiene un predecesor y un sucesor. La restricción (3.6) evita subtours en el conjunto de  $g$  posiciones de almacenamiento. Finalmente, la restricción (3.8) garantiza que las variables de decisión sean positivas.

### 3.3 Regla de prioridad y metaheurísticos integrados a WMS para solucionar problema en estudio

En esta sección son modelados una regla de prioridad y metaheurísticos integrados a WMS (*Warehouse Management System*) para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo. Aunque, la formación de los lotes (componente 1) y las rutas (componente 2) son solucionadas de manera integrada y simultánea sus métodos de solución se presentan de manera independiente para facilitar su desarrollo.

A continuación, se representa la estructura empresarial del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo, el cual, incluye las reglas y metaheurísticos a implementar para su solución (Figura 3-2).

**Figura 3-2:** Reglas y metaheurísticos en la conformación de lotes con ruteo en el acomodo.



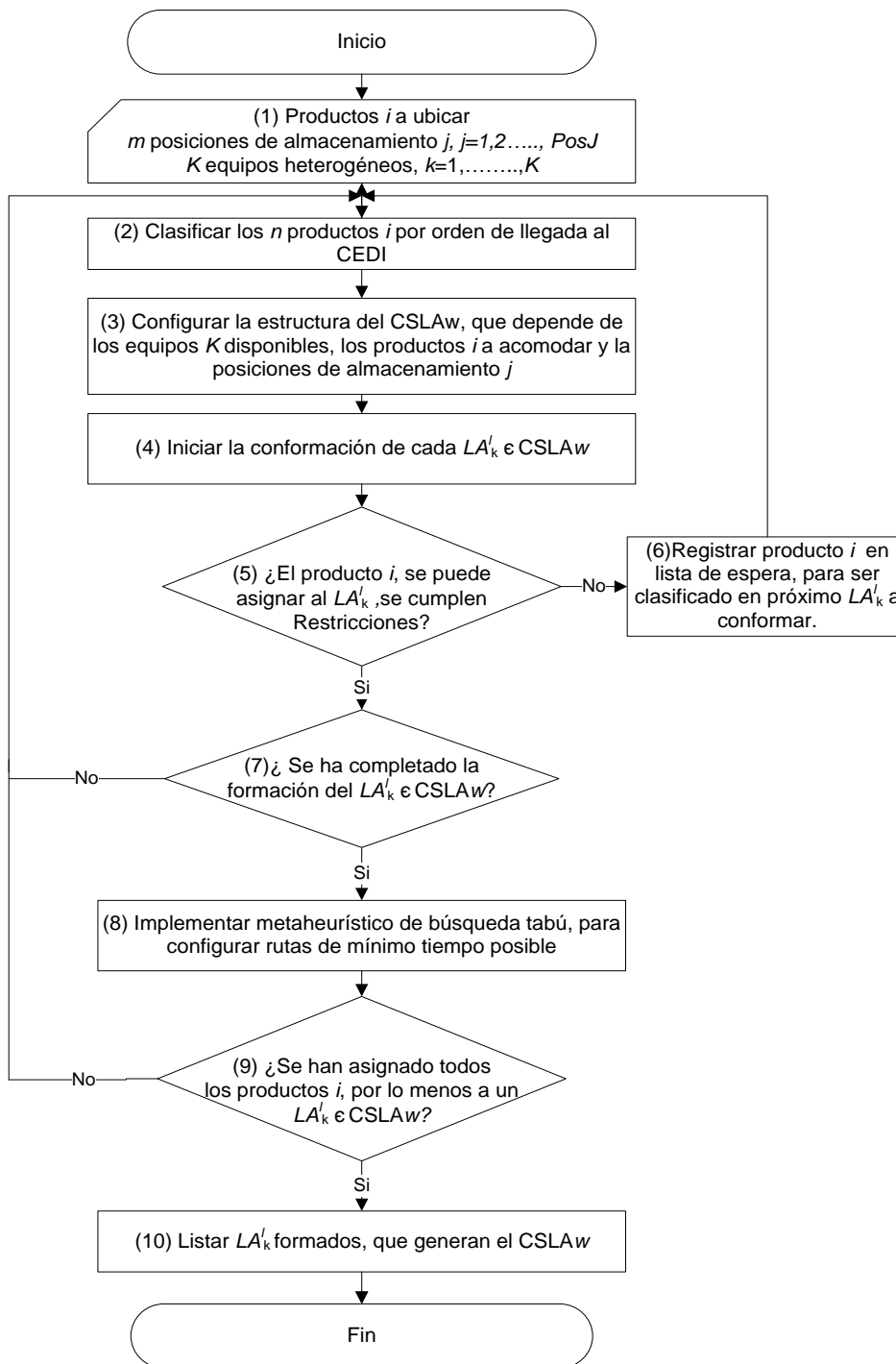
La conformación de lotes(componente 1) puede ser resuelto con una regla de prioridad denominada *FCFS (First Come, First Served)* o un metaheurístico basado en búsqueda en vecindarios inteligentes (*Intelligent Neighborhood Search\_INS*). Adicionalmente, la regla *FCFS* y el metaheurístico *INS* están integrados a un *WMS*, en el cuál se gestiona

información relacionada con las órdenes de recepción, los productos a acomodar, disponibilidad de posiciones de almacenamiento y flota de EMMateriales heterogéneos. Incluso, en el *WMS* se registran los lotes generados y se guía su acomodo en tiempo real. Por su parte, el ruteo en el acomodo (componente 2) puede ser solucionado con una de las siguientes variantes de búsqueda tabú: i) Ruteo de acomodo con búsqueda tabú clásica (RABTCLA), ii) ruteo de acomodo búsqueda tabú 2-Opt Intercambio, iii) ruteo de acomodo búsqueda tabú 2-Opt Inserción, iv) ruteo de acomodo búsqueda tabú 3-Opt Intercambio , v) Ruteo de acomodo búsqueda tabú 3-Opt Inserción y vi) ruteo en el acomodo basado en una matriz de intensificación y frecuencias (RABTIN). Debido a que los componentes del problema en estudio son resueltos de manera integrada y simultánea cada lote formado tiene una ruta asignada, que permite acomodar los  $n$  productos, en las  $m$  posiciones de almacenamiento asignadas. En el anexo A, se describen las funcionalidades del *WMS* que integra las reglas y metaheurísticos descritos para resolver los componentes de este problema.

### 3.3.1 Regla *FCFS* para la generación de lotes de acomodo

La regla *FCFS*, permite formar conjuntos de  $LA^l$  denominados  $CSLA_L$  asignando los productos  $i$  por orden de llegada en la ventana del tiempo programada hasta completar la capacidad de los equipos EMMateriales  $k \in K$  programados. A cada  $LA^l \in CSLA_L$ , se le implementa un metaheurístico de búsqueda tabú para obtener una ruta con  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  que se deben visitar para acomodar los  $n$  productos  $i$ , en el menor tiempo posible. El diagrama de la regla *FCFS* para la conformación de  $LA^l \in CSLA_L$  es presentado en la Figura 3-3.

**Figura 3-3:** Regla de prioridad *FCFS* para la conformación de lotes.



A continuación, se describen algunas de las etapas representadas para la regla *FCFS*, que permite conformar cada  $LA^i \in CSLA_L$  (Tabla 3-1).

**Tabla 3-1:** Regla *FCFS* para la conformación de  $LA' \in CSLA_L$

N°	Descripción
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listar los <math>n</math> productos <math>i</math> a ubicar, incluyendo las <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math> asignadas para su acomodo.</li> <li>• Identificar los <math>k \in K</math> EMMateriales heterogéneos disponibles en el CEDI, que pueden ser programados para conformar cada <math>LA' \in CSLA_L</math>.</li> <li>• Cada equipo <math>k \in K</math> puede tener una capacidad de carga <math>c</math>, un velocidad <math>v</math> y manejo de productos en altura máxima <math>h</math>.</li> </ul>
2	Clasificar los $n$ productos $i$ por orden de llegada al CEDI. La organización puede realizarse por pedido de entrada, o la creación de una lista de acomodo ( <i>putaway list</i> ), que cubra una ventana de tiempo en la programación.
3	Configurar la estructura del conjunto de solución ( $CSLA_L$ ), que consiste en definir la cantidad de $LA'$ , que se conformaran, según la cantidad de equipos $K$ disponible y los productos a acomodar.
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iniciar la conformación del primer <math>LA'</math>, asignando uno de los <math>k \in K</math> equipos disponibles.</li> <li>• Se respeta el orden de clasificación y la estructura establecida en la configuración de <math>CSLA_L</math>.</li> </ul>
5	Asignar cada producto $i$ clasificado al lote $LA' \in CSLA_L$ en conformación, garantizando que se cumplan restricciones como: a) acceso del equipo $k \in K$ asignado a la posición de almacenamiento $j$ (nivel de altura),b) capacidad de carga disponible(cd) del EMMateriales $k \in K$ , entre otras restricciones definidas, en la operación de acomodo.
6	Si el producto $i$ , no se puede asignar al $LA' \in CSLA_L$ , se registra en una lista de pendientes, y se prioriza para el próximo lote a formar.
7	Verificar, si se completa la conformación del $LA' \in CSLA_L$ , al asignar el producto $i$ . En caso, que esta condición no se cumpla, se continúa con el proceso de formación de lote.
8	Implementar un metaheurístico de búsqueda tabú a cada $LA' \in CSLA_L$ conformado, con el fin de generar rutas de mínimo tiempo para acomodar los productos.
9	Verificar si producto $i$ clasificado, se ha asignado a un $LA' \in CSLA_L$
10	Listar los $LA' \in CSLA_L$ conformados. Debe tenerse en cuenta, que el $CSLA_L$ , se convierte en la información de entrada para la programación de la operación de acomodo.

Las etapas descritas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo con la regla *FCFS* (Figura 3-3), se implementan hasta asignar cada uno de los  $n$  productos  $i$  a un  $LA' \in CSLA_L$ . La gestión de la información de la conformación de lotes con ruteo, los productos  $i$ , las posiciones de almacenamiento  $j$ , los EMMateriales  $K$  asignados, se realiza en el *WMS* en tiempo real.

### 3.4 Metaheurístico *INS* para la formación de lotes

En este apartado es desarrollado el metaheurístico *INS*, el cual tiene como objetivo formar conjuntos de lotes de acomodo  $CSLA_L$  del menor tiempo posible. Este metaheurístico *INS* es un enfoque novedoso no detectado en la literatura que estudia los movimientos entre y dentro de lotes, para formar nuevas soluciones. A continuación, se presentan las etapas del metaheurístico *INS*.

- Etapa 1: Clasificar cuales de los EMMateriales heterogéneos  $k \in K$  pueden acomodar los  $n$  productos en las  $m$  posiciones de almacenamiento asignadas.

Se diseña un procedimiento en el WMS, que permite clasificar cuales productos  $i$  pueden ser acomodados por cada EMMateriales  $k \in K$  en las posiciones de almacenamiento  $j$  asignadas. Esta condición es una de las más importantes en el problema, ya que un EMM  $k \in K$  puede ejecutar el acomodo dependiendo de las características de los  $n$  productos a ubicar y el nivel de altura de las posiciones de almacenamiento a visitar. A continuación, se representa la estructura de esta clasificación (Tabla 3-2):

**Tabla 3-2:** Clasificación de EMMateriales  $K$ , productos  $i$  y posiciones de almacenamiento  $j$ .

Producto $i$	Posición $j$	EMM $K$
Producto 1	Pos 1	EM1
	.....	.....
	Pos $j$	EM $k$
Producto 2	Pos 3	EM1
	.....	.....
	Pos $j$	EM $k$
.....	.....	.....
Producto $i$	Pos $j$	EM $k$

- Etapa 2: Generar un conjunto inicial de lotes de acomodo  $CSLA_{L\text{inicial}}$

El conjunto de lotes inicial  $CSLA_{L\text{inicial}}$  es generado con la implementación de la regla de prioridad  $FCFS$  descrita en el apartado 3.3.1. Para conformar el conjunto inicial, se emplea la información de la clasificación de los EMMateriales  $k \in K$ , productos  $i$  y las posiciones de almacenamiento  $j$  desarrollado en la etapa 1 de la presente sección.

La formación del  $CSLA_{L\text{inicial}}$  está basada en una estructura, que contiene  $LA^l$  lotes de acomodo, los  $n$  productos  $i$  a ubicar y  $k \in K$  EMMateriales disponibles (Tabla 3-3). Además, el número de  $LA^l \in CSLA_{L\text{inicial}}$  depende de la cantidad de productos a ubicar o los EMMateriales etiquetados como programables en el CEDI.

**Tabla 3-3:** Estructura de  $LA^l \in CSLA_{L\text{inicial}}$

Lotes $LA^l$ y EMM $k$		Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto $i$	Cd	Cu
$LA^1$	EMM $k$	$P11$	$P12$	$P13$	$P1i$	$Cd_1$	$Cu_1$
$LA^2$	EMM $k$	$P21$	$P22$	$P23$	$P2i$	$Cd_2$	$Cu_2$
$LA^3$	EMM $k$	$P31$	$P32$	$P33$	$P3i$	$Cd_3$	$Cu_3$
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$LA^l$	EMM $k$	$PI1$	$PI2$	$PI3$	$PIi$	$Cd_l$	$Cu_l$

Nota: Cd(capacidad disponible) y Cu (capacidad utilizada) de los EMMateriales asignados a  $LA^l \in CSLA_{L\text{inicial}}$ .



Una vez la estructura es diseñada, se comienza la conformación de los  $LA^l \in CSLA_{L_{inicial}}$ . Los productos son asignados a cada  $LA^l \in CSLA_{L_{inicial}}$  en el orden establecido por la regla FCFS (etapa 1). La conformación de un lote es completado cuando su capacidad de carga disponible es asignada y se verifica el cumplimiento de sus restricciones. Por esta razón, cada vez que un producto es asignado a un  $LA^l \in CSLA_{L_{inicial}}$ , se evalúa si la capacidad de carga utilizada es menor o igual a la disponible. Adicionalmente, se comprueba que un producto  $i$  pueda ser programado en el lote según las características del EM Materiales  $k \in K$  y la posición de almacenamiento  $j$  asignada.

Una vez, se forman cada uno de los  $LA^l \in CSLA_{L_{inicial}}$  se les implementa una de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, con el fin de configurar rutas de mínimo tiempo total para la operación. A continuación, se representa la estructura que relaciona los lotes con ruteo en el acomodo.

**Tabla 3-4:** Estructura conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

$LA^l \in CSLA_L$						Tiempo de la ruta asociada a un $LA^l$
$LA^1$	EMk	Productos	P <sup>1</sup> 1	P <sup>1</sup> 2		$s^1 = t LA^1$
		Ruta $s^1_w$	Pos1	Pos 8		
$LA^2$	EMk	Productos			P <sup>2</sup> 3	$s^2 = t LA^2$
		Ruta $s^2_w$			Pos 9	
.....	.....		.....	.....	.....	.....
$LA^l$	EMk	Productos	P <sup>l</sup> 1	P <sup>l</sup> 2	P <sup>l</sup> j	$s^l = t LA^l$
		Ruta $s^l_w$	Pos j	Pos j	Pos j	

Nota. P<sup>l</sup><sub>i</sub>: Producto  $i$  asignado al lote  $LA^l$  y su ruta  $s^l_w$

Una vez son calculados los tiempos de las rutas de acomodo ( $tLA^l$ ) integrados a  $LA^l \in CSLA_L$ , estos se suman para medir el tiempo el tiempo total de la operación utilizando la siguiente ecuación:

$$T_{Ltotalinicial} = \sum_{l=1}^l \sum_{k=1}^k tLA^l \tag{3.9}$$

$T_{Ltotalinicial}$  es usado como solución semilla en la primera iteración del metaheurístico INS. De esta manera, se demuestra que la conformación de lotes con ruteo, se modelan de

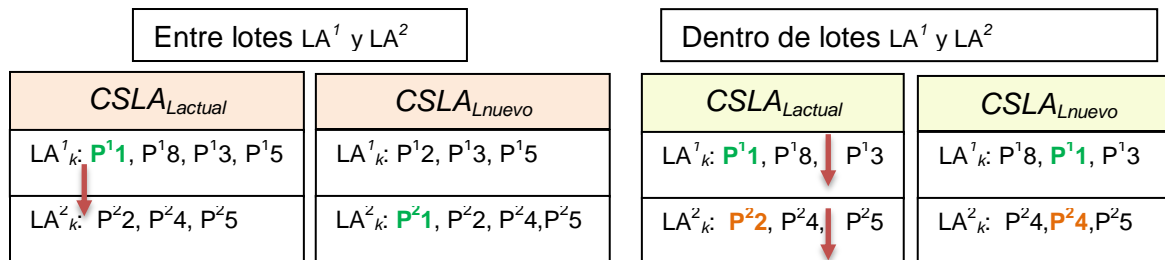
una forma integrada. En la sección 3.5, se modelan detalladamente los metaheurísticos para resolver el componente de ruteo en el acomodo.

- Etapa 3: Generar nuevos conjuntos de lotes  $CSLA_{Lnuevo}$  y movimientos en el metaheurístico *INS*.

Para formar nuevos  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$ , se implementan movimientos factibles de productos  $i$  y posiciones de almacenamiento  $j$  entre y dentro de lotes  $LA^l \in CSLA_{Lactual (inicial)}$ , los cuales son creados por el metaheurístico *INS*. A continuación, se describen las características de los dos grupos de movimientos, que se ejecutan en el metaheurístico *INS* de manera secuencial e integrada.

-Grupo 1: Movimientos de inserción de productos  $i$  entre y dentro de  $LA^l \in CSLA_L$  (Figura 3-4). El movimiento del producto  $i$  a implementar, se elige al azar con método de selección programado en el metaheurístico *INS*.

**Figura 3-4:** Movimientos de productos  $i$  entre y dentro  $LA^l$  para generar un  $CSLA_{Lnuevo}$ .



-Grupo 2: Una vez, se forman los nuevos lotes  $LA^l \in CSLA_{Lnueva}$  con el grupo de movimientos uno, se implementa el grupo de movimientos dos, que consiste en intercambiar posiciones de almacenamiento  $j$  dentro de cada lote. Con este enfoque, no sólo se generan nuevos lotes  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$ , sino que también se obtienen sus rutas integradas  $s^l_w \in CRS_w$ , las cuales buscan acomodar los  $n$  productos  $i$ , en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  asignadas, en el menor tiempo posible. Por lo tanto, para ejecutar el grupo de movimientos dos, se implementa uno de los metaheurísticos de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, que se desarrollan en la sección 3.5.

Luego de medir los tiempos de las rutas ( $tLA^l$ )  $s^l_w \in LA^l_{nueva}$ , se calcula el tiempo total del  $CSLA_{Lnuevo}$  por medio de la siguiente ecuación:

$$T_{Ltotalnuevo} = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K t LA^l \quad (3.10)$$

Debe tenerse en cuenta, que para medir el tiempo de acomodo ( $tLA^l$ ) de cada  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$ , se utiliza el grupo de funciones objetivo del metaheurístico de ruteo seleccionado para resolver este componente, los cuales se modelan en la sección 3.5.

Una vez los  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$  son conformados, las siguientes condiciones deben ser evaluadas:

- La capacidad utilizada (cu) de un EMMateriales  $k \in K$  asignado a un  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$  es menor o igual que su capacidad de carga disponible (cd).
- El EMMateriales  $k \in K$  programado a un  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$  debe tener la capacidad de ejecutar movimientos horizontales y verticales para acomodar los  $n$  productos  $i$  en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ .
- Cada unidad del producto  $i$  es asignado únicamente a un a  $LA^l \in CSLA_{Lnuevo}$  para evitar duplicaciones y soluciones no factibles.

• Etapa 4: Analizar si  $T_{Lnuevototal} \in CSLA_{Lnuevo}$  es mejor que  $T_{Lmejor} \in CSLA_{Lmejor}$

Si  $T_{Lnuevototal} \in CSLA_{Lnuevo}$  es menor que  $T_{Lmejor} \in CSLA_{Lmejor}$  entonces el conjunto  $CSLA_{Lnuevo}$  es establecido como la mejor solución para el problema de conformación de lotes con ruteo ( $CSLA_{Lnuevo} = CSLA_{Lmejor}$ ). En la primera iteración del metaheurístico *INS*  $T_{Ltotalinicial} \in CSLA_{Linicial}$  corresponde a  $T_{Lmejor} \in CSLA_{Lmejor}$ . La evaluación descrita en esta etapa es realizada en cada iteración del metaheurístico *INS*.

• Etapa 5: Evaluar las condiciones de terminación

El metaheurístico *INS* finaliza su ejecución hasta que alguno de los siguientes criterios de terminación se cumple. Los criterios establecidos son: i) el límite de iteraciones es alcanzado, ii) todos los movimientos entre y dentro de los lotes  $LA^l \in CSLA_{Lactual}$  son ejecutados o iii) el tiempo de procesamiento computacional es excedido.

### 3.5 Variantes de metaheurístico de búsqueda tabú para el ruteo integrado a la conformación de lotes en el acomodo

El componente de ruteo integrado a la conformación de lotes de mínimo tiempo, se resuelve con alguno de los siguientes enfoques del metaheurísticos de búsqueda tabú: i) Clásico (*RABTCLA\_Ruteo de acomodo con búsqueda tabú Clásico*), ii) híbrido con una estrategia de intensificación y matriz de frecuencia (*RABTIN\_Ruteo de acomodo con búsqueda tabú con matriz de intensificación y frecuencias*) y iii) metaheurísticos híbridos con estrategias de diversificación RABTDI (*Ruteo de acomodo búsqueda tabú con diversificación*). Dentro de los metaheurísticos híbridos RABTDI, se desarrollan cuatro variantes denominadas RABTDI 2-Opt Inserción e Intercambio y RABTDI 3-Opt Intercambio e Inserción. Los metaheurísticos híbridos RABTIN y RABTDI implementan estrategias de intensificación y diversificación, que buscan acelerar la convergencia a la obtención de tiempos mínimos de acomodo y mejorar la eficiencia computacional respecto al *RABTCLA*.

#### 3.5.1 Metaheurístico de búsqueda tabú clásico para el ruteo en el acomodo (RABTCLA)

Las siguientes etapas son implementadas para resolver el componente de ruteo en el acomodo usando el RABTCLA.

- Etapa 1: Configurar un conjunto inicial de rutas ( $CRS_{w_{inicial}}$ )

Un conjunto inicial de rutas  $CRS_{w_{inicial}} \in CSLA_L$  es generado implementando una regla de prioridad denominada *FLNL (Farthest Location, Nearest Location)*. Con esta regla cada ruta  $s_w^l \in CRS_{w_{inicial}}$  es configurada comenzando desde la posición más lejana a la más cercana al *depot*. A continuación, se representa la estructura del conjunto inicial:

$$CRS_{w_{inicial}} = \begin{cases} s_w^1 = \{Pos\ 0, Pos1, Pos12\dots\dots, Pose\dots, Pos0\} & s_w^1 \in N(CRS_w)^a \\ s_w^2 = \{Pos\ 0, Pos2, Pos13\dots\dots, Pose\dots, Pos0\} & s_w^2 \in N(CRS_w) \\ \dots\dots\dots \\ s_w^l = \{Pos\ 0, Pos3, Pos15\dots\dots, Pose\dots, Pos0\} & s_w^l \in N(CRS_w) \end{cases}$$

<sup>a</sup>Nota:  $N(CRS_w)$  es el vecindario de búsqueda, el cual, se conforma de las rutas  $s_w^l$

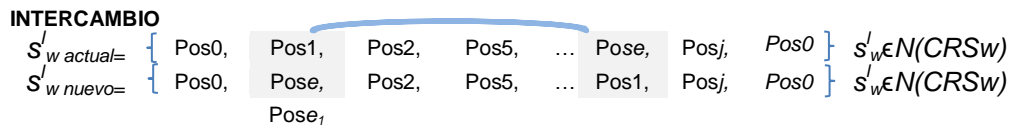
El conjunto inicial de rutas  $CRSw_{inicial}$  será utilizado como solución actual ( $CRSw_{actual}$ ) y la mejor solución ( $CRSw_{mejor}$ ) del problema en la primera iteración del RABTCLA.

- Etapa 2: Crear un nuevo conjunto de rutas  $CRSw_{nuevo}$

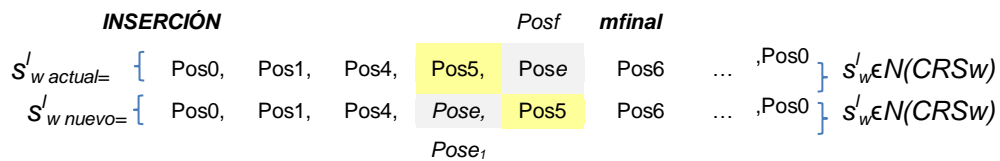
Movimientos de intercambio e inserción son ejecutados sobre las rutas  $s^l \in CRSw_{actual}$  (o inicial) para generar un nuevo conjunto de rutas  $s^l_w \in CRSw_{nuevo}$ . El movimiento a implementar es seleccionado sino no está registrado en la lista tabú o cumple con el criterio de aspiración que se establece en la etapa 3. Adicionalmente, los movimientos dependen de un tamaño de desplazamiento ( $tm$ ), que determina cuantos lugares debe desplazarse una posición de almacenamiento  $j$  para ser insertada o intercambiada en una ruta actual  $s^l_w \in CRSw$ , para generar una nueva ruta  $s^l_{w nueva} \in CRS_{nueva}$ .

En un movimiento de intercambio, una posición de almacenamiento es intercambiada por otra (Figura 3-5), mientras que en movimiento de inserción la posición es insertada en un nuevo lugar de la ruta seleccionada  $s^l_w \in CRSw$  (Figura 3-6).

**Figura 3-5:** Movimiento de intercambio RABTCLA



**Figura 3-6:** Movimiento de inserción RABTCLA



Los movimientos implementados son registrados en la lista tabú. Por lo tanto, esos movimientos son prohibidos durante un número de iteraciones (*tabu tenure*). De otra parte, para medir el tiempo de cada ruta  $f(s^l_{w nuevo}) \in CRSw_{nuevo}$  estas se evalúan en un grupo de funciones objetivo(etapa 4), según el tipo de movimiento ejecutado. Una vez, se calcula el tiempo de cada ruta, se procede a medir el tiempo total del conjunto  $CRSw_{nuevo}$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$T_{wnuevototal} = \sum_{l=1}^L f(s^l_{wnuevo}) \in CRSw_{nuevo} \quad (3.11)$$

• Etapa 3: Criterio de aspiración

El criterio de aspiración permite ejecutar un movimiento registrado en la lista tabú, si este produce una ruta  $s'_w \in CRSw_{nuevo}$  de menor tiempo total, que la solución actual. Por este motivo, el estado de movimiento tabú es eliminado y este puede ser implementado (Kulak *et al.*, 2012).

• Etapa 4: Calculo de las funciones objetivo  $f(s'_w) \in CRSw$

Dos grupos de funciones objetivo son representadas y calculadas para los movimientos de inserción e intercambio, respectivamente. De esta manera, se mide el tiempo total de acomodo de las nuevas rutas  $s'_w \in CRSw_{nuevo}$  (Figura 3-7).

**Figura 3-7:** Grupo de funciones objetivo para los movimientos de intercambio e inserción en el RABTCLA

$f(s'_w \text{ nueva}) = f(s'_w \text{ actual}) + (\Delta T_{\text{inserción}} \text{ o } \Delta T_{\text{intercambio}}) \quad f(s'_w) \in CRSw$

	Tiempo de ruta $f(s'_w) \in CRSw$	Variación de tiempo $\Delta T_{\text{inserción}} \text{ o } \Delta T_{\text{intercambio}}$
$f(s_w^1) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^1_k} \cdot d^1_{ef} \cdot Y_k^1$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^1_k \cdot X^1_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{\text{intercambio}}$ $\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$
		Variación de tiempo $\Delta T_{\text{inserción}}$ $\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$
$f(s_w^2) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^2_k} \cdot d^2_{ef} \cdot Y_k^2$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^2_k \cdot X^2_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{\text{intercambio}}$ $\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$
		Variación de tiempo $\Delta T_{\text{inserción}}$ $\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$
$f(s_w^l) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^l_k} \cdot d^l_{ef} \cdot Y_k^l$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^l_k \cdot X^l_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{\text{intercambio}}$ $\left(\frac{1}{V^l_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$
		Variación de tiempo $\Delta T_{\text{inserción}}$ $\left(\frac{1}{V^l_k}\right) (d(\text{Pos}_{(e1,e1-tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm)}) + d(\text{Pos}_{(e,e+tm+2)}) - d(\text{Pos}_{(e,e+1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1-1)}) - d(\text{Pos}_{(e1,e1+1)}))$

Nota: En caso que la primera posición adyacente a la Pos<sub>0</sub>, se eliga para implementar el RABTCLA Inserción, los términos  $d(\text{Pos}_{(e-1,e+1)})$  y  $d(\text{Pos}_{(e,e-1)})$  del  $\Delta T_{\text{inserción}}$  no se modelan.

Las diferencias de tiempos entre los grupos de funciones objetivo en el RABTCLA son representadas por medio de sus variaciones de tiempo  $\Delta T_{\text{inserción}}$  y  $\Delta T_{\text{intercambio}}$ . Las

variaciones de tiempo no solo establecen la estructura de los movimientos, sino que permiten medir si el tiempo de las rutas  $f(s'_w) \in CRS_{w_{nuevo}}$  disminuyen o incrementan el tiempo total del acomodo. Por lo tanto, un  $\Delta\tau$  (negativo) significa una disminución en el tiempo de acomodo de una  $s'_w \in CRS_{w_{nuevo}}$  mientras un  $\Delta\tau$  (positivo) muestra un incremento.

- Etapa 4: Evaluar si  $T_{w_{nuevototal}} \in CSLA_{L_{nuevo}}$  es mejor que  $T_{w_{mejor}} \in CSLA_{L_{mejor}}$

Si  $T_{w_{nuevototal}} \in CSLA_{L_{nuevo}}$  es menor que  $T_{w_{mejor}} \in CSLA_{L_{mejor}}$  entonces el conjunto  $CSLA_{L_{nuevo}}$  es establecido como la mejor solución para el problema de conformación de lotes con ruteo ( $CSLA_{L_{nuevo}} = CSLA_{L_{mejor}}$ ). Esta comparación es realizada para cada iteración del metaheurístico RABTCLA.

- Etapa 5: Evaluar las condiciones de terminación

El metaheurístico RABTCLA termina su ejecución hasta que alguno de los criterios de terminación se satisface. Los criterios son: i) el límite de iteraciones es alcanzado, ii) se alcanza el tiempo total de acomodo establecido o iii) el tiempo de procesamiento computacional es excedido.

### 3.5.2 Híbridos de metaheurístico de búsqueda tabú 2-Opt intercambio e inserción, en el ruteo del acomodo.

En esta apartado, se desarrollan dos híbridos de un metaheurístico tabú denominados ruteo de acomodo búsqueda tabú RABTDI 2-Opt Intercambio y RABTDI 2-Opt Inserción. La diferencia entre ambos híbridos, se presentan en la estructura de sus movimientos y los grupos de funciones objetivo. A continuación, se desarrollan las cinco etapas que permiten implementar los híbridos del metaheurístico de búsqueda tabú:

- Etapa 1: Conjunto inicial de rutas de acomodo  $s'_w \in CRS_{w_{inicial}}$

El conjunto inicial de rutas  $CRS_{w_{inicial}}$  corresponde a la mejor solución obtenida de la implementación del RUBTCLA, en el apartado 3.5.1. Este enfoque es establecido para aumentar la calidad de las soluciones y mejorar la eficiencia computacional en la resolución de este componente de ruteo. La estructura del conjunto de rutas iniciales  $CRS_{w_{inicial}}$  es igual al presentado en la etapa 1 del apartado 3.5.1.

- Etapa 2: Identificar pares de posiciones de almacenamiento para el RABTDI 2-Opt Intercambio y RABTDI 2-Opt Inserción.

En esta etapa, pares de posiciones de almacenamiento ( $F = \{Pos_e, Pos_f\}$ ) son identificadas y registradas en el *WMS*. Estos pares de posiciones pueden ser implementados como movimientos de intercambio o inserción en el RABTDI 2-Opt.

- Etapa 3: Seleccionar un par de posiciones de almacenamiento  $F$  e implementarlo en uno de los RABTDI 2-Opt.

Un par de posiciones de almacenamiento  $F$  es seleccionado, con el fin de implementar el RABTDI 2-Opt Inserción o RABTDI 2-Opt Intercambio. A continuación, se presentan los movimientos de intercambio e inserción asociados a los metaheurísticos híbridos en desarrollo:

-RABTDI 2-Opt Intercambio: Un par de posiciones de almacenamiento ( $F = \{Pos_e, Pos_f\}$ ) es intercambiado con otro par  $F_1$  ( $F_1 = \{Pos_{e_1}, Pos_{f_1}\}$ ) en una ruta  $s'_w \in CRSW_{actual}$ . De esta manera, son generadas las nuevas rutas  $s'_w \in CRSW_{nuevo}$  (Figura 3-8). Los intercambios son ejecutados hasta que un número de interacciones es alcanzado o el total de movimientos identificados son implementados.

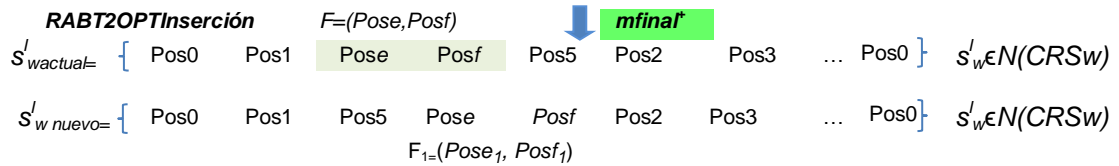
**Figura 3-8:** Representación de movimientos RABTDI 2-Opt Intercambio



-RABTDI 2-Opt Inserción: Un par de posiciones de almacenamiento  $F$  ( $F = \{Pos_e, Pos_f\}$ ) es insertado en nuevo lugar denominado punto de inserción en una ruta  $s'_w \in CRSW_{actual}$ . De esta manera, las nuevas rutas  $s'_w \in CRSW_{nuevo}$  son generadas (Figura 3-9). Los movimientos de inserción son implementados hasta alcanzar el número de iteraciones planeadas o los movimientos detectados son ejecutados.



**Figura 3-9:** Representación de movimientos RABTDI 2-Opt Inserción



\* Nota. *mfinal* es la posición de almacenamiento adyacente al punto de inserción, el cual está representado con una fecha.

Los movimientos de inserción e intercambio ejecutados son registrados en una lista tabu, por lo cual, se restringen durante esas iteraciones (*tabu ternure*). Adicionalmente, los movimientos de intercambio e inserción en los RABTDI dependen de un tamaño de movimiento (*tm*) genérico, el cual fue descrito en la etapa 3, apartado 3.5.1.

Para calcular el tiempo de cada ruta  $f(s_w^l nueva) \in CRSW_{nueva}$ , en el acomodo, estas se evalúan en un grupo de funciones objetivo según el RABTDI 2-Opt implementado (etapa 4). Una vez, se mide el tiempo de cada ruta nueva, se calcula el tiempo total del  $CRSW_{nuevo}$  por medio de la siguiente ecuación:

$$T_{wnuevototal} = \sum_{r=1}^R f(s_w^l nueva) \in CRSW_{nuevo} \quad (3.12)$$

$T_{W_{inicialtotal}}$  corresponde a  $T_{W_{actualtotal}}$  ( $T_{W_{mejor}}$ ) en la primera iteración de los metaheurísticos híbridos RABTDI 2-Opt Inserción o RABTDI 2-Opt Intercambio.

• Etapa 4 : Grupo de funciones objetivo

Grupos de funciones objetivo son formuladas específicamente para cada enfoque: i) RABTDI 2-Opt Intercambio y ii) RABTDI 2-Opt Intercambio. Las nuevas rutas  $s_w^l \in CRS_{nuevo}$  son evaluadas en el respectivo grupo de funciones objetivo para cuantificar el tiempo de la operación de acomodo como fue descrito en la etapa 3. A continuación, se representan los grupos de funciones objetivo, incluyendo las variaciones de tiempo ( $\Delta T$ ), que permiten medir el impacto del movimiento implementado, en el tiempo promedio total de acomodo (Figura 3-10).

**Figura 3-10:** Grupos de funciones objetivo para RABTDI 2-Opt Intercambio e RABTDI 2-Opt Inserción.

$$f(s_w^l) = f(s_w^{actual}) + (\Delta T_{2OPTintercambio} \text{ o } \Delta T_{2OPTinserción}) \quad f(s_w^l) \in CRSW$$

Tiempo total de ruta $f(s_w^{nueva}) \in CRSW$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$ or $\Delta T_{inserción}$
$f(s_w^1) = \sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V_k^1} \cdot d_{ef}^1 \cdot Y_k^1 + \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y_k^1 \cdot X_i^1$	<p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTintercambio}^C</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^1}\right) (d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) + d(Pos_{(e,e+1+tm)}) + d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) - d(Pos_{(f1,f1+1)}))$ <p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTinserción}</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^1}\right) (d(Pos_{(e-1,f+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) + d(Pos_{(f,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$
$f(s_w^2) = \sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V_k^2} \cdot d_{ef}^2 \cdot Y_k^2 + \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y_k^2 \cdot X_i^2$	<p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTintercambio}</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^2}\right) (d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) + d(Pos_{(e,e+1+tm)}) + d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) - d(Pos_{(f1,f1+1)}))$ <p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTinserción}</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^2}\right) (d(Pos_{(e-1,f+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) + d(Pos_{(f,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$
<p>.....</p>	<p>.....</p>
$f(s_w^l) = \sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V_k^l} \cdot d_{ef}^l \cdot Y_k^l + \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y_k^l \cdot X_i^l$	<p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTintercambio}</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^l}\right) (d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) + d(Pos_{(e,e+1+tm)}) + d(Pos_{(f1,f1-tm-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) - d(Pos_{(f1,f1+1)}))$ <p>Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTinserción}</math></p> $\left(\frac{1}{V_k^l}\right) (d(Pos_{(e-1,f+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) + d(Pos_{(f,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(f,f+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$

Nota<sup>1</sup>:  $tm$  corresponde al tamaño de movimiento descrito en la etapa 2, apartado 3.5.1.

Nota<sup>2</sup>: En caso que la primera posición adyacente a la  $Pos_0$ , sea parte del grupo de posiciones a insertar los siguientes términos no se incluyen en la variación del tiempo:  $d(Pos_{(e-1,f+1)})$  y  $d(Pos_{(e,e-1)})$ .

En cada iteración, el valor  $\Delta T$  ( $\Delta T_{2OPTintercambio}$  o  $\Delta T_{2OPTinserción}$ ) es medido por medio del grupo de funciones objetivo, para analizar el impacto de un movimiento implementado en el RABTDI 2-Opt Inserción o Intercambio sobre el tiempo total de acomodo de un conjunto  $CRSW_{nuevo}$ . Un  $\Delta T$ (negativo) indica que el tiempo total de la operación, se disminuye. Por lo contrario, un  $\Delta T$ (positivo) muestra que el tiempo total del  $CRSW_{nuevo}$  se aumenta. Por lo tanto, el valor  $\Delta T$  es utilizado para medir la calidad de las soluciones y las variaciones de tiempo, que se obtienen de los movimientos implementados por RABTDI 2-Opt Intercambio e Inserción.

- Etapa 4: Analizar si  $T_{w_{nuevototal}} \in CSLA_{L_{nuevo}}$  es mejor que  $T_{w_{mejor}} \in CSLA_{L_{mejor}}$



• Etapa 3: Configurar matriz de frecuencias

La matriz de frecuencias a diseñar se basa en la estructura de rutas configurada (Tabla 3-5). De otra parte, el objetivo de la matriz es facilitar la medición del porcentaje y la cantidad de veces ( $C_{jt}$ ) que una posición de almacenamiento  $j$  perteneciente a una ruta  $s'_{nw} \in CRSw$  está ubicada en una columna  $t \in T$ . La siguiente Tabla 3-6 representa la estructura para registrar el resultado del conteo  $C_{jt}$  para cada posición de almacenamiento  $j$ .

**Tabla 3-6:** Estructura para registrar conteo  $C_{jt}$  en las rutas de acomodo.

Ct	Pos 0	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	.....	Pos j	
C0	C <sub>00</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>20</sub>	C <sub>30</sub>	C <sub>40</sub>	.....	C <sub>j0</sub>	$\sum_{j=1}^J C_{j0}$
C1	C <sub>01</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>41</sub>	.....	C <sub>j1</sub>	$\sum_{j=1}^J C_{j1}$
C2	C <sub>02</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>32</sub>	C <sub>42</sub>	.....	C <sub>j2</sub>	$\sum_{j=1}^J C_{j2}$
C3	C <sub>03</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>43</sub>	.....	C <sub>j3</sub>	$\sum_{j=1}^J C_{j3}$
Ct	C <sub>0t</sub>	C <sub>1t</sub>	C <sub>2t</sub>	C <sub>3t</sub>	C <sub>4t</sub>	.....	C <sub>jt</sub>	$\sum_{j=1}^J C_{jt}$
Truta	$\sum_{t=1}^T C_{0t}$	$\sum_{t=1}^T C_{1t}$	$\sum_{t=1}^T C_{2t}$	$\sum_{t=1}^T C_{3t}$	$\sum_{t=1}^T C_{4t}$	.....	$\sum_{t=1}^T C_{jt}$	

La validez de la estructura elaborada es verificada por medio de la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=1}^T C_{0t} = \sum_{t=1}^T C_{1t} = \dots = \sum_{t=1}^T C_{jt} \tag{3.13}$$

Con la ecuación 3.13, se verifica que las longitudes de las  $n$  rutas  $s'_{nw} \in CRSw$  sean iguales. Si esta condición no se cumple, la estructura de las rutas (Tabla 3-5) debe ser recalculada.

Una vez el conteo ( $C_{jt}$ ) es realizado, el porcentaje (%) de frecuencias es medido por medio de la siguiente expresión:

$$f_{jt} = \frac{\text{CountPos } j \text{ on } Ct(C_{jt})}{\text{Lroute}} = \frac{\sum_{j=1}^J C_{jt}}{\text{Lroute}} \quad j \forall J = 1, 2, \dots, \text{Posmfinal}(J) \tag{3.14}$$

A continuación, los términos de la ecuación 3.4 son descritos:

- $f_{jt}$ : Porcentaje (%) frecuencia que una posición de almacenamiento ( $j=1,2,\dots,Posmfinal(J)$ ) está localizado en una columna  $Ct$  ( $t=1,2,\dots,T$ ) en una ruta de acomodo  $s'_{wi} \in CRS_w$ .

- $Count\ PosjenCt(Cjt)$ : Cantidad de veces que una posición de almacenamiento  $j \in J$  está ubicada en una columna  $Ct$  ( $t=1,2,\dots,T$ ) en una ruta de acomodo  $s'_{wi} \in CRS_w$ . El total de veces  $Cjt$  es calculado por medio de la siguiente ecuación.

$$\sum_{j=1}^J Cjt \quad \forall j = 1, 2, \dots, Posmfinal(J) \quad (3.15)$$

- $Lroute$ : Longitud de las rutas de acomodo  $s'_{nr} \in CRS_w$ .

Los porcentajes de frecuencia  $f_{jt}$  calculados en cada ruta  $s'_{nr} \in CRS_w$  son registrados en la siguiente matriz de frecuencias (Tabla 3-7):

**Tabla 3-7:** Matriz de frecuencias  $f_{jt}$  para las  $n_r$  rutas de acomodo  $s'_{nr} \in CRS_w$

	Pos $j \in s'_{nr} \in LA' \in CSLA_L$					
Ct	Pos 0	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos j	Pos mfinal(j)
C0	$f_{00}$	$f_{10}$	$f_{20}$	$f_{30}$	....	$f_{Posmfinal(i)0}$
C1	$f_{01}$	$f_{11}$	$f_{21}$	$f_{31}$	....	$f_{Posmfinal(i)1}$
C2	$f_{02}$	$f_{12}$	$f_{22}$	$f_{32}$	....	$f_{Posmfinal(i)2}$
C3	$f_{03}$	$f_{13}$	$f_{23}$	$f_{33}$	....	$f_{Posmfinal(i)3}$
C4	$f_{04}$	$f_{14}$	$f_{24}$	$f_{34}$	....	$f_{Posmfinal(i)4}$
Ct	$f_{0t}$	$f_{1t}$	$f_{2t}$	$f_{3t}$	....	$f_{Posmfinal(i)t}$
% $f_{i\_total}$	$\sum_{t=1}^T f_{0t} = 100\%$	$\sum_{t=1}^T f_{01t} = 100\%$	$\sum_{t=1}^T f_{2t} = 100\%$	$\sum_{t=1}^T f_{3t} = 100\%$	$\sum_{t=1}^T f_{jt} = 100\%$	$\sum_{t=1}^T f_{Posmfinal(i)t} = 100\%$

La validez de la matriz de frecuencias es verificada por medio de la siguiente ecuación:

$$\sum_{t=1}^T f_{jt} = 100\% \quad (3.16)$$

De esta manera, se verifica que la suma de las frecuencias de cada posición de almacenamiento  $j \in J$  en una columna  $Ct$  ( $f_{jt}$ ) sea del 100%. Si esta condición no se cumple, se debe recalcular la matriz de frecuencias hasta que la condición se cumpla.

Etapa 4: Establecer criterio de frecuencia ( $fm$ )

Las posiciones de almacenamiento  $j$  que tengan una frecuencia  $f_{jt}$  igual o mayor a una frecuencia meta ( $f_m$ ) se establecen como fijas en la implementación del RABTIN. De esta manera, se configuran estructuras de rutas con posiciones de almacenamiento  $j$  fijas, que buscan acelerar la convergencia del RABTIN para generar nuevos  $CRS_w$  de mínimo tiempo posible con una adecuada eficiencia computacional. Debe resaltarse, que las posiciones  $j$  fijadas en la estructura son aquellas que permitieron obtener las rutas  $s'_{nw} \in CRS_w$  de menor tiempo promedio total, en el acomodo. Con este enfoque, se pretende intensificar la exploración de los vecindarios  $N(CRS_w)$  en las estructuras configuradas, intercambiando únicamente las posiciones de almacenamiento  $j$  que no cumplieron con la  $f_m$ , ya que su ubicación en las columnas  $t \in T$  de las  $n$  rutas evaluadas no produjeron los menores tiempos para la operación.

Debe tenerse en cuenta, que las posiciones de almacenamiento 0 y  $P_{mfinal}$  son fijadas en la implementación del metaheurístico RABTIN, ya que las rutas deben comenzar y finalizar en un mismo lugar del CEDI denominado *Depot*.

- Etapa 5: Implementación de metaheurístico para generar nuevas rutas  $s'_w \in CRS_{w_{nueva}}$ .

Para crear nuevas rutas  $s'_{w_{nueva}} \in CRS_{w_{nueva}}$ , se implementan las siguientes actividades:

- Las posiciones de almacenamiento  $j \in J$  que satisfacen el criterio ( $f_{jt} \geq f_m$ ) en las  $n_r$  rutas de acomodo  $s'_{nw} \in CRS_w$  son fijadas durante la ejecución del RABTIN.

- Las posiciones de almacenamiento  $j \in J$  establecidas como intercambiables (*swap*) ( $f_{jt} \leq f_m$ ) son listadas y registradas en el *WMS*.

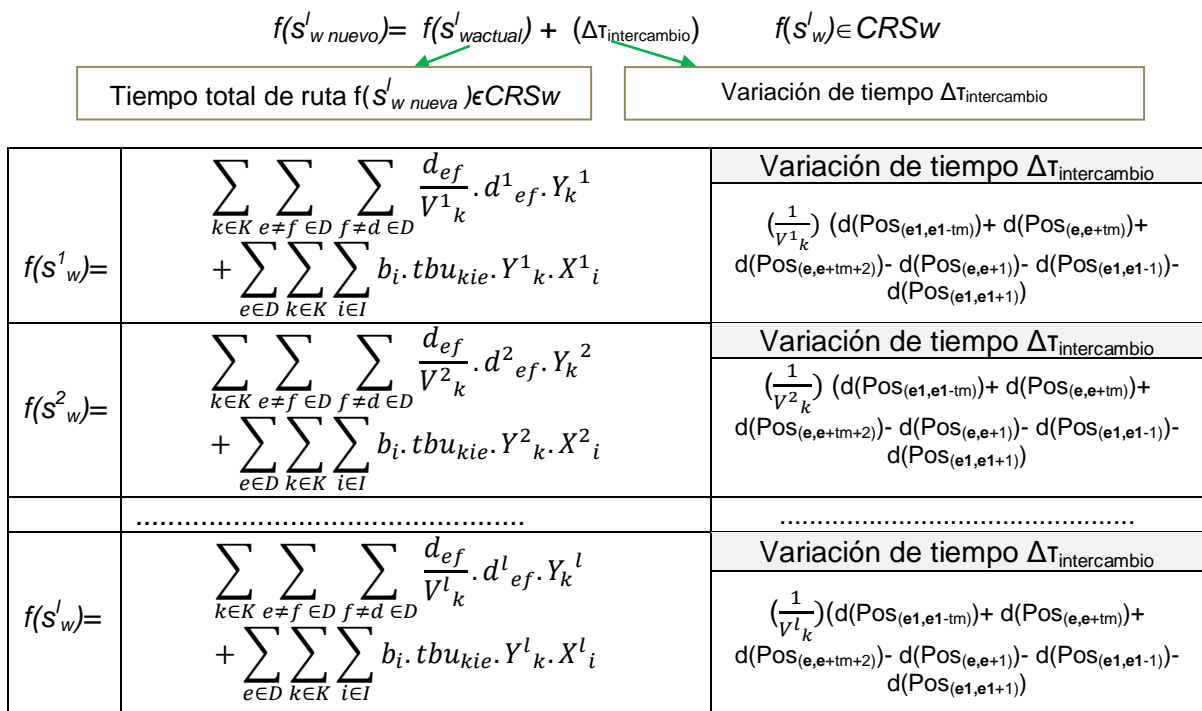
- Los movimientos de intercambio (*Swap*) son implementados a través del metaheurístico RABTCLA descrito en el apartado 3.5.1. La única diferencia es que las posiciones del almacenamiento  $j$  establecidas como fijas no pueden ser intercambiadas bajo ninguna condición. Inclusive, en el RABTCLA no puede ser aplicado para esas posiciones de almacenamiento  $j$ .

- Las nuevas rutas  $s'_w \in CRS_{w_{nuevo}}$  son registrados en el *WMS*.

- Etapa 6: Formulación de grupos de funciones objetivo

El siguiente grupo de funciones objetivo son formuladas para el RABTIN, con el fin de medir el tiempo de las nuevas rutas  $s'_w \in CRS_{w_{nuevo}}$  (Figura 3-11):

**Figura 3-11:** Grupo de funciones objetivos para RABTIN.



Las diferencias de tiempo generados por los movimientos de intercambio con el RABTIN son medidos por las variaciones de tiempo  $\Delta T_{intercambio}$ , en las funciones objetivo representadas. Un  $\Delta T$  (negativo) indica una reducción en el tiempo de acomodo de una  $s^l_w \in CRS_{w\ nueva}$  mientras un  $\Delta T$  (positivo) representa su aumento, lo que genera soluciones de menor calidad.

Una vez las  $f(s^l_{w\ nueva}) \in CRS_{w\ nueva}$  son evaluadas en las funciones objetivo, el tiempo total de acomodo es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$T_{w\ total} = \sum_{l \in W} f(s^l_{w\ nuevo}) \quad \forall s^l_w \in CRS_{w\ nuevo} \quad (3.17)$$

• Etapa 7: Evaluar si  $T_{w\ nuevototal} \in CSLA_{L\ nuevo}$  es mejor que  $T_{w\ mejor} \in CSLA_{L\ mejor}$   
 Si  $T_{w\ nuevototal} \in CSLA_{L\ nuevo}$  es menor que  $T_{w\ mejor} \in CSLA_{L\ mejor}$  entonces el conjunto  $CSLA_{L\ nuevo}$  es fijado como la mejor solución para el problema de conformación de lotes con ruteo ( $CSLA_{L\ nuevo} = CSLA_{L\ mejor}$ ). Esta evaluación es realizada para cada iteración del metaheurístico RUBTIN.

- Etapa 8: Criterios de terminación. El RABTIN es ejecutado hasta que alguna de las siguientes condiciones se cumple: i) se alcanza el límite de iteraciones planeadas, ii) tiempo total de acomodo establecido es obtenido o iii) el tiempo de procesamiento computacional es excedido.

### 3.5.4 Híbridos de metaheurístico de búsqueda tabú 3-OPT intercambio e inserción, en el ruteo del acomodo.

En esta apartado, se modelan dos híbridos de un metaheurístico de búsqueda tabú denominados RABTDI 3-Opt Intercambio y RABTDI 3-Opt Inserción. Aunque estos dos metaheurísticos híbridos presentan similitudes con los RABTDI 2-Opt Inserción e intercambio, estos presentan diferencias en los movimientos que ejecutan para generar nuevas rutas de acomodo y los términos de los grupos de la función objetivo. Las etapas del RABTDI 3-Opt Intercambio e Inserción son descritas a continuación:

- Etapa 1: Conjunto inicial de rutas de acomodo  $s_w^l \in CRSW_{inicial}$

El conjunto inicial de rutas  $CRSW_{inicial}$  es la mejor solución obtenida de la implementación del RUBTCLA, en el apartado 3.5.1. Inclusive, la estructura del conjunto de rutas iniciales  $CRSW_{inicial}$  es similar a la representada en la etapa 1 del apartado 3.5.1.

- Etapa 2: Generar grupos de tres posiciones de almacenamiento para el RUBT3OPT Intercambio y RUBT3OPTInserción.

En esta etapa, grupos de tres posiciones de almacenamiento ( $G = \{Pos e, Pos f, Pos r\}$ ) son generadas y almacenadas en el  $WMS$ . Estos grupos son utilizados como movimientos de intercambio o inserción para implementar uno de los RABTDI 3-Opt.

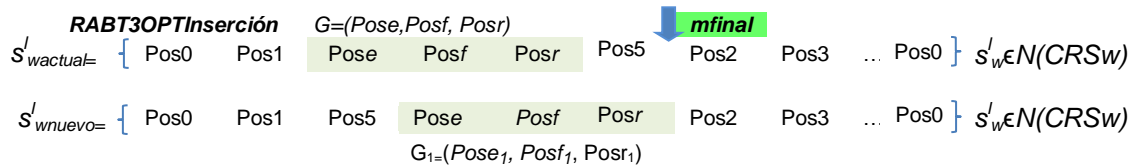
- Etapa 3: Elegir un grupo de tres posiciones de almacenamiento  $F$  e implementarlo en uno de los RABTDI 3-Opt.

Un grupo de posiciones de almacenamiento  $G$  es elegido para implementar el RABTDI 3-Opt Intercambio e Inserción. La principal diferencia entre los metaheurísticos bajo modelamiento, se presentan en las características de sus movimientos, las cuales, se describen a continuación:



-RABTDI 3-Opt Inserción: Un grupo de tres posiciones de almacenamiento  $G = \{Pos_e, Pos_f, Pos_r\}$  es colocado en un nuevo lugar llamado punto de inserción en una ruta  $s_w^l \in CRSW_{actual}$ . Con este movimiento, se diseñan nuevas rutas  $s_w^l \in CRSW_{nuevo}$  (Figura 3-12). Los movimientos de inserción son ejecutados hasta implementar el número de iteraciones planeadas o insertar el total de movimientos creados en la etapa 2.

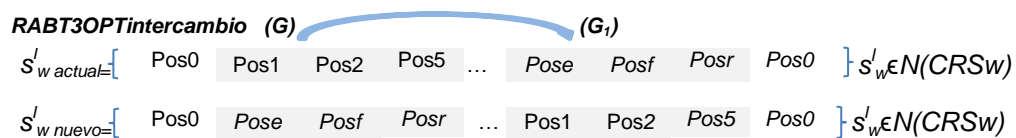
**Figura 3-12:** Representación de movimientos RABTDI 3-Opt Inserción.



<sup>b</sup> Nota. *mfinal* es la posición de almacenamiento adyacente al punto de inserción representado con una fecha.

- RABTDI 3-Opt Intercambio: Un grupo de tres posiciones de almacenamiento ( $G = \{Pos_e, Pos_r, Pos_f\}$ ) es intercambiado con otro grupo  $G_1$  ( $G_1 = \{Pos_{e_1}, Pos_{f_1}, Pos_{r_1}\}$ ) en una ruta  $s_w^l \in CRSW_{actual}$ . A partir de estos intercambios se obtienen nuevas rutas  $s_w^l_{nueva} \in CRSW_{nuevo}$  (Figura 3-13). Los intercambios son implementados hasta un número máximo de interacciones o ejecutar el total de movimientos generados en la etapa 2.

**Figura 3-13:** Representación de movimientos RABTDI 3-Opt Intercambio.



Los movimientos ejecutados son registrados en una lista tabú y su implementación se restringe durante un número de iteraciones determinado por el *tabu tenure*.

Una vez, se mide el tiempo de cada nueva ruta  $f(s_w^l_{nuevo})$  por medio del grupo de funciones objetivo del RABTDI 3-Opt, respectivo, se establece el tiempo total del  $CRQW_{nuevo}$  a través de la siguiente ecuación:

$$T_{wnuevototal} = \sum_{r=1}^R f(s^l_{knuevo}) \in CRSW_{nuevo} \quad (3.18)$$

- Etapa 4 : Grupo de funciones objetivo

Grupos de funciones objetivo son modelados para los 3-Opt Intercambio y RABTDI 3-Opt Inserción respectivamente. Las nuevas rutas  $s^l_w \in CR_{SW_{nueva}}$  configuradas son medidas en el grupo de funciones objetivo, para calcular el tiempo de la operación de acomodo como fue presentado en la etapa 3. A continuación, se representan grupos de funciones objetivo para los metaheurísticos híbridos RABTDI 3-Opt, incluyendo las variaciones de tiempo  $\Delta T_{3-Optintercambio}$  y  $\Delta T_{3-Optinserción}$  (Figura 3-14).

**Figura 3-14:** Grupos de funciones objetivo para RABTDI 3-Opt Inserción y RABTDI 3-Opt Intercambio.

$$f(s^l_w nueva) = f(s^l_w actual) + (\Delta T_{3-Optintercambio} \circ \Delta T_{3-Optinserción}) f(s^l_w) \in CR_{SW}$$

	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Tiempo de ruta <math>f(s^l_w nueva) \in CR_{SW}</math></div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{3-Opt}</math></div>
$f(s^1_w) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^1_k} \cdot d^1_{ef} \cdot Y_k^1$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^1_k \cdot X^1_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optintercambio}^c$ $\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(Pos_{(r1;r1-tm-2)})$ $+ d(Pos_{(r1;r1+1)}) + d(Pos_{(e,e+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) -$ $d(Pos_{(f,f-1)}) - d(Pos_{(r;r+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) -$ $d(Pos_{(r1;r1+1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optinserción}$ $\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(Pos_{(e-1,r+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) +$ $d(Pos_{(r,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(r,r+1)}) -$ $d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
$f(s^2_w) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^2_k} \cdot d^2_{ef} \cdot Y_k^2$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^2_k \cdot X^2_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optintercambio}$ $\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(Pos_{(r1;r1-tm-2)})$ $+ d(Pos_{(r1;r1+1)}) + d(Pos_{(e,e+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) -$ $d(Pos_{(f,f-1)}) - d(Pos_{(r;r+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) -$ $d(Pos_{(r1;r1+1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optinserción}$ $\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(Pos_{(e-1,r+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) +$ $d(Pos_{(r,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(r,r+1)}) -$ $d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
.....	.....	.....
$f(s^l_w) =$	$\sum_{k \in K} \sum_{e \neq f \in D} \sum_{f \neq d \in D} \frac{d_{ef}}{V^l_k} \cdot d^l_{ef} \cdot Y_k^l$ $+ \sum_{e \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} b_i \cdot tbu_{kie} \cdot Y^l_k \cdot X^l_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optintercambio}$ $\left(\frac{1}{V^l_k}\right) (d(Pos_{(r1;r1-tm-2)})$ $+ d(Pos_{(r1;r1+1)}) + d(Pos_{(e,e+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) -$ $d(Pos_{(f,f-1)}) - d(Pos_{(r;r+1)}) - d(Pos_{(e1,e1-1)}) -$ $d(Pos_{(r1;r1+1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3-Optinserción}$ $\left(\frac{1}{V^l_k}\right) (d(Pos_{(e-1,r+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,e)}) +$ $d(Pos_{(r,mfinal)}) - d(Pos_{(e,e-1)}) - d(Pos_{(r,r+1)}) -$ $d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$

Nota 1:  $tm$  corresponde al tamaño de movimiento descrito en la etapa 2, apartado 3.5.1.

Nota 2: En caso que la primera posición adyacente a la  $Pos_0$ , sea parte del grupo de posiciones a insertar los siguientes términos no se incluyen en la variación del tiempo:  $d(Pos_{(e-1,r+1)})$  y  $d(Pos_{(e,e-1)})$ .

En cada iteración, el valor  $\Delta\tau$  ( $\Delta\tau_{3\text{-Optintercambio}}$  o  $\Delta\tau_{3\text{-Optinserción}}$ ) es calculado en el grupo de funciones objetivo del RABTDI 3-Opt respectivo, con el fin de evaluar el impacto del movimiento ejecutado en el tiempo total de acomodo de un conjunto  $CRSw_{nueva}$ . Un  $\Delta\tau$  (negativo) muestra que el tiempo total del acomodo, se reduce. En tanto, un  $\Delta\tau$  (positivo) representa que el tiempo total del  $CRSw_{nueva}$  se incrementa, lo cual genera soluciones de menor calidad.

- Etapa 4: Evaluar si  $T_{wnuevototal} \in CSLA_{Lnuevo}$  es mejor que  $T_{wmejor} \in CSLA_{Lmejor}$

Si  $T_{wnuevototal} \in CSLA_{Lnuevo}$  es menor que  $T_{wmejor} \in CSLA_{Lmejor}$  entonces el conjunto  $CSLA_{Lnuevo}$  se fija como la mejor solución para el problema de conformación de lotes con ruteo ( $CSLA_{Lnuevo} = CSLA_{Lmejor}$ ). Esta comparación se realiza para todas las iteraciones del RABTDI 3-Opt Intercambio y RABTDI 3-Opt Inserción.

- Etapa 5: Evaluar las condiciones de finalización

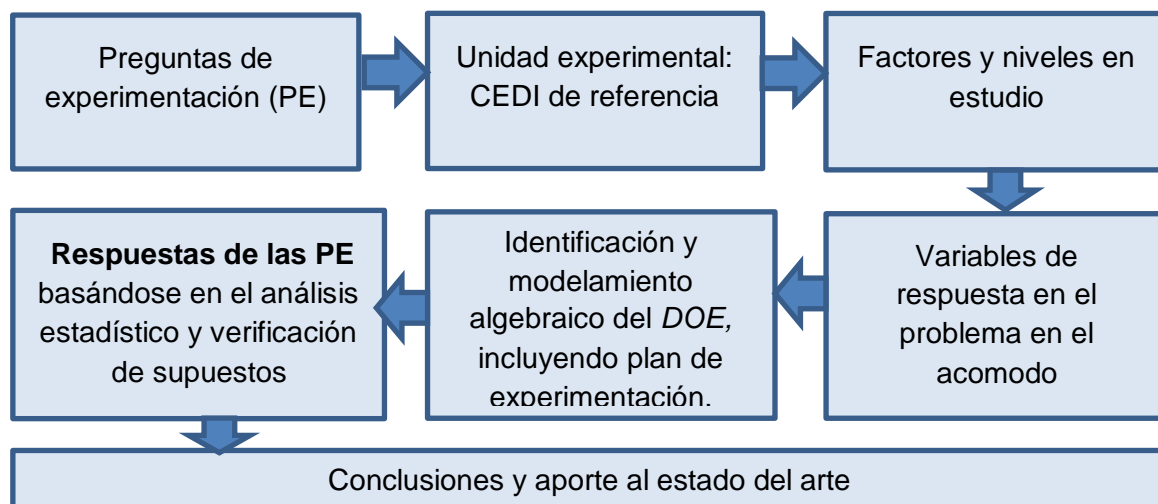
Los metaheurísticos RABTDI 3-Opt Intercambio e Inserción terminan su ejecución hasta que alguno de los siguientes criterios de finalización se cumple. Los criterios definidos son: i) el límite de iteraciones es alcanzado, ii) se logra el tiempo total de acomodo establecido o iii) el tiempo de procesamiento computacional es excedido.

Finalmente, a continuación se describen los principales resultados obtenidos en la presente capítulo. El primer resultado fue el modelamiento algebraico del problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, el cual incluyó los parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones. El segundo resultado fue el modelamiento de la regla *FCFS* y el metaheurístico *INS* para solucionar el componente de conformación de lotes. El tercer resultado consistió en el modelamiento de un metaheurístico de búsqueda tabú clásico y cinco variantes, los cuales permitieron resolver el componente del ruteo del problema formulado. Debe resaltarse, que las variantes del metaheurístico tabú, incluyeron el modelamiento estrategias de intensificación y diversificación (2-Opt y 3-Opt de Intercambio e Inserción) buscando mejorar la capacidad de exploración de los vecindarios de búsqueda y acelerar la convergencia a los mínimos tiempos de acomodo. A partir de los resultados obtenidos, se contribuye al estado del arte, ya que en los resultados del *SLR* no fueron identificados reglas y metaheurísticos que solucionaran el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.

## 4. Validación experimental del problema de conformación de lotes con ruteo para el acomodo

La validación experimental que se realiza en este capítulo tiene como objetivo determinar cuáles de las reglas o metaheurísticos modelados, permiten resolver el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, generando soluciones con el menor tiempo total de acomodo. Para desarrollar la validación experimental se planean, implementan y analizan estadísticamente diferentes modelos de diseño de experimentos (*Design of Experiment DOE*), que permiten estudiar el efecto de diferentes factores, sobre el tiempo total de acomodo (variable de respuesta). A continuación, se presentan las etapas de la validación experimental (Figura 4-1):

Figura 4-1: Etapas validación experimental con DOE, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.



En la primera etapa de la validación (Figura 4-1), se formulan cuatro preguntas de experimentación (PE). Estas preguntas establecen el objetivo y orientan el análisis

comparativo de las diferentes reglas de prioridad, metaheurísticos y factores asociados, que se modelan en el problema en estudio. En la segunda etapa, se describe la unidad experimental, sobre la cual se planean, ejecutan y estudian los experimentos estadísticos. En tanto, la tercera y cuarta etapa, se caracterizan los factores y niveles, que se analizan estadísticamente con los modelos de *DOE*, para determinar, si tienen un efecto significativo sobre la variable respuesta de interés denominada tiempo total de acomodo. Por su parte, en la quinta etapa, se seleccionan y modelan algebraicamente el el *DOE*, incluyendo el diseño del plan de experimentación. En la sexta etapa, se desarrolla el análisis estadístico y se verifican los supuestos de los modelos de *DOE* seleccionados. En tanto, en la séptima etapa, se responden las preguntas de experimentación y se desarrolla la evaluación comparativa para determinar, cuál combinación de factores, que genera una solución de mínimo tiempo total de acomodo. Finalmente, en la octava etapa, se establecen las conclusiones de la validación y el aporte al conocimiento alcanzado.

## 4.1 Preguntas de experimentación (PE)

En este apartado, se formulan cuatro preguntas de experimentación (PE) y las hipótesis de los efectos principales e interacciones dobles de los factores de interés, que se modelan para el problema en estudio ( Tabla 4-1).

**Tabla 4-1:** Preguntas de experimentación en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

Pregunta de Experimentación(PE)	Contextualización
<b>PE1</b> ¿Evaluar, las diferencias de tiempo y eficiencia que produce metaheurístico <i>INS</i> integrado al <i>WMS</i> respecto a regla de prioridad para resolver el componente de conformación de lotes en la operación de acomodo?	Esta PE1 permite estudiar estadísticamente las diferencias en el tiempo total y la eficiencia que genera la implementación del metaheurístico <i>INS</i> con relación a una regla de prioridad <i>FCFS</i> para solucionar este componente del problema. Por los motivos expuestos, se busca cuantificar el aporte a la reducción del tiempo del tiempo total y aumento en la eficiencia que produce el metaheurístico <i>INS</i> en el acomodo. De esta manera, se pretende justificar cuantitativamente el aporte de este metaheurístico en el ámbito científico y empresarial.
<b>PE2</b> ¿Determinar cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el acomodo, genera un menor tiempo total de acomodo?.	La validación experimental permite analizar estadísticamente cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a formación de lotes genera el menor tiempo total de operación.Las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se comparan en esta PE2 son: <i>RABTCLA</i> , <i>RABTDI</i> 2-Opt Intercambio, <i>RABTDI</i> 2-Opt Inserción, <i>RABTDI</i> 3-Opt Intercambio, <i>RABTDI</i> 3-Opt Inserción, <i>RABTIN</i> .

Tabla 4-1: (Continuación)

Pregunta de Experimentación(PE)	Contextualización
<p><b>PE3</b> ¿Analizar, si la mejor variante del metaheurístico de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes en el problema en estudio, permite obtener un menor tiempo total de acomodo, que un metaheurístico de algoritmos genéticos?.</p>	<p>La variante del metaheurístico de búsqueda tabú, que se selecciona para la comparación experimental, es aquella, que generó el menor tiempo total para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo, en la PE2. Un algoritmo genético fue seleccionado como metaheurístico de comparación (<i>benchmark</i>) porque ha demostrado capacidad de generar soluciones de buena calidad y eficiencia computacional para resolver problemas de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos (Tsai <i>et al.</i>, 2008 y Kulak <i>et al.</i>, 2012). Debe resaltarse, que en los resultados del <i>SLR</i> no se identificaron artículos relacionados con la conformación de lotes con ruteo en el acomodo. Por lo tanto, se toma como referente la operación de preparación de pedidos que comparte algunas características similares al acomodo como fue descrito en la sección <b>¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..</b></p>
<p><b>PE4</b> ¿Qué impacto tiene en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo total, el modelamiento de <math>K</math> EMMateriales heterogéneos, que permiten ubicar los <math>n</math> productos <math>i</math>, en las <math>m</math> posiciones asignadas del CEDI?</p>	<p>Este PE4 permite analizar estadísticamente si el factor EMMateriales heterogéneos tiene un efecto significativo sobre el tiempo total del acomodo. Debe resaltarse, que el factor EMMateriales puede restringir el tipo de productos a manipular y las posiciones de almacenamiento a visitar según el nivel de altura. De allí la importancia de estudiar el impacto de este factor en el problema de conformación de lotes con ruteo bajo análisis.</p>

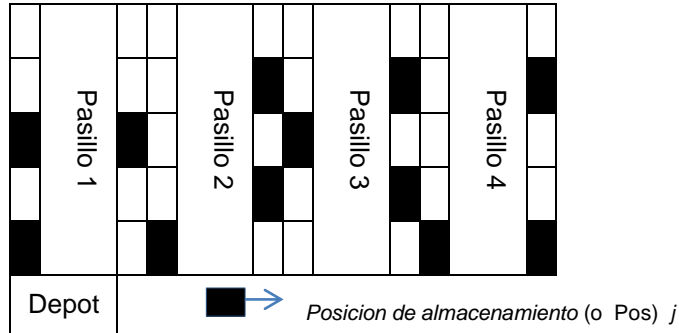
Una vez, se formulan las preguntas, se procede a la identificación y selección de los factores de estudio, la variable respuesta y los modelos de *DOE*, que se emplean para analizar el problema. En el anexo B, se presentan las hipótesis nulas y alternas para las cuatro preguntas planteadas. En el próximo apartado, se describe la unidad experimental sobre la cual se ejecutan las corridas asociadas al problema en estudio.

## 4.2 Unidad experimental para la conformación de lotes con ruteo para el acomodo

La unidad experimental es un CEDI con un *layout* en forma de bloque con 4 pasillos ( $p//$ ),  $m=192$  posiciones de almacenamiento y un área de  $720 \text{ m}^2$ . En el CEDI se ubican, los  $n$  productos  $i$  que ingresan de la planta de producción o proveedores, empleando  $K$  equipos de manejo de materiales (EMMateriales) heterogéneos. Los EMMateriales se denominan heterogéneos porque tienen diferentes capacidades de carga  $c$ , velocidades  $v$  y un nivel máximo de manejo de productos en altura  $h$ . Los pasillos, tienen una orientación vertical, y la posición de inicio (final) del acomodo, se denomina *depot*, que se puede ubicar en el centro o pasillo extremo izquierdo frontal del CEDI. Los pasillos se numeran de 1 a  $p//$ , donde el 1 es el pasillo extremo izquierdo y el  $p//$  es el pasillo extremo

derecho del CEDI. En este caso  $pll=4$ . A continuación, se representa el layout del CEDI modelado (**Figura 4-2**).

**Figura 4-2:** *Layout del CEDI multipasillo paralelo*



En el CEDI en estudio, se desarrolla una operación de acomodo, que consiste en ubicar cajas, canastillas o bultos en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , donde, se registran y permanecen como inventario, hasta que se recogen para atender pedidos de los clientes.

La distancia entre las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  del CEDI unidad experimental, se miden en metros ( $m$ ), al igual que los movimientos verticales para ubicar los  $n$  productos  $i$  en posiciones de almacenamiento en un segundo nivel o superior. El desplazamiento de un equipo de manejo de materiales de un pasillo a otro es de 5 metros. La distancia entre el depot y la primera posición de almacenamiento  $j$ , que se encuentra ubicada en el pasillo 1, parte izquierda extrema del CEDI, es de 15 metros. Las distancias descritas entre las posiciones de almacenamiento  $j$ , depot y pasillos, se representa en una matriz de origen distancia modelada en el WMS, que se integra al metaheurístico de conformación de lotes con ruteo.

Un parámetro que permite caracterizar la dinámica del CEDI como unidad experimental, es el tamaño de las órdenes de entrada al CEDI ( $oe$ ), que se modela como un parámetro de entrada o una variable aleatoria con una distribución uniforme  $U\sim(T1,T2)$ , que permite establecer la cantidad de productos  $i$  que llegan del proveedor o la fábrica en el tiempo. En caso de modelar la  $oe$  como una distribución uniforme  $U\sim(T1,T2)$ ; el  $T1$ , es el valor mínimo y  $T2$  el valor máximo de su tamaño. Una vez, se establece el tamaño de la  $oe$ , se determina la referencia y cantidad de productos que la conforma, la cual, se modela con un procedimiento implementado en el WMS. De otra parte, debe tenerse en cuenta, que

el tiempo entre llegadas de  $oe$  al CEDI, se modela como una distribución exponencial  $(1/\lambda)(\min/oe)$ .

En el CEDI unidad experimental, se implementan estrategias de conformación de lotes (ECL)(F1) y ruteo(ER)(F2), que permiten modelar y resolver el problema de una manera simultánea e integrada. Para solucionar el componente de conformación de lotes, se modela una regla de prioridad o el metaheurístico *INS*. Por su parte, para el componente de ruteo se puede ejecutar un metaheurístico de búsqueda tabú clásico (RABTCLA), o una de sus variantes, los cuales implementan estrategias de intensificación (RABTIN) y diversificación (RABTDI).

Las políticas de asignación de posiciones de almacenamiento que se proponen en la experimentación son el ABC y almacenamiento aleatorio (Albareda *et al.*, 2009; Henn, 2012). La clasificación ABC, permite conformar tres grupos de posiciones de almacenamiento. El grupo A: se compone de referencias de productos con alta demanda histórica, los cuales representan aproximadamente entre el 70-80% del volumen del total de productos preparados en el CEDI. El grupo B: referencias con demanda histórica entre un 15 y 20% del total de pedidos preparados, y grupo C: referencias, que representan menos del 10-12% del volumen de productos preparados. De otra parte, la política de asignación de almacenamiento aleatorio, consiste en ubicar los productos  $i$  considerando las restricciones de ocupación de las posiciones de almacenamiento  $j$  y limitaciones de acomodar grupos de productos juntos por condiciones de contaminación cruzada o peligro de daño. Esta segunda política, se implementa por medio de un procedimiento en el *WMS*. En esta política, se establece, la relación entre el acomodo y la preparación de pedidos, ya que es recomendable ubicar los productos  $i$  en posiciones de almacenamiento  $j$ , donde se facilite su posterior recuperación para la preparación de pedidos.

En el CEDI unidad experimental, se consideran los siguientes tiempos en el acomodo: El Tiempo de desplazamiento dentro y entre los pasillos para ubicar los productos  $i$  en las posiciones de almacenamiento  $j$ , se determina, según la velocidad (metros/minuto) y los metros que recorren los EMMateriales asignados. El tiempo de colocar el producto  $i$  de la posición de almacenamiento  $j$ , depende de su nivel de altura de la estantería y las características del EMMateriales  $k \in K$  asignado. Las velocidades y distancias de las actividades en la operación de acomodo, se establece según los datos registrados en las tablas de origen y destino entre las posiciones de almacenamiento  $j$  en el CEDI y los  $K$



EMMateriales asignados a la conformación de lotes con ruteo. El tiempo de programación para la conformación de lotes con ruteo, depende de la cantidad de oe, características del CEDI, y capacidades computacionales del equipo que se corre el modelamiento, entre otros factores. Los tiempos descritos en el acomodo, se registran en el *WMS*.

### 4.3 Factores y niveles en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

En este apartado, se presentan los factores y niveles, que se analizaran estadísticamente, en el problema de conformación de lotes con ruteo, con el fin de identificar, cuales impactan significativamente en el tiempo total de acomodo. Los factores y niveles seleccionados, se obtienen de la revisión de la literatura científica, académica y el conocimiento en la operación (Frazelle y Rojo, 2006; Bartholdi y Hackman, 2011).

**F1: Conformación de lotes.** Este factor considera una regla de prioridad y un metaheurístico *INS*, que permite solucionar el componente de conformación de lotes de acomodo. Los dos niveles, seleccionados para este factor son:

n1: Regla de prioridad *FCFS*

n2: Metaheurístico *INS* basado en búsqueda en vecindarios inteligentes.

**F2: Variantes de metaheurístico de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes.** Este factor, permite determinar estadísticamente, cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú (clásico, intensificación o diversificación), configura rutas integradas a cada  $LA \in CSLA_L$ , con el menor tiempo total de acomodo. A continuación, se representan los seis niveles del factor, que se modelan en el *DOE*.

n1: RABTCLA (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Clásica)

n2: RABTDI 2-Opt Inserción (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Diversificación)

n3: RABTDI 2-Opt Intercambio (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Diversificación)

n4: RABTDI 3-Opt Inserción (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Diversificación)

n5: RABTDI 3-Opt Intercambio (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Diversificación)

n6: RABTIN (Ruteo de Acomodo Búsqueda Tabú Intensificación).

Este factor se compone de seis niveles, ya que es de interés detectar cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú produce el menor tiempo total de acomodo.

**F3: Lista del tamaño de acomodo (*Putaway List*).** Este factor permite estudiar estadísticamente el efecto de diferentes tamaños de lista (*Putaway List*) en el tiempo total de acomodo. Los dos tamaños de lista, se eligen debido al tamaño del CEDI de distribución configurado y la cantidad de referencias modeladas para el problema. Además, se tiene interés de evaluar que efecto puede tener que una lista de acomodo tenga casi el doble de productos que la otra. A continuación, se presentan los niveles seleccionados.

n1=140 productos/lista de acomodo

n2=240 productos/lista de acomodo

**F4: Ubicación del *DEPOT*.** Este factor tiene como objetivo estudiar estadísticamente, que efecto tiene la ubicación del *depot* en la obtención de lotes con ruteo de tiempo mínimo en la operación de acomodo. En el *DOE*, se modelan dos niveles, que representan alternativas de ubicación del *depot* más comunes en el CEDI (Albareda *et al.*, 2009; Henn y Schmid, 2013).

n1: Centro

n2: Extremo izquierdo del CEDI

**F5: Grupos de *K* EMMateriales heterogéneos.** Este factor tiene como objetivo analizar estadísticamente, las diferencias que se obtienen en los tiempos de acomodo, cuando, se modelan tres niveles de grupos con diferentes cantidades *K* EMMateriales heterogéneos. En la configuración de los grupos, se debe garantizar, que él que tenga mayor cantidad de EMMateriales *K* debe sumar la mayor capacidad de carga disponible. A continuación, se representan los tres niveles de este factor.

n1: 1 EMMateriales heterogéneo (*Order Picker*) ( $K=1$ )

n2: 3 EMMateriales heterogéneos ( $K=3$ ) ( 2 *Order Picker*\* y 1 Montacarga\*\* )

n3: 5 EMMateriales heterogéneos( $K=5$ ) ( 3 *Order Picker*\* y 2 Montacarga\*\* )

A continuación, se presentan las características de los equipos modelados (Tabla 4-2)

**Tabla 4-2:** Características equipos modelados en la experimentación.

	Capacidad de carga	Velocidad de viaje	Altura máxima
Order Picker(OP)*	1550 kg(1,2 m <sup>3</sup> )	168,33 metros/min	5 metros
Montacargas**	2665 kg(1,4 m <sup>3</sup> )	146,33 metros/min	5 metros

Para reducir la variabilidad del modelamiento del problema, se establece la política, que el EMMateriales programado en el n1, se modela en n2 y n3. Igualmente, los tres EMMateriales modelados en el n2, se programan para la experimentación en el n3.

#### 4.4 Variables de respuesta en la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo de acomodo

Las variables respuesta, que se utilizan para estudiar los efectos de los diferentes factores en la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo, en el acomodo, se presentan a continuación:

- (VR1)Tiempo mínimo total de acomodo (minutos (min)/ CSLA<sub>L</sub>), que generan las soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, que se componen de las combinaciones de los niveles de los factores en análisis.
- (VR2) Cálculo del % de eficiencia que producen las combinaciones de los niveles de los factores en análisis respecto a un patrón de referencia, en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.
- (VR3)Número de veces que una regla o metaheurístico para resolver los componentes de conformación de lotes y ruteo, generan la solución de menor tiempo total, para el problema en el acomodo.

#### 4.5 Selección y modelamiento algebraico de *DOE*, incluyendo el diseño del plan experimental, que permite ejecutar la validación en el problema en estudio.

En este apartado se seleccionan, planean y modelan los diseños, que permiten realizar los análisis estadísticos que generan la información para responder las PE formuladas. En el estudio de elección de los modelos, se agrupan las PE1, PE2 y PE4, ya que su

análisis estadístico puede realizarse un con un solo modelo de *DOE*. Por su parte, para la PE3 se planea y ejecuta otro modelo de *DOE* debido a que este presenta diferencias en los niveles del factor estrategia de ruteo respecto a las tres PE agrupadas.

• Selección y modelamiento del DOE para las PE1, PE2 y PE4

Para responder las PE1, PE2 y PE4, se selecciona un diseño de parcelas divididas, ya que se presenta una restricción, que no permite ejecutar aleatoriamente las combinaciones de tratamientos con los mismos grupos de *K* EMMateriales heterogéneos. La restricción descrita, se genera en el CEDI, porque los *K* EMMateriales suelen utilizarse en diferentes operaciones en un mismo turno de trabajo, lo cual, limita su disponibilidad para realizar los experimentos.

Por el motivo expuesto, en la configuración del diseño de parcelas divididas, se elige el factor *K* EMMateriales heterogéneos como difícil de cambiar en la experimentación. Entre tanto, los factores fáciles de modificar, se incluye la estrategia de conformación de lotes (F1), las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú para el ruteo(F2), la ubicación del *depot* (F3) y el tamaño de la lista de acomodo (F4).

A continuación, se presenta la estructura del diseño de parcelas divididas, para las PE1 PE2, y PE4, que se compone de los niveles del factor difícil modificar y los factores fáciles descritos (Tabla 4-3).

**Tabla 4-3:** Estructura de parcela dividida en el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

Tamaño del grupo de <i>K</i> EMMateriales heterogéneos(factor difícil de cambiar)(F5)		
K=1	K=3	K=5
<b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>INS</i> y <i>FCFS</i> <b>F2:</b> Estrategia de ruteo:RABTCLA, RABTDI 2-Opt Inserción, RABTDI 2-Opt Intercambio, RABTDI 3-Opt Inserción, RABTDI 3-Opt Intercambio, RABTIN <b>F3:</b> UbicaciónDEPOT: Central y Pos0_Izquierdo <b>F4:</b> Tamaño de la lista de acomodo( <i>Putaway List</i> ):240(Alto) y 140(Bajo)	<b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>INS</i> y <i>FCFS</i> <b>F2:</b> Estrategia de ruteo:RABTCLA, RABTDI 2-Opt Inserción, RABTDI 2-Opt Intercambio, RABTDI 3-Opt Inserción, RABTDI 3-Opt Intercambio, RABTIN. <b>F3:</b> UbicaciónDEPOT: Central y Pos0_Izquierdo <b>F4:</b> Tamaño de la lista de acomodo ( <i>Putaway List</i> ): (Putaway List):240(Alto) y 140(Bajo)	<b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>INS</i> y <i>FCFS</i> <b>F2:</b> Estrategia de ruteo:RABTCLA, RABTDI 2-Opt Inserción, RABTDI 2-Opt Intercambio, RABTDI 3-Opt Inserción, RABTDI 3-Opt Intercambio, RABTIN. <b>F3:</b> UbicaciónDEPOT: Central y Pos0_Izquierdo <b>F4:</b> Tamaño de la lista de acomodo ( <i>Putaway List</i> ):240(Alto) y 140(Bajo)

El modelamiento estadístico del diseño de parcelas divididas configurado (Tabla 4-3) consiste en representar algebraicamente los efectos principales e interacciones de los factores en estudio, la media global, el error de la parcela grande y pequeña. A continuación, se presenta el modelo estadístico obtenido para este diseño:

$$Y_{ijklh} = \mu + F5_h + U_{ijkl(h)} + F1_i + F2_j + F3_k + F4_l + F2_j F3_k + F2_j F5_h + F1_i F2_j + F2_j F4_l + F3_k F5_h + F1_i F3_k + F3_k F4_l + F1_i F5_h + F4_l F5_h + F1_i F4_l + \epsilon_{ijklh}$$

$Y_{ijklh}$ : Tiempo total de preparación de pedidos, que se compone por los  $LA^l \in CSLA_L$

$\mu$ : Tiempo promedio total en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

$U_{ijkl(h)}$ : Error de la parcela grande (aleatorio)

$\epsilon_{ijklh}$ : Error de la parcela pequeña (aleatorio)

$F1_i$ : Efecto principal estrategia conformación de lotes, en el acomodo

$F2_j$ : Efecto principal estrategia de ruteo integrada a la conformación de lotes, en el acomodo.

$F5_h$ : Efecto principal grupo de EM Materiales  $K$ .

$F1_i F4_l$ : Efecto interacción factores estrategia de conformación de lotes y ubicación *Depot*.

$F1_i F3_k$ : Efecto interacción factores estrategia de conformación de lotes y tamaño de lista de acomodo.

$F1_i F5_h$ : Efecto interacción factores estrategia de conformación de lotes y grupo de  $K$  EM Materiales heterogéneos, en el acomodo.

$F2_j F3_k$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y tamaño de lista de acomodo.

$F1_i F2_j$ : Efecto interacción factores conformación de lotes y estrategia de ruteo

$F2_j F4_l$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y ubicación del *depot*.

$F4_l F5_h$ : Efecto interacción ubicación del *depot* y grupo de  $K$  EM Materiales heterogéneos.

$F3_k F5_h$ : Efecto interacción Tamaño de lista de acomodo y grupo de  $K$  EM Materiales.

$F2_j F5_h$ : Efecto interacción estrategia de ruteo integrado a la conformación de lotes (ER) y grupo de EM Materiales  $K$  en el acomodo.

De los diferentes efectos principales e interacciones modelados, se realizará énfasis en los relacionados con los factores estrategia de conformación de lotes ( $F1$ ), ruteo ( $F2$ ) y  $K$  heterogéneos ( $F5$ ), ya que su análisis estadístico, genera información para dar respuesta

a las PE1, PE2 y PE4. Los efectos de los otros tres factores modelados, se estudian sus interacciones dobles con los F1, F2 y F5 para obtener las soluciones de mínimo tiempo total, para el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo.

Para el diseño de parcelas divididas, se estructura un plan de experimentación, que se compone de las 144 combinaciones niveles de los factores analizados. Para cada combinación de niveles, se ejecutan dos replicas, que producen un total de 288 corridas. Debe resaltarse, que dentro de cada una de las tres parcelas principales (niveles del factor difícil de modificar), los tratamientos de los niveles de los factores fáciles de cambiar, se asignan aleatoriamente. El plan detallado de experimentación, del diseño de parcelas divididas para las PE1, PE2 y PE4, se presenta en el Anexo C.

Finalmente, para la medición y posterior análisis estadístico de las soluciones del problema en estudio se ejecutan en los modelos computacionales, que contienen las reglas y metaheurísticos integrados a un WMS, las 288 corridas, en el orden establecido en el plan de experimentación.

- Selección, planeación y modelamiento del *DOE* en la PE3.

Para responder esta pregunta PE3, se puede emplear un diseño de parcelas divididas (*Split Plot*) similar al descrito para las PE1, PE2 y PE3. La única diferencia, se presenta en la configuración del factor estrategia de ruteo integrado a la conformación de lotes (F2), ya que se incluye un nivel denominado metaheurístico de algoritmo genético. Igualmente, en este de diseño de parcelas divididas, se elige el factor grupo de *K* de EMMateriales heterogéneos (F5) como difícil de cambiar en la experimentación, debido a que se presenta la misma restricción en la aleatorización, que se describió en las PE1, PE2 y PE4. Entre los factores fáciles de variar en la experimentación, se consideran estrategias de conformación de lotes (F1), estrategias de ruteo (F2), ubicación del *depot* (F3), y tamaño de la lista de acomodo (F4).

A continuación, se presenta el modelo estadístico del *diseño* de parcelas divididas, en esta PE3:

$$Y_{ijklh} = \mu + F5_h + U_{ijkl(h)} + F2_j + F2_j F3_k + F2_j F5_k + F1_i F2_j + F2_j F4_t + \epsilon_{ijklh}$$

$Y_{ijklh}$ : Tiempo total de preparación de pedidos, que se compone por los  $LA' \in CSLA_L$

$\mu$ : Tiempo promedio total en la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

$U_{ijkl(h)}$ : Error de la parcela grande(aleatorio)

$\epsilon_{ijklh}$ : Error de la parcela pequeña (aleatorio)

$F2_j$ : Efecto principal estrategia de ruteo integrada a la conformación de lotes, en el acomodo.

$F2_j F3_k$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y tamaño de lista de acomodo.

$F1_i F2_j$ : Efecto interacción factores conformación de lotes y estrategia de ruteo

$F2_j F4_i$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y ubicación del *depot*

$F4_i F5_n$ : Efecto interacción ubicación del *depot* y grupo de EM Materiales  $K$  heterogéneos.

Respecto al plan de experimentación para este diseño de parcelas para la PE3, se configuran 144 combinaciones de los niveles de factores modelados para el problema, y se ejecutan 2 réplicas, lo que genera un total de 288 corridas. En el Anexo C, se presenta el plan de experimentación detallado para este diseño.

## 4.6 Respuestas de las PE basado en el análisis del *DOE*.

En este apartado, se responden cada una de las cuatro Preguntas de Experimentación (PE) asociadas al estudio del problema de conformación de lotes (CSLA<sub>L</sub>) con ruteo ( $s'_w$ ), en el acomodo, apoyándose en los resultados del análisis estadístico de los modelos de *DOE* elegidos. Para facilitar la presentación de las respuestas y descripción de los hallazgos de la validación experimental, la sección, se divide en dos partes. En la primera etapa, se elabora una tabla, que permite registrar el tiempo promedio total de cada CSLA<sub>L</sub> (tratamiento) y la eficiencia que estas producen respecto a los patrones de referencia establecidos. De otro lado, en la segunda parte, se realiza un análisis estadístico de las corridas de los tratamientos empleando los modelos de *DOE* elegidos. Entre los objetivos del análisis, se considera: a) determinar si los efectos principales e interacciones de los factores en estudio afectan significativamente la variable de respuesta y b) detectar, cuáles de las combinaciones de los niveles de los factores o escenarios, generan las soluciones de menor tiempo total y la eficiencia más, para el problema en estudio. Con los resultados y hallazgos, que se obtienen del análisis estadístico de los *DOE* seleccionados, se responden detalladamente las cuatro PE planteadas en la validación experimental.

### 4.6.1 Soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

En este subapartado, se representa una tabla que permite registrar el tiempo promedio total y la eficiencia, que producen las combinaciones de los niveles de los factores modelados, las cuales, corresponden a las soluciones del problema en estudio. En la representación, no se consideran las combinaciones del nivel algoritmo genético del factor estrategia de ruteo (GA\_Ruteo acomodo algoritmo genético)(F2). Esto se plantea porque este metaheurístico se modela como metaheurístico de referencia (*benchmark*), para analizar, si este genera soluciones de menor tiempo promedio total, que el mejor metaheurístico de búsqueda tabú (mejor RUPBT-Ruteo preparación de pedidos búsqueda tabú), en la PE2.

Para calcular el porcentaje (%) de eficiencia de las soluciones, se compara el tiempo promedio tiempo total del escenario en evaluación respecto al obtenido, en el patrón de referencia en la experimentación. A continuación, se presenta la fórmula para medir de la eficiencia de las soluciones:

$$\%eficiencia = \frac{T_{totalpref} - T_{totalEscenarioActual}}{T_{totalpref}} \quad (4.1)$$

-*%eficiencia*: Incremento o disminución del tiempo total del escenario actual en evaluación con relación al patrón de referencia.

-*T<sub>totalEscenarioActual</sub>*: Tiempo total de acomodo del escenario actual en evaluación.

-*T<sub>totalpref</sub>*: Tiempo total generado por el patrón de referencia.

En las PE1, PE2, PE3, PE4, se configuran los siguientes patrones de referencia, que se componente con las siguientes combinaciones de niveles (Tabla 4-4):



**Tabla 4-4:** Patrones de referencia para la experimentación

Factor	Nivel	
Estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1)	FCFS(Primero en Entrar Primero en Servir)	
Estrategia de ruteo (ER)(F2)	<i>RABTCLA (Ruteo Acomodo Búsqueda Tabú Clásico)</i>	
Tamaño lista de preparación de pedidos (TLPpedidos)(F3)**	140	240
Ubicación del <i>depot</i> (F4)	Centro	
Grupo <i>KEM</i> Materiales heterogéneos(F5)	<i>K=1</i>	

Nota 1: \*\* Se configuran dos patrones de referencia, los cuales, se diferencian por el nivel tamaño de la lista de acomodo (TLAcomodo). Este enfoque se justifica porque según la cantidad de productos en una lista, los tiempos promedios totales  $CSLA_t$  varían. Por este motivo, el objetivo de analizar este factor en la experimentación es detectar la magnitud de las diferencias entre los dos tamaños de lista.

De otra parte, los niveles de los factores que componen los dos patrones de referencia, pretenden representar la configuración típica de la conformación de lotes con ruteo, en el acomodo, la cual, fue caracterizada a partir de los hallazgos obtenidos de la metodología *SLR* del estado del arte, la revisión de la literatura, y el conocimiento de la operación (Frazelle y Rojo, 2006; Bartholdi; Hou *et al.*, 2010; Bartholdi y Hackman, 2011). En el caso particular, de los niveles de los factores *FCFS* y *RABTCLA*, estos se seleccionan, debido a que tienen una complejidad moderada de modelamiento y suelen ser los más utilizados en la literatura científica, para resolver los componentes de conformación de lotes y ruteo, en la preparación de pedidos, considerando *KEM* Materiales homogéneos (Albareda *et al.*, 2009; Henn, 2012; Matusiak *et al.*, 2014). Debe resaltarse, que el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, comparte algunas características con el acomodo por este motivo, se toma de referencia para justificar la selección de algunos de niveles de factores para los patrones de referencia.

A continuación, se representa la tabla con las soluciones obtenidas en los escenarios configurados, para el problema, en el acomodo. Debe resaltarse, que los dos patrones de referencia establecidos están etiquetados con el siguiente símbolo (\*\*)(Tabla 4-5).

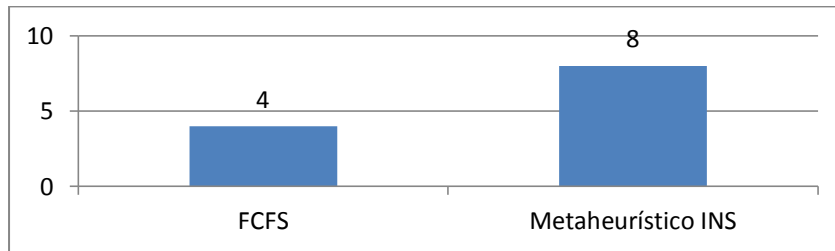
**Tabla 4-5:** Soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo

ECL	Ubicación Depot	TL Aco- modo	Grupo EMMa- teriales	ER					
				RABTCLA	RABTDI 2-Opt Int	RABTDI 2-Opt Ins	RABTDI 3-Opt Int	RABTDI 3-Opt Ins	RABTIN
FCFS ***	Centro	140	1	56,27	54,06	54,44	54,05	54,13	54,77
				0%	3,9%	3,2%	4,0%	3,8%	2,7%
			3	54,70	52,92	53,24	53,17	52,99	52,88
				2,8%	6,0%	5,4%	5,5%	5,8%	6,0%
			5	54,50	52,89	53,01	52,88	53,28	52,90
				3,1%	6,0%	5,8%	6,0%	5,3%	6,0%
		240	1	90,25	88,25	88,83	88,46	88,59	88,47
				0%	3%	2,3%	2,7%	2,6%	2,7%
			3	89,83	87,24	87,62	87,53	87,64	87,00
				1,2%	4,1%	3,7%	3,8%	3,6%	4,3%
			5	89,67	86,69	87,41	87,28	87,63	86,27
				1,4%	4,7%	3,9%	4,0%	3,7%	5,1%
	Izquierda ***	140 ***	1	55,68	53,58	54,62	54,01	54,26	53,65
				1,1%	4,8%	2,9%	4,0%	3,6%	4,7%
			3	53,80	52,81	52,91	52,88	52,81	52,69
				4,4%	6,1%	6,0%	6,0%	6,1%	6,4%
			5	54,35	52,46	53,02	52,93	53,41	52,45
				3,4%	6,8%	5,8%	5,9%	5,1%	6,8%
		240	1	90,22	89,70	88,97	88,51	88,70	88,25
				0,8%	1,4%	2,2%	2,7%	2,5%	
			3	90,30	87,25	87,44	87,38	87,49	86,96
				0,7%	4,1%	3,9%	3,9%	3,8%	4,4%
			5	88,55	86,85	87,62	87,40	87,90	86,75
				2,6%	4,5%	3,7%	3,9%	3,4%	4,6%
Meth INS	Centro	140	1	56,87	55,26	55,38	54,81	55,27	54,80
				-1,1%	1,8%	1,6%	2,6%	1,8%	2,6%
			3	21,64	19,91	20,03	21,82	19,98	19,87
				61,5%	64,6%	64,4%	61,2%	64,5%	64,7%
			5	14,6	<b>12,86</b>	13,34	13,23	12,23	<b>12,79</b>
				74,1%	77,1%	76,3%	76,5%	76,5%	77,3%
		240	1	<b>94,42</b>	92,55	92,82	92,23	93,40	92,29
				-3,8%	-0,8%	-2,0%	-1,4%	-2,7%	-1,5%
			3	34,49	32,62	33,24	33,34	33,23	32,91
				62,1%	64,1%	63,5%	63,3%	63,5%	63,8%
			5	23,98	<b>21,97</b>	22,51	22,36	<b>21,86</b>	22,25
				73,6%	75,8%	75,2%	75,4%	76,0%	75,5%
	Izquierda	140	1	56,62	54,62	55,07	54,69	54,86	54,38
				-0,62%	2,9%	2,1%	2,8%	2,5%	3,4%
			3	21,13	19,76	19,75	19,66	20,08	19,78
				62,5%	64,9%	64,9%	61,5%	64,3%	64,9%
			5	13,99	<b>13,00</b>	13,38	13,26	13,11	<b>12,88</b>
				75,1%	76,9%	76,2%	76,4%	76,7%	77,1%
		240	1	93,52	92,72	92,52	92,34	92,01	93,08
				-2,8%	-1,9%	-1,7%	-1,5%	-1,2%	-2,3%
			3	34,47	32,83	33,05	32,97	33,89	32,85
				62,1%	63,9%	63,7%	63,8%	62,7%	63,9%
			5	23,22	21,90	22,57	22,42	22,44	21,96

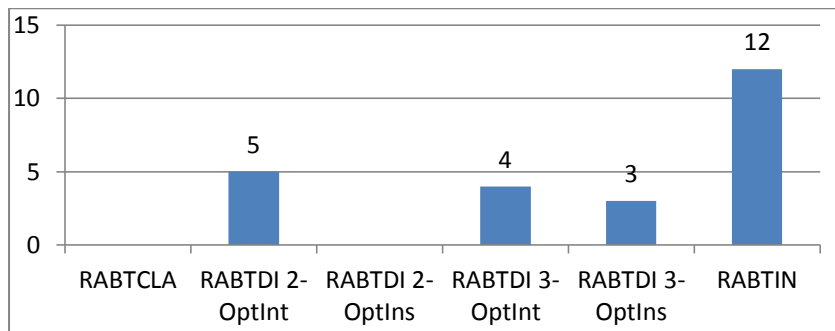
Nota: El tiempo promedio total del CSLA<sub>L</sub>, se mide en minutos (min).

A continuación se representa la cantidad de veces que la regla o los metaheurísticos modelados para solucionar los componentes de conformación de lotes (Figura 4-3) y ruteo (Figura 4-4) generaron las mejores soluciones para el problema.

**Figura 4-3:** Cantidad de veces que la regla o metaheurístico *INS* produjeron la mejor solución para la conformación de lotes.



**Figura 4-4:** Cantidad de veces que un metaheurístico de búsqueda tabú genera la ruta de menor tiempo promedio total.



De la Figura 4-3, se identifica que el metaheurístico *INS* produce 8 veces las mejores soluciones para el problema en estudio, mientras que la regla *FCFS* únicamente cuatro. Este resultado evidencia, que el metaheurístico puede generar mejor desempeño para resolver el problema bajo modelamiento. De otra parte, de la Figura 4-4, se observa que las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú denominadas *RABTIN* y *RABTDI 2-OptInt* produjeron en 12 y 5 veces respectivamente, las soluciones de menor tiempo promedio total para el problema.

Para ampliar los hallazgos de las soluciones de los 144 escenarios estudiados (Tabla 4-5) y analizar estadísticamente los efectos principales e interacciones de los cinco factores modelados, sobre el tiempo promedio total de acomodo, en el problema de conformación de lotes con ruteo, se responden las cuatro preguntas de experimentación (PE) planteadas. De los resultados de las PE, se pretende identificar: a) las combinaciones de niveles que generan las soluciones de menor tiempo promedio total

para el problema, b) efectos principales e interacciones significativas sobre las variables respuesta, y c) otras conclusiones de las soluciones del problema, en estudio.

**PE1 ¿Evaluar, las diferencias de tiempo y eficiencia que produce metaheurístico *INS* integrado al *WMS* respecto a regla de prioridad para resolver el componente de conformación de lotes en la operación de acomodo?**

Para responder apropiadamente la PE1 y validar los hallazgos exploratorios descritos, se realiza el análisis estadístico con el diseño de parcelas divididas seleccionado, el cuál, permite determinar, si el nivel metaheurístico *INS*, produce soluciones de menor tiempo total, en el acomodo que la implementación de la regla de prioridad *FCFS*. Adicionalmente, del análisis, se establecen las diferencias en el tiempo promedio total y la eficiencia que se genera entre los niveles de este factor 1, en caso que existan.

El análisis estadístico que soporta la respuesta a la PE1, se realiza de manera analítica y gráfica. Desde la perspectiva analítica, se estudian los resultados obtenidos de un análisis de varianza (*ANOVA*), que contiene los efectos principales e interacciones de los factores, el error de la parcela y el modelo. Respecto al enfoque gráfico, se desarrolla un análisis de medias de los tiempos totales que generan los efectos principales e interacciones de los factores modelados, en el problema de conformación de lotes con ruteo. Dentro del análisis estadístico, se incluye la verificación de los supuestos típicos del *DOE* parcelas divididas y estudio del  $R^2$  ajustado, los cuales, afectan en la validez de la respuesta de la PE1.

Para iniciar con el análisis estadístico, se calcula la tabla *ANOVA* del *diseño* de parcelas divididas, empleando la versión académica del software InfoStat®. En el análisis de la tabla *ANOVA*, se realiza énfasis en los niveles metaheurístico *INS* y regla de prioridad *FCFS* del factor ECL (F1), que es crítico para la respuesta de la PE1 (Tabla 4-6).

**Tabla 4-6:** ANOVA DOE parcelas divididas PE1, InfoStat®

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	220919,52	146	1513,14	2043,37	<0,0001
EMMateriales	45930,78	2	22965,39	8148,52	<0,0001
EMMateriales>Replica	8,45	3	2,818349	3,80	0,01
ECL	70440,91	1	70440,91	95124,40	<0,0001
Depot	1,75	1	1,75	2,37	0,12
TLAcomodo	53343,32	1	53343,32	72035,58	<0,0001
ER	113,73	5	22,74	30,71	<0,0001
EMMateriales*ECL	41507,02	2	20753,51	28025,83	<0,0001
EMMateriales*Depot	0,30	2	0,15	0,20	0,81
EMMateriales*TLAcomodo	2873,23	2	1436,61	1940,03	<0,0001
EMMateriales*ER	3,72	10	0,37	0,50	0,88
ECL*Depot	0,17	1	0,17	0,23	0,63
ECL*TLAcomodo	3823,93	1	3823,93	5163,89	<0,0001
ECL*ER	2,48	5	0,49	0,67	0,64
Depot*TLAcomodo	1,27	1	1,27	1,72	0,19
Depot*ER	2,17	5	0,43	0,58	0,70
TLAcomodo*ER	1,18	5	0,23	0,32	0,89
Error	104,41	141	0,74		
Total	221023,93	287			

De la ANOVA (Tabla 4-6) se identifica que el efecto principal del factor estrategia de conformación de lotes(ECL)(F1) y sus interacciones dobles con los factores Grupo de  $K$  EMMateriales (F5) y tamaño de la lista de acomodo(TLAcomodo)(F3) son significativos sobre el tiempo total de acomodo, ya que su p-valor, son menores a 0.05. Por lo tanto, se rechazan estas hipótesis nulas ( $H_0$ ) planteadas para la PE1 (Tabla 4-1).

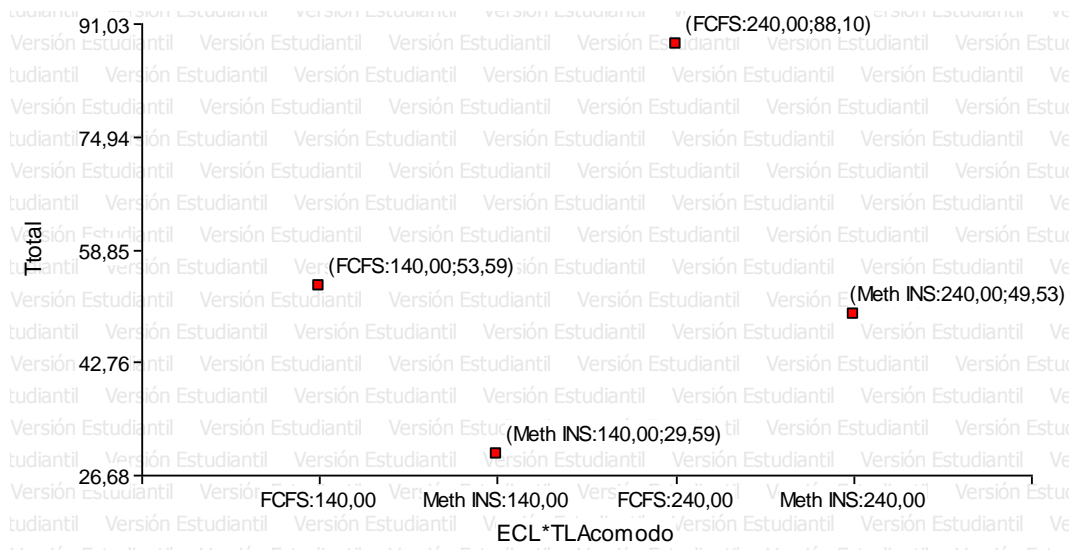
Del análisis del error de la parcela principal (GrupoKEMMateriales>Replica) y el error de las parcelas pequeñas, se puede inferir que son adecuados, ya que representan un 20% y 0,007% del error total del modelo. Adicionalmente, el valor  $R^2$ ajustado es del 99.7%, lo cual, indica que el modelo estadístico, permite representar adecuadamente, los factores en estudio, en el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo.

Con relación a la verificación de los supuestos del modelo, se estudian la normalidad y varianza homogénea, a través de análisis gráficos y pruebas analíticas modeladas, en la versión académica de InfoStat®. Para verificar, el supuesto de normalidad, se desarrolla con un el análisis gráfico Q-Q y la prueba de *Shapiro Wilk*. Del análisis gráfico, se detectó, que los residuos del modelo, no se ajustan completamente a la recta de la normal, inclusive el p-valor de la prueba de *Shapiro Wilk* es de 0.001. Por este motivo, se realizó una transformación de los residuos utilizando una función Log10, lo cual, mejoró el ajuste a la distribución normal, generando un nuevo p-valor de 0.019 para la prueba analítica de *Shapiro Wilk*. Aunque este p-valor es menor a 0.05, la representación gráfica

de normalidad, permite concluir que el ajuste de los residuos es apropiado. Adicionalmente, los p-valores de los efectos de interés son menores a 0.0001 y los valores F altos, de allí la justificación de aceptar el cumplimiento de este supuesto. Respecto a la varianza homogénea, se detecta de un análisis gráfico de residuos vs valores predichos, que este se cumple, porque los datos no presentan una tendencia marcada.

Una vez, se verifica el cumplimiento de los supuestos del modelo, se procede al análisis de los tiempos promedios totales, que genera el efecto principal del factor estrategia de conformación de lotes(ECL)(F1) y sus interacciones dobles con los factores Grupo K equipos heterogéneos (F5) y tamaño de la lista de acomodo(TLAcomodo)(F3). De esta manera, se busca identificar las combinaciones de los niveles de los factores que producen las soluciones con el menor tiempo total de acomodo. En el análisis el tiempo promedio total de un conjunto de lotes  $CSLA_L$ , se expresa en minutos o  $min/CSLA_L$ . Por su parte, el tiempo de un conjunto de rutas  $CRSw$ , se expresa en minutos o  $CRSw/min$ . Esto se plantea para simplificar la redacción del documento.

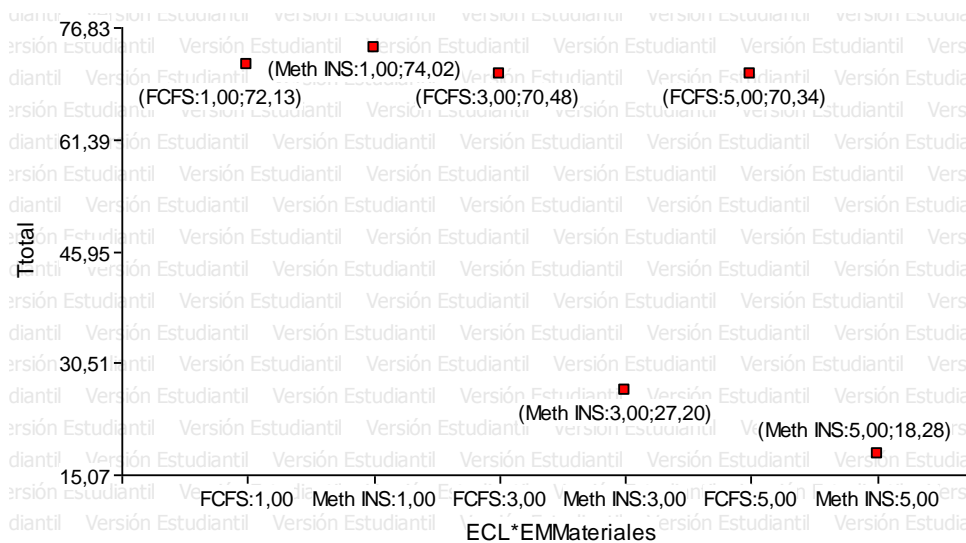
**Figura 4-5:** Tiempo promedio total de acomodo, que produce el efecto de la interacción entre los factores ECL (F1) y TLAcomodo (F3)



Del gráfico de medias (Figura 4-5), se detecta que la combinaciones del nivel metaheurístico NS (F1) con los niveles TLAcomodo 140 y 240 (F3), generan las mejores soluciones del problema, con tiempos promedios totales de 29,59 y 49,53  $min/CSLA_L$ .

Inclusive, las combinaciones de niveles descritas respecto a la implementación de la regla *FCFS*, producen una reducción en el tiempo promedio total de la operación de 22,39 y 38,57 min/*CSLA<sub>L</sub>* para los TL140 y 240, respectivamente. De los resultados obtenidos, es justificable, que el tiempo total de acomodo, sea menor para el TL Acomodo de 140, ya que en esta se deben acomodar menos productos que el tamaño de lista de 240.

**Figura 4-6:** Tiempo promedio total que produce el efecto de la interacción entre los factores ECL (F1) y Grupo de K EMMateriales heterogéneos (F5)



Del gráfico de medias (Figura 4-6), se identifica que las interacciones entre el nivel metaheurístico *INS* (F1) y los niveles grupo de tres ( $K=3$ ) y cinco ( $K=5$ ) crean las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 27,20 y 18,28 min/*CSLA<sub>L</sub>*, respectivamente. En el caso, de programar un equipo ( $K=1$ ), las interacciones entre los niveles *FCFS* y metaheurístico *INS* (F1) se evidencia una diferencia de aproximadamente un minuto por *CSLA<sub>L</sub>*, en el tiempo promedio total de acomodo.

A partir de los resultados obtenidos, se detecta que la mejor solución del problema que corresponde a la combinación metaheurístico *INS* en la ECL (F1) con un grupo  $K=5$  EMMateriales genera un aumento en la eficiencia de 74,01% / *CSLA<sub>L</sub>* respecto a la implementación de la misma combinación con la regla *FCFS*. De esta manera, se establece la calidad de las soluciones que produce el modelamiento del metaheurístico *INS* como ECL.

Para culminar, la respuesta a la PE1, se presentan las combinaciones de niveles del factor ECL (F1), que generan las soluciones de menor tiempo promedio total, para el problema en estudio:

-Metaheurístico *INS* (nivel 2, Factor 1)\*TLAcomodo 140(nivel1, Factor3)=29,59 min/*CSLA<sub>L</sub>*

-Metaheurístico *INS* (nivel 2, Factor 1)\*TLAcomodo 240(nivel1, Factor3)=49,53 min/*CSLA<sub>L</sub>*

-Metaheurístico *INS* (nivel 2, Factor1)\*Grupo  $K=3$  EMMateriales (nivel1, Factor5)=27,20 min/*CSLA<sub>L</sub>*

-Metaheurístico *INS* (nivel 2, Factor 1)\*Grupo  $K=5$  EMMateriales (nivel1, Factor5)=18,28 min/*CSLA<sub>L</sub>*

Finalmente, con el modelamiento del metaheurístico *INS*, para resolver el componente de conformación de lotes, se aporta al estado del arte. Esto se plantea, porque el enfoque planteado, no sólo generó soluciones de menor tiempo total promedio, sino que también permitió el modelamiento de  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos  $i$ , y  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ .

PE2 ¿Determinar cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el acomodo, genera un menor tiempo total de acomodo?

Para detectar, la variante del metaheurístico de búsqueda tabú, que genera el conjunto de rutas  $CRSw \in CSLA_L$ , se inicia con el estudio de la ANOVA del DOE de parcelas divididas para esta PE2. Únicamente, se representan los efectos principales de los niveles del factor estrategia de ruteo (Figura 4-7). En caso, de requerir información de los otros términos del modelo, incluyendo los errores, se sugiere revisar la tabla ANOVA completa presentada en la PE1 (Tabla 4-7).



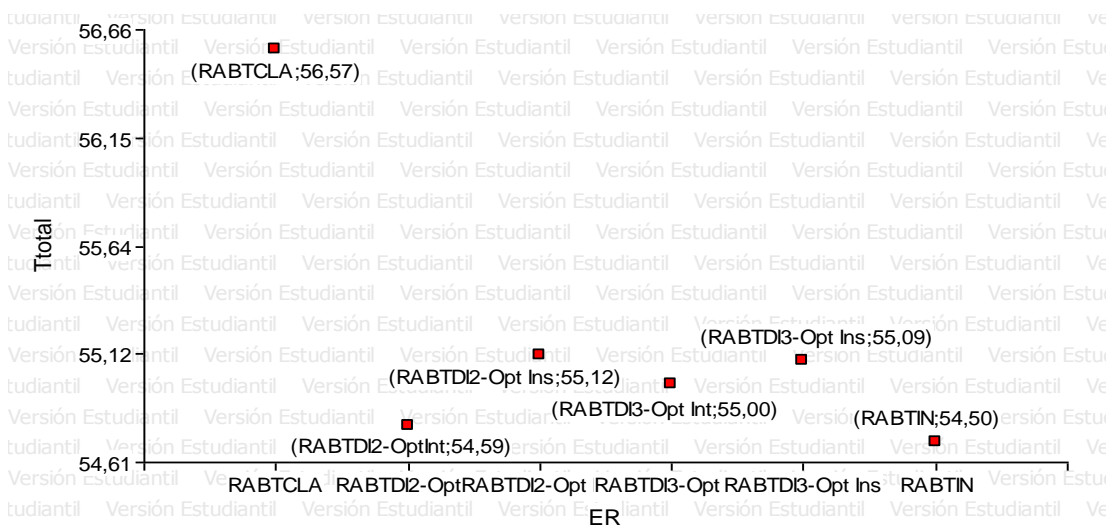
**Tabla 4-7:** ANOVA DOE Parcelas divididas PE2, InfoStat®

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	220919,521	146	1513,1474	2043,37561	<0,0001
ER	113,737365	5	22,7474729	30,7185085	<0,0001
EMMateriales*ER	3,72112684	10	0,37211268	0,50250622	0,88602384
ECL*ER	2,48927673	5	0,49785535	0,67231088	0,64509083
Depot*ER	2,17482803	5	0,43496561	0,58738369	0,70962213
TLAcomodo*ER	1,18832992	5	0,23766598	0,3209475	0,89972581
Error	104,412416	141	0,74051359		
Total	221023,933	287			

Del análisis estadístico de la tabla ANOVA (Tabla 4-7), se detecta que únicamente el efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER) (F2) es significativo sobre el tiempo promedio total de acomodo, ya que el p-valor obtenido es de 0.0001. El análisis de los errores de la parcela, el modelo y la verificación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza, es igual, al presentado en la PE1. De allí, la justificación de no describirlo en esta PE2.

Para desarrollar el análisis gráfico, se representan los tiempos promedios totales, que producen los seis niveles o variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, en la estrategia de ruteo (ER) (F2). De esta manera, se pretende identificar sus diferencias y detectar cuál genera la mejor solución para el problema en estudio. (Figura 4-7).

**Figura 4-7:** Niveles del efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER)



Del gráfico del efecto principal del factor ER (F2) (Figura 4-7), se detecta que los niveles metaheurísticos *RABTIN* y *RABTDI* 2-Opt Int, producen los conjuntos rutas

$CSR_{w \in CSLA_L}$  de menor tiempo total en el acomodo, con valores de 54,50 y 54,59 min/ $CSLA_L$ . Inclusive, se detecta que las dos mejores soluciones detectadas permiten disminuir el tiempo promedio total del acomodo en 2,07 y 1,98 min/ $CSLA_L$  respecto a la implementación del RABTCLA (Ruteo Acomodo Búsqueda Tabú Clásica), lo que genera un aumento en la eficiencia de 3,50 y 3,65%, respectivamente. De esta manera, se muestra cuantitativamente, el aporte que realiza el modelamiento de las estrategias de diversificación e intensificación con relación al RABTCLA, en el problema en estudio.

Para complementar la respuesta a la PE2, a continuación, se presentan los escenarios o combinaciones de niveles, que produjeron las soluciones del menor tiempo total promedio, para el problema en modelamiento. En las combinaciones, se enfatiza en los niveles del factor ER (F2), los cuales, son de interés en la pregunta en estudio (Tabla 4-8).

**Tabla 4-8:** Mejores soluciones para las combinaciones o escenarios con el factor estrategia de ruteo (ER)

Combinación de niveles o escenario	Tiempo total de acomodo ( $CSLA_L$ )
RABTDI 2Opt Int*TLAcomodo 240	= 68,38 min/ $CSLA_L$
RABTIN*TLAcomodo 240	= 68,25 min/ $CSLA_L$
RABTDI 2Opt Int* <i>depot</i> centro	= 55,17 min/ $CSLA_L$
2Opt Int*FCFS	= 70,39 min/ $CSLA_L$
RABTIN*FCFS	= 70,25 min/ $CSLA_L$
RABTIN*Metaheurístico <i>INS</i>	= 39,15 min/ $CSLA_L$
RABTDI 2Opt Int*TLAcomodo 140	= 41,18min/ $CSLA_L$
RABTIN*TLAcomodo 140	= 41,15 min/ $CSLA_L$
RABTDI 2-Opt Int*Grupo K=3 EMMateriales	= 48,17 min/ $CSLA_L$
RABTIN*Grupo K=3 EMMateriales	= 48,12 min/ $CSLA_L$
RABTDI 2-Opt Int*Grupo K=5 EMMateriales	= 43,58 min/ $CSLA_L$
RABTIN*Grupo K=5 EMMateriales	= 43,53 min/ $CSLA_L$

De las soluciones representadas (Tabla 4-8), se obtiene que las combinaciones del nivel RABTIN del factor ER (F1) con los niveles grupo K=5 EMMateriales (Factor 5), grupo K=3 EMMateriales (Factor 5), TLAcomodo 140(F3), TLAcomodo 240(F3) producen los menores tiempos promedios totales para el problema  $CSLA_L$ . A partir de este hallazgo, se selecciona el RABTIN como el mejor RUBT, en el factor estrategia de ruteo (ER)(F2). Para validar los resultados obtenidos se ejecutaron 5 corridas de prueba con las combinaciones de niveles detectadas como las mejores. En cada corrida se modificaron algunas referencias de los productos de las oe para generar diferentes escenarios de evaluación. De los resultados de las pruebas, se comprobó que las combinaciones de

niveles seleccionadas generan los menores tiempos totales de acomodo. De esta manera, se pretende garantizar la validez de los resultados presentados.

**PE3 ¿Analizar, si la mejor variante del metaheurístico de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes en el problema en estudio, permite obtener un menor tiempo total de acomodo, que un metaheurístico de algoritmos genéticos?**

Para responder la PE3, se estudia la ANOVA del diseño de parcelas divididas, que incluye los niveles algoritmos genéticos (nivel 1) y el mejor metaheurístico RABT (Ruteo Acomodo Búsqueda Tabú) (nivel 2) denominado RABTIN, en el factor estrategia de ruteo (F2). A continuación, se presenta la ANOVA de este diseño, calculado la versión académica de InfoStat® (Tabla 4-9).

**Tabla 4-9:** ANOVA DOE parcelas divididas PE3, InfoStat®

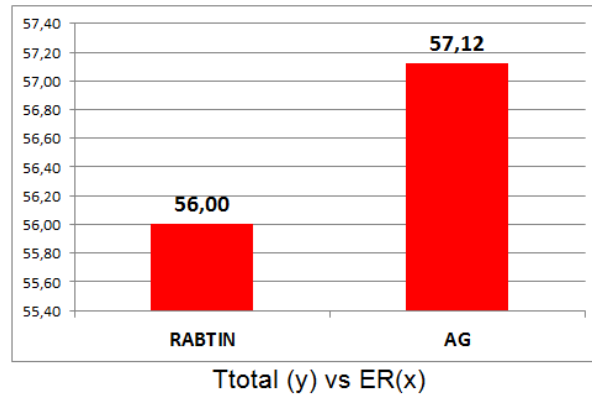
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
ER	30,8153344	1	30,8153344	0,44582369	0,50773498
GrupoKequipos*ER	0,038596	2	0,019298	0,0002792	0,99972085
ECL*ER	0,39680817	1	0,39680817	0,00574086	0,93993917
Depot*ER	1,33198817	1	1,33198817	0,01927066	0,89021272
TLAcomodo*ER	0,3825375	1	0,3825375	0,0055344	0,94102699
Error	3110,40012	45	69,1200026		
Total	75844,5424	95			

De la ANOVA en la PE3 (Tabla 4-9), se detecta, que el efecto principal e interacciones del factor estrategia de ruteo (ER) (F2) no son significativos sobre el tiempo total de acomodo, ya que ninguno de los p-valores, son menores o iguales a 0.05. Aunque, el factor ER (F2) no sea significativo, se requiere determinar, si el nivel mejor metaheurístico RABT produce soluciones de menor tiempo promedio total y mayor eficiencia que el nivel algoritmo genético (n2), en el acomodo. Esto se plantea, porque en la solución del problema en estudio, se tiene que elegir un nivel de la estrategia de ruteo(ER)(F2), que establezca la secuencia  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  a visitar, para acomodar los  $n$  productos  $i$  del  $LA^i \in CSLA_L$ .

Del análisis de la medias para el factor estrategia de ruteo (ER)(F2) (Figura 4-8), se identifica que el nivel RABTIN(nivel 1), genera un ahorro promedio de 1,12 minutos por conjunto de rutas  $CRSw \in CSLA_L$  y un aumento en la eficiencia del 1,96% respecto al nivel algoritmo genéticos (AG) (nivel 2). En el CEDI unidad experimental modelado, en un turno de trabajo, se ubican 10 listas de acomodo, lo que puede producir un ahorro de

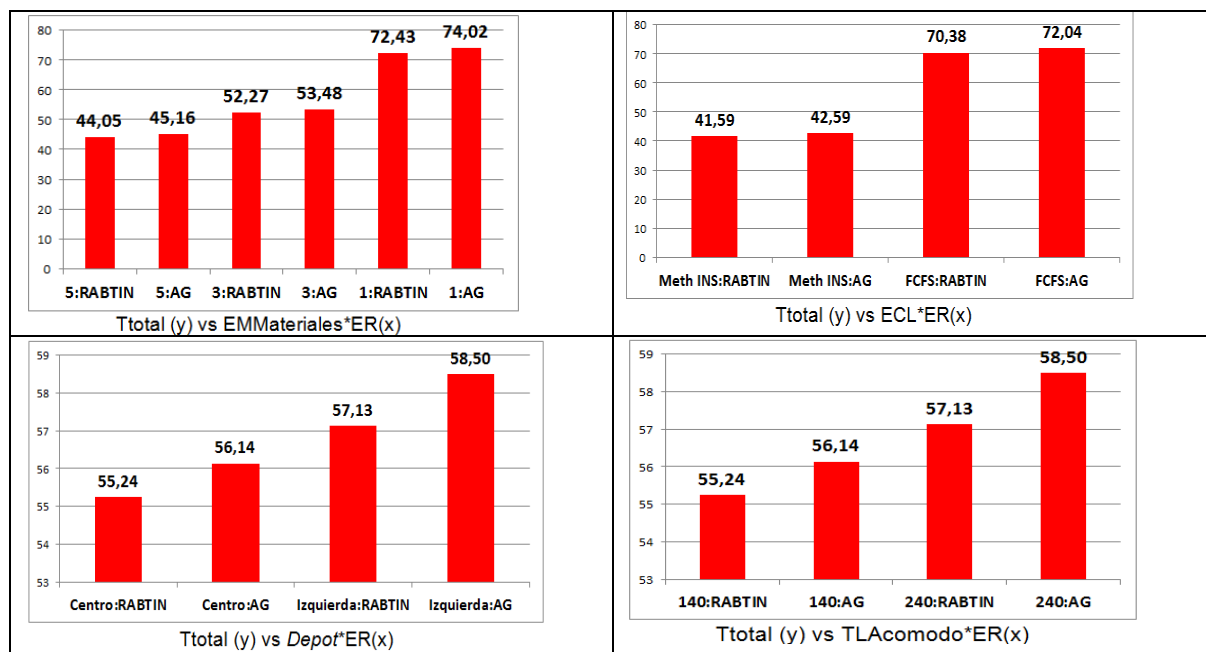
10,13 min/turno aproximadamente. De esta manera, se evidencia, que el mejor RABT contribuye potencialmente al aumento de la eficiencia del acomodo, respecto al tiempo de la operación.

**Figura 4-8:** Tiempos totales promedio efecto principal estrategia de ruteo (ER) (F2)



Para comparar los tiempos promedios totales, que generan las interacciones dobles del factor estrategia de ruteo (ER)(F2) con los otros factores modelados, se analizan los siguientes gráficos de medias desarrollados en InfoStat® (Figura 4-9).

**Figura 4-9:** Gráficos de tiempos totales promedio efecto interacción estrategia de ruteo (ER)(F2) con los otros factores modelados.



De los gráficos de medias (Figura 4-9), se detecta que el nivel RABTIN permite obtener tiempos promedios totales menores que el nivel algoritmo genéticos, para todas las interacciones dobles de los cuatro factores modelados, en el problema. Debe resaltarse, que la disminución de tiempo obtenida es de aproximadamente un 1 minuto/CRSw. De esta manera, se evidencia que el RABTIN, permite incrementar la eficiencia en 1,79% aproximadamente respecto al nivel AG para resolver el componente de ruteo, en el problema en estudio.

**PE4 ¿Qué impacto tiene en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo total, el modelamiento de  $K$  equipos heterogéneos, que permiten ubicar los  $n$  productos  $i$ , en las  $m$  posiciones asignadas del CEDI?**

Para responder esta PE4, se utiliza la misma ANOVA del diseño de parcelas divididas, modelada en la PE1. Por este motivo, a continuación, se representa el efecto principal e interacciones del factor grupo  $K$  EMMateriales heterogéneos, los términos del error de la parcela y del modelo (Tabla 4-10).

**Tabla 4-10:** Tabla ANOVA parcelas divididas, énfasis en el factor grupo  $K$  EMMateriales heterogéneos.

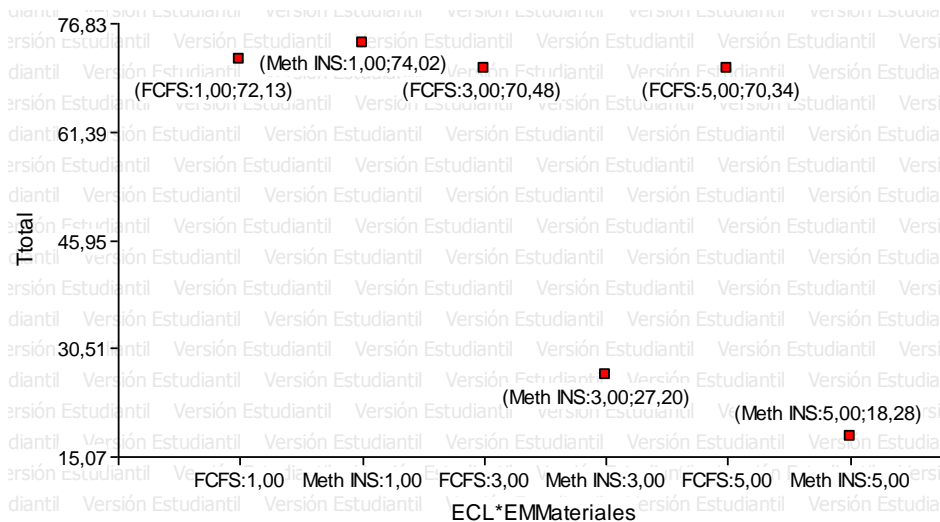
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	220919,521	146	1513,1474	2043,37561	<0,0001
EMMateriales	45930,7841	2	22965,392	8148,52426	<0,0001
EMMateriales*ECL	41507,021	2	20753,5105	28025,8335	<0,0001
EMMateriales*Depot	0,30859511	2	0,15429756	0,2083656	0,8121597
EMMateriales*TLAcomodo	2873,23978	2	1436,61989	1940,03177	<0,0001
EMMateriales*ER	3,72112684	10	0,37211268	0,50250622	0,88602384
Error	104,412416	141	0,74051359		
Total	221023,933	287			

De la tabla ANOVA (Tabla 4-10), se identifica que el efecto principal del factor grupo  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5) y sus interacciones con los factores ECL (F1) y TLAcomodo (F3) son significativos sobre el tiempo total promedio de acomodo, ya que sus p-valores son menores a 0.05. Respecto al análisis estadístico del  $R^2_{ajustado}$ , el error de la parcela principal y error del modelo, se puede indicar que estos son apropiados, y permiten analizar de manera los resultados de la ANOVA.

Para responder la PE5, se realiza un análisis estadístico de los efectos de las interacciones del factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos detectadas como

significativas en la ANOVA. Debe tenerse en cuenta, que las combinaciones de los niveles de interacciones con el menor tiempo promedio total, representan las mejores soluciones para el problema en estudio.

**Figura 4-10:** Gráfico de medias de la interacción grupo de K EMMateriales heterogéneos (F5) y estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1)



De la Figura 4-10, se identifica que las interacciones entre los niveles del factor grupo de  $K=5$  y grupo  $K=3$  EMMateriales con el nivel metaheurístico *INS* de la ECL (F1), producen las soluciones de menor tiempo total con valores de 18,28 y 27,20 min/CSLA<sub>L</sub>. Por su parte, el tiempo promedio total de acomodo para los mismos niveles del factor grupo de K EMMateriales con el nivel estrategia *FCFS* en el factor ECL (F1) son de 70,48 y 70,34 min/CSLPr.

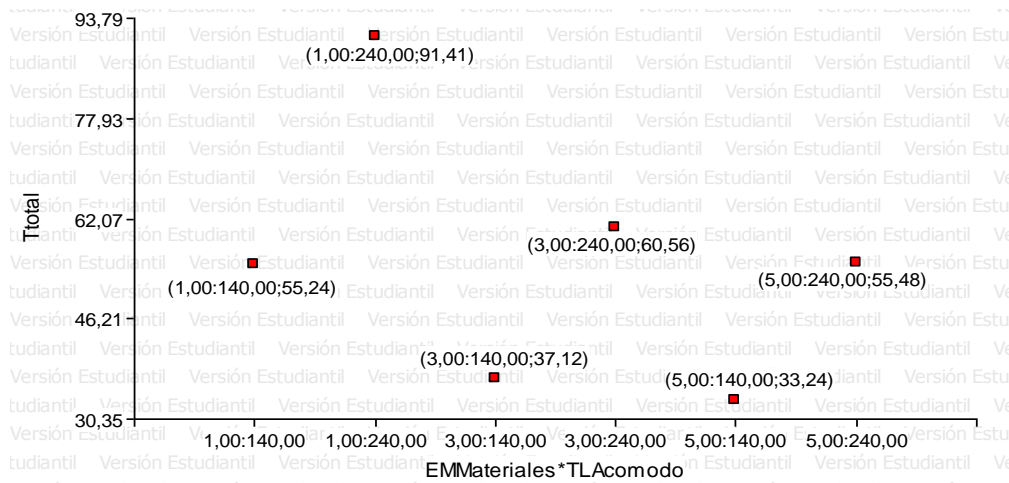
Por lo tanto, se puede inferir, que las combinaciones de niveles metaheurístico *INS* del factor ECL (F1) con los niveles grupo de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales heterogéneos, permite reducir el tiempo promedio total de acomodo en 52,06 y 43,28 min/CSLA<sub>L</sub>, respecto al modelamiento del nivel *FCFS*. Esta reducción permite contribuir al aumento de la eficiencia de la operación en 74,01 y 61,40% / CSLA<sub>L</sub>, respectivamente.

Adicionalmente, debe resaltarse, que la diferencia de tiempo entre la combinación de los niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales con el nivel metaheurístico *INS* es aproximadamente 9 min/CSLA<sub>L</sub>. Por este motivo, se debería realizar un análisis de eficiencia y costos para determinar, si este ahorro de tiempo por CSLPr, justifica la

programación de dos EMMateriales heterogéneos adicionales en el CEDI. Esto se plantea, porque en un turno en el CEDI unidad experimental, se ejecutan 10 conjuntos rutas integrados al CSLA<sub>L</sub>, que generan una disminución del tiempo promedio total de 90 min/turno.

De otra parte, en el efecto de las interacciones de un EMMateriales heterogéneo (K=1) con los niveles *FCFS* y metaheurístico en el factor ECL (F1) presentan una diferencia de 2,30 min/CSLA<sub>L</sub>. A partir de este hallazgo, se puede concluir, que con un equipo heterogéneo (K=1), se puede implementar cualquiera de los niveles del factor ECL (F1), ya que las soluciones al problema en estudio, son similares. Inclusive, se puede recomendar el uso de la *FCFS*, ya que requiere menor uso de capacidad computacional para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo.

**Figura 4-11:** Efecto grupo *K* EMMateriales heterogéneos (F5) con TLAcomodo (F3)



Del efecto de la interacción (Figura 4-11), se detecta que a menor TLAcomodo y mayor cantidad de EMMateriales heterogéneos *K* en un grupo, se producen soluciones de menor tiempo promedio total, para el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo. Las combinaciones (TLAcomodo 140, Grupo K=3), (TLAcomodo 140, Grupo K=5), (TLAcomodo 240, Grupo K=3),(TLAcomodo 240, K=5) generaron las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 37,12; 33,24; 60,56 y 55,48 min/CSLA<sub>L</sub>, respectivamente. De estos resultados, se detectó que las diferencias en el tiempo promedio total entre las combinaciones de niveles entre los grupos de *K*=3 y *K*=5 EMMateriales (F5) con los tamaños de lista TLAcomodo 140 y 240 (F3) son de aproximadamente 4 y 5 min/CSLA<sub>L</sub>. Por este motivo, se debe complementar el análisis

estadístico con un estudio de costos y eficiencia, que permitan determinar, si es necesario programar dos equipos ( $K=2$ ) más, para obtener esa reducción en el tiempo promedio total, en el acomodo.

Por el contrario, las soluciones de menor calidad, corresponden a la interacción de los niveles (TLAcomodo 240 y grupo  $K=1$  equipo) y (TLAcomodo 140 y grupo  $K=1$ ) que generan tiempos promedios totales de 91,41 y 55,24 min/ $CSLA_L$ . A partir de este resultado, se calcula que estas soluciones, aumentan el tiempo promedio total en 22 y 36 min/ $CSLA_L$  y disminuyen la eficiencia en 39,39 y 39,82%, respectivamente, con relación a las mejores soluciones obtenidas para el problema.

A partir del análisis estadístico del efecto principal e interacciones significativas del factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos ( $F5$ ) en la PE5, se puede concluir, que las siguientes combinaciones de niveles generan las mejores soluciones:

Grupo  $K=5$  EMMateriales heterogéneos\*metaheurístico  $INS=18,28$  min/ $CSLA_L$

Grupo  $K=3$  EMMateriales heterogéneos\*metaheurístico  $INS=27,20$  min/ $CSLA_L$

Grupo  $K=5$  EMMateriales heterogéneos\*TLAcomodo140=33,24 min/ $CSLA_L$

Grupo  $K=5$  EMMateriales heterogéneos\*TLAcomodo240=54,24 min/ $CSLA_L$

Finalmente del análisis estadístico, se puede concluir que el factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos ( $F5$ ) y sus interacciones con los factores ECL ( $F1$ ) y TLAcomodo ( $F3$ ) tienen el mayor significativo sobre el tiempo total del acomodo. El soporte de esta afirmación, se basa en: a) los cuadrados medios (CM) de estas interacciones, que son las más altas del modelo con valores de 22965,39 y 1436,62 y b) los tiempos promedios totales, que generaron fueron las mejores soluciones detectadas.

## 4.7 Principales hallazgos y conclusiones de las PE

A partir de las respuestas a las cuatro preguntas planteadas, a continuación, se presentan los principales hallazgos detectados:

Del análisis estadístico de la PE1, se infiere, que el nivel metaheurístico  $INS$  del factor ECL ( $F1$ ) con ruteo, generó soluciones de menor tiempo promedio total, que la regla  $FCFS$ , con una disminución de 31,27 min/ $CSLA_L$  y un aumento de la eficiencia en



44,14% aproximadamente. De esta manera, se detectó la calidad del nivel metaheurístico *INS* para producir buenas soluciones en el problema.

De la PE1, también, se identifica, que las combinaciones del nivel metaheurístico (F1) con los niveles TLAcómo 140 y 240 (F3) produjeron mejores soluciones que las interacciones con el nivel *FCFS*, ya que se obtuvieron reducciones en el tiempo promedio total de la operación de 22,39 y 38,57 min/ $CSLA_L$  min/ $CSLA_L$ . Por su parte, las interacciones entre el nivel metaheurístico *INS* (F1) y los niveles grupo de tres (K=3) y cinco (K=5) EMMateriales crearon las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 27,20 y 18,28 min/ $CSLA_L$ , respectivamente. A partir de estos hallazgos, se infiere, que en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo, se debe configurar el nivel metaheurístico *INS* para el factor ECL (F1), los niveles grupos de tres (K=3) y cinco (K=5) equipos heterogéneos (F5), y un TLAcómo (F3) de 140 o 240.

Del análisis estadístico de la PE2, se identificó que únicamente el efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER) (F2) es significativo sobre el tiempo promedio total de acomodo, ya que el *p-valor* obtenido fue de 0.0001 ( $p\text{-valor} < 0.05$ ). Respecto, a la comparación de las seis variantes del metaheurístico de búsqueda tabú (niveles), se detectó que el RABTIN y RABTDI 2-Opt *Int*, produjeron los conjuntos de rutas  $CRSw \in CSLA_L$  de menor tiempo total con valores de 54,50 y 54,59 minutos.

Del análisis comparativo de los metaheurísticos en la ER (F2), también, se detectó que RABTIN y RABTDI-2OPTInt, generan mejores soluciones que el RABTCLA (Ruteo Acomodo Búsqueda Tabú Clásica), ya que permitieron reducir el tiempo promedio total del acomodo en 2,07 y 1,98 min/ $CRSw$ , y aumentar la eficiencia en 3,50 y 3.65%, respectivamente. Con este hallazgo, se demostró cuantitativamente, el aporte alcanzando, con el modelamiento de las estrategias de diversificación e intensificación a la búsqueda tabú, para contribuir a la eficiencia de la operación de acomodo.

De la PE3, también, se identificó, que el nivel RABTIN permitió obtener soluciones de menor tiempo promedio total, que el nivel algoritmo genético (F2) en todas las interacciones dobles con los otros cuatro factores modelados, en el problema. Debe resaltarse, que la reducción de tiempo calculado en los niveles del factor (ER) fue de un 1 min/ $CRSw$ . Por lo tanto, para un turno de trabajo del CEDI unidad experimental con 10  $CRSw$  a ejecutar, el ahorro total sería de 10 min/turno aproximadamente. De esta

manera, se infirió, que el mejor RABT contribuye potencialmente al aumento de la eficiencia del acomodo, respecto al tiempo y costo de la operación.

De la PE4, se identificó que las combinaciones de niveles metaheurístico *INS* del factor ECL (F1) con los niveles grupo de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales heterogéneos, permitió el tiempo promedio total de acomodo en 52,06 y 43,28 min/*CSLA<sub>L</sub>*, respecto al modelamiento del nivel *FCFS*. Esta disminución permitió el incremento de la eficiencia de la operación en 74,01 y 61,40%, respectivamente. De otra parte, en la PE4, también se detectó que a menor *TLAacomodo* y mayor cantidad de EMMateriales heterogéneos  $K$  en un grupo, generaron soluciones de menor tiempo promedio total, en el acomodo. Las combinaciones (*TLAacomodo* 140, Grupo  $K=3$ ), (*TLAacomodo* 140, Grupo  $K=5$ ), (*TLAacomodo* 240, Grupo  $K=3$ ), (*TLAacomodo* 240,  $K=5$ ) produjeron las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 36,71; 33,23; 60,56 y 54,97 min/*CSLA<sub>L</sub>*, respectivamente.

A partir de los resultados de la PE4, se concluyó que el factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5) y sus interacciones con los factores ECL (F1) y *TLAacomodo* (F3) tienen el mayor efecto significativo sobre el tiempo total del acomodo. Esta conclusión, se sustenta en el análisis de medias y los valores de cuadrados medios (CM) de las interacciones.

Como síntesis de las respuestas de las cuatro PE, se identificó que los siguientes niveles de los factores modelados, pueden producir las soluciones de menor tiempo promedio total, para el problema de conformación de lotes con ruteo (Tabla 4-11). Para facilitar la presentación de los niveles, estos se dividen para las *TLAacomodo* 140 y 240, ya que la cantidad de productos que se deben acomodar en un *CSLA<sub>L</sub>*, impacta en el tiempo promedio total del acomodo.

**Tabla 4-11:** Mejores Combinaciones de factores obtenidas del análisis estadístico en PE

TLAacomodo 140	
Estrategia conformación de lotes(ECL)(F1)	Metaheurístico <i>INS</i> (nivel 1)
Estrategia de ruteo(ER)(F2)	RABTIN
<i>Depot</i> (F4)	Centro
Grupo de equipos heterogéneos(F5)	$K=5$ ó $K=3^*$
TLAacomodo 240	
Estrategia conformación de lotes(ECL)(F1)	Metaheurístico <i>NS</i> (nivel 1)
Estrategia de ruteo(ER)(F2)	RABTIN
<i>Depot</i> (F4)	Izquierda
Grupo de equipos heterogéneos(F5)	$K=5$

Nota 1: \* Diferencia de las soluciones de las combinaciones de niveles del factor grupo  $K$  equipos (F5) con nivel metaheurístico INS (F1) de cuatro minutos aproximadamente. Esta interacción fue detectada con mayor peso en el problema en estudio, ya que su CM en la ANOVA fue de 41507,02.

De los resultados de las cuatro PE (Tabla 4-11), se detecta que los niveles metaheurístico *INS* (nivel 2, F1), la estrategia de ruteo RABTIN (nivel 6, F2), *depot* en el centro (nivel 1, F3), grupos de  $K=3$ (nivel 2, F5) y  $K=5$ (nivel 3, F5) EMMateriales heterogéneos, permiten obtener las soluciones de menor tiempo promedio total. Inclusive, las combinaciones descritas permiten la reducción del tiempo promedio total respecto a otros escenarios en el acomodo en un rango de 21,59 y 52,46 *min/CSLA<sub>L</sub>*, y un incremento en la eficiencia potencial de la operación entre 39,39 y 74, 59%. Para validar que la mejor combinación de niveles seleccionada generará los menores tiempos promedios totales de acomodo, se ejecutaron 5 corridas de prueba. En cada corrida se modificaron algunas referencias de los productos de las *oe* para configurar diferentes escenarios de validación. De los resultados de las pruebas, se validó que la combinación de niveles seleccionado produjo los menores tiempos totales de acomodo. Con este enfoque, se busca garantizar la validez de los resultados obtenidos.

Finalmente, de los resultados de las cuatro PE, se puede concluir, que los metaheurísticos y regla integrados al *WMS*, permiten resolver de una manera integrada y simultánea, el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo. Un aporte del enfoque desarrollado, es que considera  $n$  productos  $i$  a ubicar,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y  $K$  equipos heterogéneos. De esta manera, se valida el funcionamiento de los modelos desarrollados, y se soporta cuantitativamente, el aporte al estado del arte planteado en la presente tesis.

## 5. Problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos con $K$ equipos heterogéneos e inventario disponible

La preparación de pedidos (*picking*) es una operación del CEDI, que se encarga de recoger los  $n$  productos  $i$  solicitados en las órdenes de los clientes (OC), con el fin de atender los requerimientos en el tiempo pactado y al menor costo posible (De Koster y Van Der Poor, 1998; Henn y Wäscher, 2012). Por estos motivos, esta operación, no solo impacta en el nivel de servicio al cliente, sino que representa entre un 55 y 65% de los costos totales del CEDI (Koster y Van Der Poor, 1998; Theys *et al.*, 2010).

Para Henn y Wäscher (2012), existen tres problemas de planeación en el nivel operativo del CEDI como: i) asignación de productos a las posiciones de almacenamiento (*slotting*); ii) agrupar las órdenes de los clientes en lotes (*order batching*) y iii) configurar rutas de preparación de pedidos (*picking routing*). Según el autor los problemas listados impactan en la eficiencia y eficacia de la gestión de almacenes o el CEDI.

De los resultados de la SLR, se obtiene que los artículos relacionados con la conformación de lotes y ruteo de la preparación de pedidos sólo modelaban un Equipo de manejo de materiales (EMMateriales) de capacidad fija o  $K$  homogéneos, no consideraban la integración con un WMS, ni modelaban el inventario de los productos a recoger. A partir de estos hallazgos, se identifica la oportunidad de investigación, de desarrollar una regla de prioridad y metaheurísticos sincronizados a un WMS, para resolver un problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, que se representa con la sigla PCLRP. El problema a representar considera  $n$  productos  $i$  asociados a las OC,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ ,  $K$  EMMateriales heterogéneos y la condición de disponibilidad del inventario. En el modelamiento del problema, los  $K$

EMMateriales heterogéneos pueden tener diferentes capacidades de carga  $c$ , velocidades  $v$  y manejo de productos en altura  $h$ .

El presente capítulo presenta los siguientes objetivos

- Desarrollar la estructura del problema, que permite modelar la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo en la preparación de pedidos.
- Formular matemáticamente la función objetivo y restricciones del problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, considerando  $K$  EMMateriales heterogéneos y la disponibilidad del inventario.
- Modelar las reglas y metaheurísticos integrados a un *WMS*, para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.

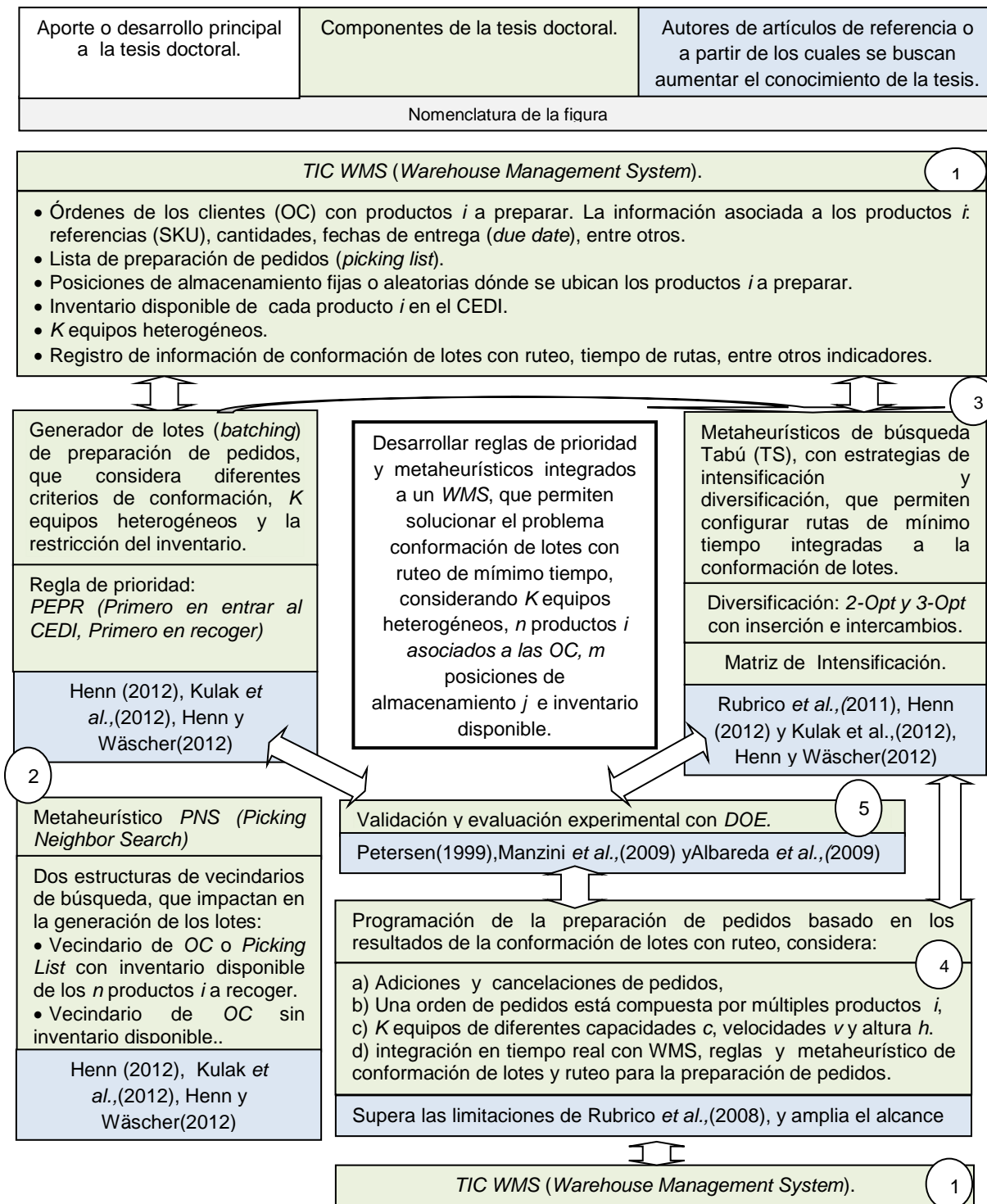
## 5.1 Estructura del problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos

En esta sección, se presenta la estructura del problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, el cual, se resuelve con reglas de prioridad y metaheurísticos integrados a un *WMS*. La estructura, que se desarrolla, se obtiene del análisis de los resultados *SLR* (1.1) y de la literatura relacionada con la conformación de lotes con ruteo en esta operación del CEDI.

A continuación, se representa la estructura del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos (Figura 5-1). Para facilitar su entendimiento, se utiliza el siguiente código de colores i) el verde simboliza un componente del problema a desarrollar; ii) el azul representa los autores referenciados para elaborar la estructura y iii) el blanco se emplea para representar el aporte principal de la estructura.

El primer componente de la estructura es un *WMS* (número 1) (Figura 5-1), que permite gestionar la información relacionada con los  $n$  productos  $i$  solicitados *OC*, las listas de preparación (*picking list*), la administración de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , los  $K$  EMMateriales heterogéneos y el inventario. Adicionalmente, el *WMS*, se integra con las reglas de prioridad y metaheurísticos, que permiten resolver los componentes de conformación de lotes (componente 2), ruteo (componente 3) y programación (componente 4) de la preparación de pedidos.

Figura 5-1: Estructura de problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.



El problema de conformación lotes con ruteo, en la preparación de pedidos (PCLRP) (número 2 y 3), se soluciona de manera integral y paralela. Esto se establece, porque al

generar los lotes con  $n$  productos  $i$  a recoger, simultáneamente se diseñan rutas con  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , que se deben visitar para recogerlos en el menor tiempo total posible.

El segundo componente de la estructura (número 2), es un generador de lotes de preparación de pedidos *CSLPr*, que se modela con la regla *PEPR* (Primero en Entrar al CEDI, Primero a Recoger) o el metaheurístico *PNS* (*Picking Neighborhood Search*). La regla de prioridad *PEPR* ha sido utilizada en la literatura científica para resolver este problema, por la facilidad de modelamiento matemático y bajo consumo de capacidad de procesamiento computacional. Por su parte, el metaheurístico *PNS*, ejecuta un procedimiento de búsqueda en vecindarios inteligentes, que permite crear y evaluar combinaciones factibles de  $n$  productos  $i$  y  $k \in K$  EMMateriales heterogéneos, considerando la condición de disponibilidad de inventario. Debe resaltarse, que la regla de prioridad tiene la limitante de generar una única combinación factible del *CSLPr*, ya que no desarrolla búsquedas sistemáticas en el vecindario como lo realiza el metaheurístico *PNS*.

Para conformar cada lote  $LP' \in CSLPr$  (número 2), se deben considerar dos estructuras de vecindarios. El primer vecindario, se compone de las *OC* con inventario disponible para los  $n$  productos  $i$  a recoger. En tanto, el segundo vecindario, se forma por las *OC* que tienen, por lo menos un producto  $i$  con rotura de inventario. En el momento, que exista inventario para todos los productos  $i$  de la *OC*, esta se traslada al primer vecindario. En el apartado 5.4, se describe con mayor detalle la estructura de los dos vecindarios descritos.

El tercer componente (número 3) consiste en configurar conjuntos rutas *CRQw* integrados a los lotes *CSLPr* conformados, implementando un metaheurístico de búsqueda tabú clásico o alguna de las cinco variantes de este, que modelan estrategias de diversificación e intensificación (Rubrico et al., 2008; Kulak et al., 2012, Henn y Wäsher, 2012). En el apartado 5.4.3, se describen y modelan los metaheurísticos de ruteo integrados a la conformación de lotes, en la preparación de pedidos.

El componente de programación (número 4), consiste en determinar el orden de recogida de cada uno de los  $LP' \in CSLPr$  formados, implementando el conjunto de rutas *CRQw* diseñadas. El enfoque de programación que se desarrolla en la tesis considera las siguientes características: i) adiciones y cancelaciones de *OC*, ii) una nueva *OC* está compuesta por múltiples productos  $i$  de diferentes *SKU*, iii) se modelan  $K$  EMMateriales

heterogéneos, iv) la información de los lotes con ruteo, incluyendo la disponibilidad del inventario se gestiona en tiempo real a través del *WMS*. Con el enfoque planteado de programación, se superan limitaciones de la propuesta de Rubrico *et al.*,(2011), que representa el estado del arte del tema.

En el componente de validación y evaluación experimental (número 5), se pueden implementar modelos de diseño de experimentos (*DOE, Design of Experiment*) como el factorial completo, parcelas divididas, entre otros. La validación experimental por medio de *DOE* no solo permite comparar el desempeño de la regla y metaheurísticos sino también identificar las combinaciones de niveles de los factores que generan las soluciones de menor tiempo total para el problema en estudio. Este componente debe considerarse como un aporte metodológico al conocimiento, debido a la apropiación del *DOE* en el análisis y validación del problema.

Finalmente, el resultado de la conformación de lotes con ruteo, y su respectiva programación se registra en el *WMS* (componente 1), con el fin de generar reportes de desempeño de la operación y suministrar información a otras operaciones del CEDI.

## 5.2 Formulación matemática del problema de conformación de lotes con ruteo de preparación de pedidos

El propósito de esta sección es formular el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos que se representa con la sigla PCLRP. Par formular el problema, se tomaron componentes de autores como Prins (2009), Henn (2012) y Leung *et al.*, (2013), los cuales usan y adaptan algunos componentes del *HVRP (Heterogeneous Vehicle Routing Problem)* y el *TSP (Travelling Salesman Problem)*. La notación, parámetros y variables de decisión son presentados a continuación:

Índices y conjuntos:

$h, j \in L$	Posiciones de almacenamiento.
$G \subseteq L$	Subconjunto de posiciones de almacenamiento.
$k \in K$	Conjunto de equipos de manejo de materiales heterogéneos.
$r \in R$	Conjunto de lotes de preparación de pedidos $LP^r \in CSLPr$ , los cuales



tienen asociados una ruta ( $q^r$ )  $w$  del conjunto de rutas (CRQ)  $W$ .

$i \in I$  Producto  $i$  perteneciente a una *picking list* o una órden del cliente (OC).

Parámetros:

- $d^{hj}$  Distancia entre las posiciones de almacenamiento  $h$  y  $j$
- $V_k^r$  Velocidad de viaje (m/s) de un EMMateriales  $k \in K$
- $tbe_{kij}$  Tiempo de búsqueda, extracción y manipulación de un producto  $i \in I$  desde la posición de almacenamiento  $j$ , usando un EMMateriales  $k \in K$
- $b_i$  Cantidad de producto  $i$  a ser recogido de un lote  $LP^r \in CSLPr$
- $P_{ij}$  Cantidad de inventario almacenado en una posición de almacenamiento  $j$
- $ALC_k$  Capacidad de carga disponible de un EMMateriales  $k \in K$

Variables de decisión

- $S_{hj}^r = \begin{cases} 1, & \text{Si un posición } j \text{ es visitada inmediatamente después de una posición } h \text{ en una} \\ & \text{ruta asociada a un lote } LP^r \in CSLPr \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$
- $X_i^r = \begin{cases} 1, & \text{Si un producto } i \text{ esta asignado a un } LP^r \in CSLPr \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$
- $Y_k^r = \begin{cases} 1, & \text{Si un EMMateriales } k \text{ es asignado a una ruta asociada a un } LP^r \in CSLPr \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$
- $N_j^r = \begin{cases} 1, & \text{Si una posición } j \text{ es visitada dentro de una ruta asociada a un } LP^r \in CSLPr \\ 0, & \text{De otro modo} \end{cases}$

Formulación del modelo:

$$\begin{aligned} \text{Min } T = & \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V_k^r} \cdot S_{hj}^r \cdot Y_k^r \\ & + \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y_k^r \cdot X_i^r \end{aligned} \quad (5.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R} X_i^r = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in I} b_i \cdot X_i^r \leq \sum_{k \in K} ALC_k Y_k^r \quad \forall r \in R, k \in K \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in L, j \neq h} S^r_{hj} = N^r_h \quad \forall r \in R, h \in L \quad (5.4)$$

$$\sum_{h \in L, j \neq h} S^r_{hj} = N^r_j \quad \forall r \in R, j \in L \quad (5.5)$$

$$N^r_j \geq P_{ij} X^r_i \quad \forall r \in R, j \in L, i \in I \quad (5.6)$$

$$\sum_{j \in G, h \in L \setminus G} S^r_{hj} \geq N^r_j \quad \forall r \in R, G \subseteq L \quad (5.7)$$

$$S^r_{hj}, X^r_i, Y^r_k, N^r_j \in (0,1) \quad (5.8)$$

La función objetivo (5.1) minimiza el tiempo total del *CSLPr*. La restricción (5.2) asegura que se asigne cada producto  $i$  exactamente a un  $LP^r \in CSLPr$ . La restricción (5.3) garantiza que la capacidad de carga de cada equipo  $k \in K$  no es excedida por los productos  $i$  asignados a los  $LP^r \in CSLPr$ . Las restricciones (5.4) y (5.5) controlan que cada posición de almacenamiento  $j$  de las rutas integradas a cada  $LP^r \in CSLPr$  tiene un predecesor y sucesor. La restricción (5.6) asegura que una posición de almacenamiento  $j$  que es visitada por alguna ruta asociada a un  $LP^r \in CSLPr$  ( $N^r_j = 1$ ) si existe producto  $i$  almacenado en la posición  $j$  ( $P_{ij} = 1$ ) (inventario disponible. La restricción (5.7) busca prevenir subrutas en el conjunto de  $L$  posiciones de almacenamiento de las rutas integradas a cada  $LP^r \in CSLPr$ . La restricción (5.8) asegura que las variables de decisión son positivas.

Finalmente, las siguientes condiciones de inventario deben ser satisfechas, con el fin de asegurar la factibilidad de las soluciones del problema:

$$P_i \geq \sum_{r \in R} b_i^r \quad \forall i \in I \quad (5.9)$$

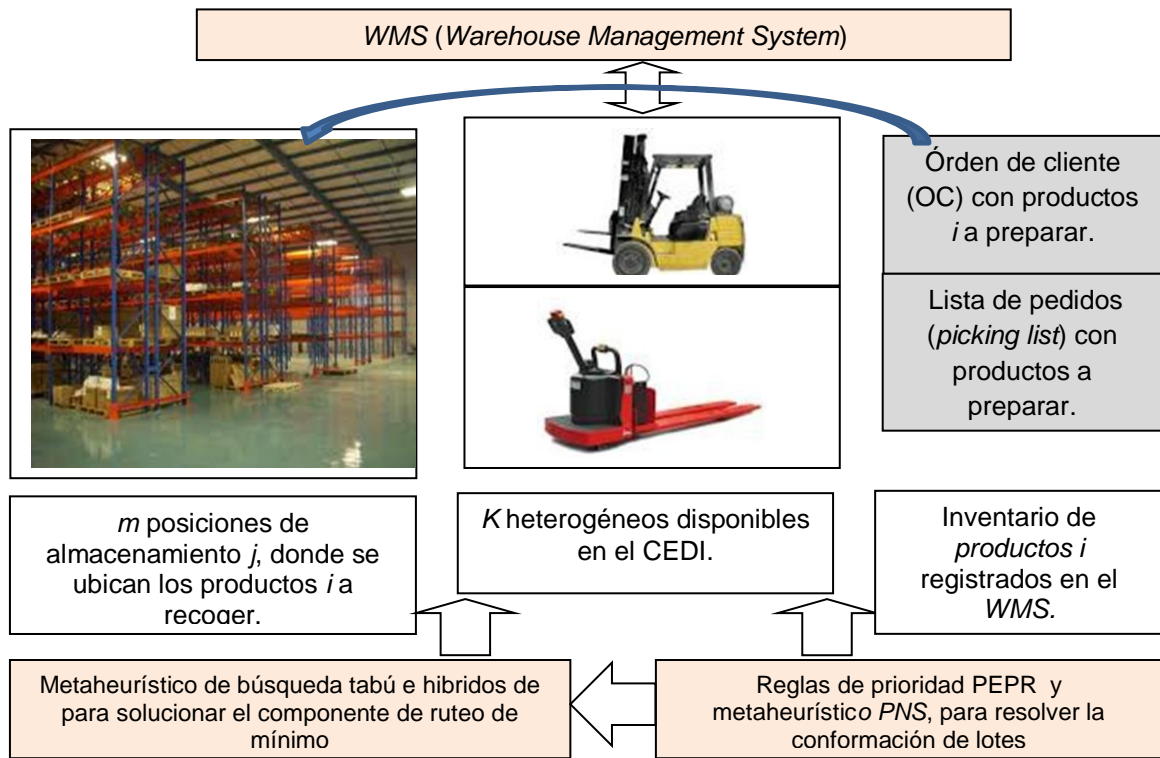
$$P_{ij} \geq \sum_{r \in R} b_i^r X^r_i \quad \forall i \in I, j \in L \quad (5.10)$$

Las condiciones (9) y (10) chequean la disponibilidad de inventario en el CEDI y cada posición de almacenamiento de las rutas integradas a los  $LP^r \in CSLPr$ .

### 5.3 Representación problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos

En esta sección, se realiza una representación del *PCLRP*, en la preparación de pedidos. Dentro de la representación, se incluyen las reglas de prioridad y los metaheurísticos integrados al *WMS*, que permiten resolver el problema en modelamiento (Figura 5-2).

**Figura 5-2:** Representación de la conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos



De la representación (Figura 5-2), se identifica las interacciones de la regla prioridad y los metaheurísticos integradas a un *WMS*, con las órdenes de los clientes (OC), los *K* EMMateriales heterogéneos, las *m* posiciones de almacenamiento *j*, y el inventario, en el modelamiento del *PCLRP*.

Debido a la importancia de las relaciones de información y recursos, que se presentan en el problema en estudio, a continuación, se describen las más relevantes, que se detectaron en el *SLR* (Tabla 5-1).

**Tabla 5-1:** Relaciones de información y recursos en el problema en modelamiento

Productos $i \in OC$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo se puede asignar a un <math>LP^r \in CSLPr</math>.</li> <li>• Se encuentra ubicado en una o varias posiciones de almacenamiento <math>j</math> del CEDI.</li> <li>• Clasificación de que productos <math>i</math> pueden recogerse de las posiciones de almacenamiento <math>j</math>, empleando los equipos heterogéneos disponibles en el CEDI.</li> <li>• Se registran en el <i>WMS</i> considerando:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nombre de la referencia (<i>SKU</i>) del producto <math>i</math>.</li> <li>- Pedido del cliente (<i>oc</i>) al que pertenece.</li> <li>- Fecha de entrega de la orden del cliente (<i>OC</i>).</li> <li>- Cantidad del producto <math>i</math> a preparar.</li> <li>- <i>EMMateriales</i> heterogéneos <math>k \in K</math>, que pueden recoger los productos <math>i</math>.</li> <li>- Posiciones de almacenamiento <math>j</math>, en que se encuentra ubicados los productos <math>i</math> a preparar.</li> </ul> </li> </ul>
Inventario
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si se presenta una rotura de inventario para un producto <math>i \in OC</math>, se debe registrar en una lista de pendientes de programar para la conformación de lotes.</li> <li>• En el momento que el producto <math>i</math> tenga inventario disponible, se retira de la lista y se etiqueta como asignable para la conformación de lotes.</li> <li>• Respecto a la administración del inventario apoyado en el uso <i>WMS</i>, se considera:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestionar el inventario de los productos <math>i</math> ubicados en las posiciones de almacenamiento <math>j</math>, en el CEDI.</li> <li>- Registrar inventario de productos <math>i</math> en tránsito.</li> <li>- Registrar inventario de productos <math>i \in OC</math> asignado a un <math>LP^r \in CSLPr</math>.</li> <li>- Gestionar las roturas o faltantes de inventario de productos <math>i</math></li> <li>- Administrar la salida del inventario de los productos <math>i</math>.</li> </ul> </li> </ul>
$K$ <i>EMMateriales</i> heterogéneos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El <i>EMMateriales</i> heterogéneo <math>k \in K</math> programado a un <math>LP^r \in CSLPr</math>, debe cumplir con las restricciones de peso, volumen, naturaleza de la carga, desplazamientos verticales (altura) y horizontales para recoger los <math>n</math> productos <math>i</math> de las <math>m</math> posiciones de almacenamiento <math>j</math>.</li> <li>• Cada <i>EMMateriales</i> <math>k \in K</math> debe registrarse en el <i>WMS</i> considerando:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- Un nombre y código. El código inicia cubre desde 1 hasta <math>K</math></li> <li>- Capacidad disponible (<i>cd</i>) (volumen, peso o unidades)</li> <li>- Características operativas (velocidad <math>v</math>(km/h) y altura máxima que puede alcanzar <math>h</math>(m)</li> <li>- Posiciones de almacenamiento <math>j</math> del CEDI, que puede acceder para recoger productos <math>i</math>.</li> </ul> </li> </ul>

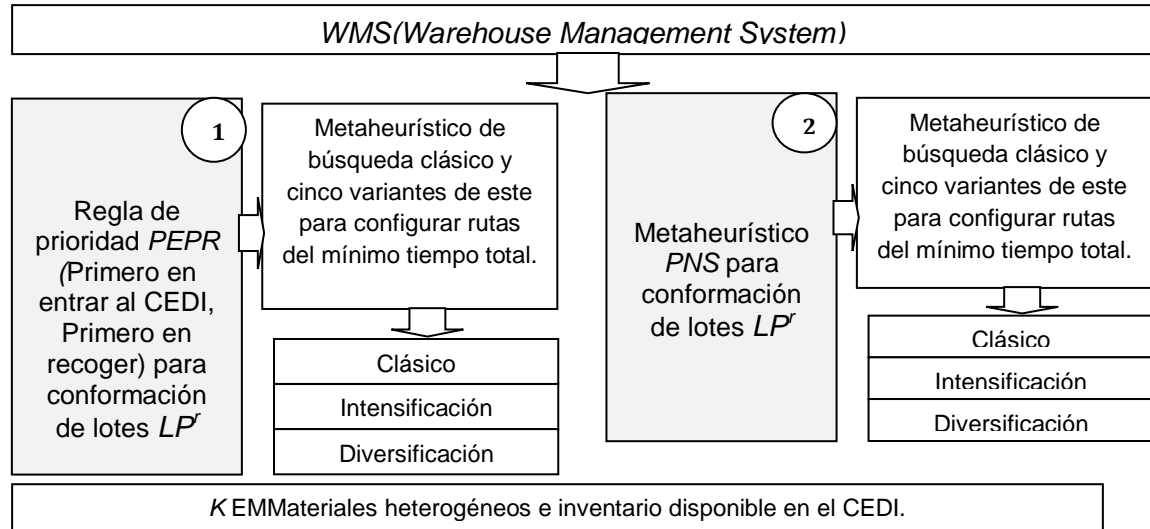
Las relaciones de la información y los recursos presentados (Tabla 5-1), impactan en el modelamiento de la regla de prioridad y los metaheurísticos integrados al *WMS*, para la solución del *PCLRP*. De allí, la importancia de la adecuada identificación y caracterización de la información y recursos descritos.

## 5.4 Modelamiento de regla y metaheurísticos integrados a un *WMS* en el *PCLRP*

En esta sección se modela una regla de prioridad y metaheurísticos sincronizados a un *WMS*, para resolver el *PCLRP* considerando  $K$  *EMMateriales* heterogéneos y la

condición de la disponibilidad del inventario. A continuación, se muestra la relación de la regla de prioridad y los metaheurísticos para solucionar los componentes de conformación de lotes y ruteo, respectivamente (Figura 5-3).

**Figura 5-3:** Regla y metaheurísticos para la conformación de lotes  $LP' \in CSLPr$ .



La regla de prioridad *PEPR* se modela para resolver el componente de conformación de lotes  $LP' \in CSLPr$  (Figura 5-3). Con esta regla los  $n$  productos  $i \in OC$ , se asignan a cada lote  $LP' \in CSLPr$  en formación teniendo en cuenta la fecha más temprana de llegada de las  $OC$ . En tanto, el metaheurístico *PNS* (Figura 5-3) permite crear y evaluar sistemáticamente combinaciones factibles de  $n$  productos  $i$  con inventario disponible y  $k \in K$  EMMateriales heterogéneos, para generar los  $LP' \in CSLPr$ . Una vez, el conjunto de lotes es formado, se implementa un metaheurístico de búsqueda tabú o una de sus variantes para obtener rutas del mínimo tiempo total posible. Por lo tanto, se configura un conjunto de rutas  $CRQw$ , se compone de  $r$  rutas  $q'_w$ , que permiten recoger los productos  $i \in CSLPr$  de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , empleando el EMM  $k \in K$  asignado y cumpliendo la restricción de disponibilidad del inventario. En el anexo A, se describen las funcionalidades del *WMS* que integra las reglas y metaheurísticos descritos para resolver los componentes de este problema.

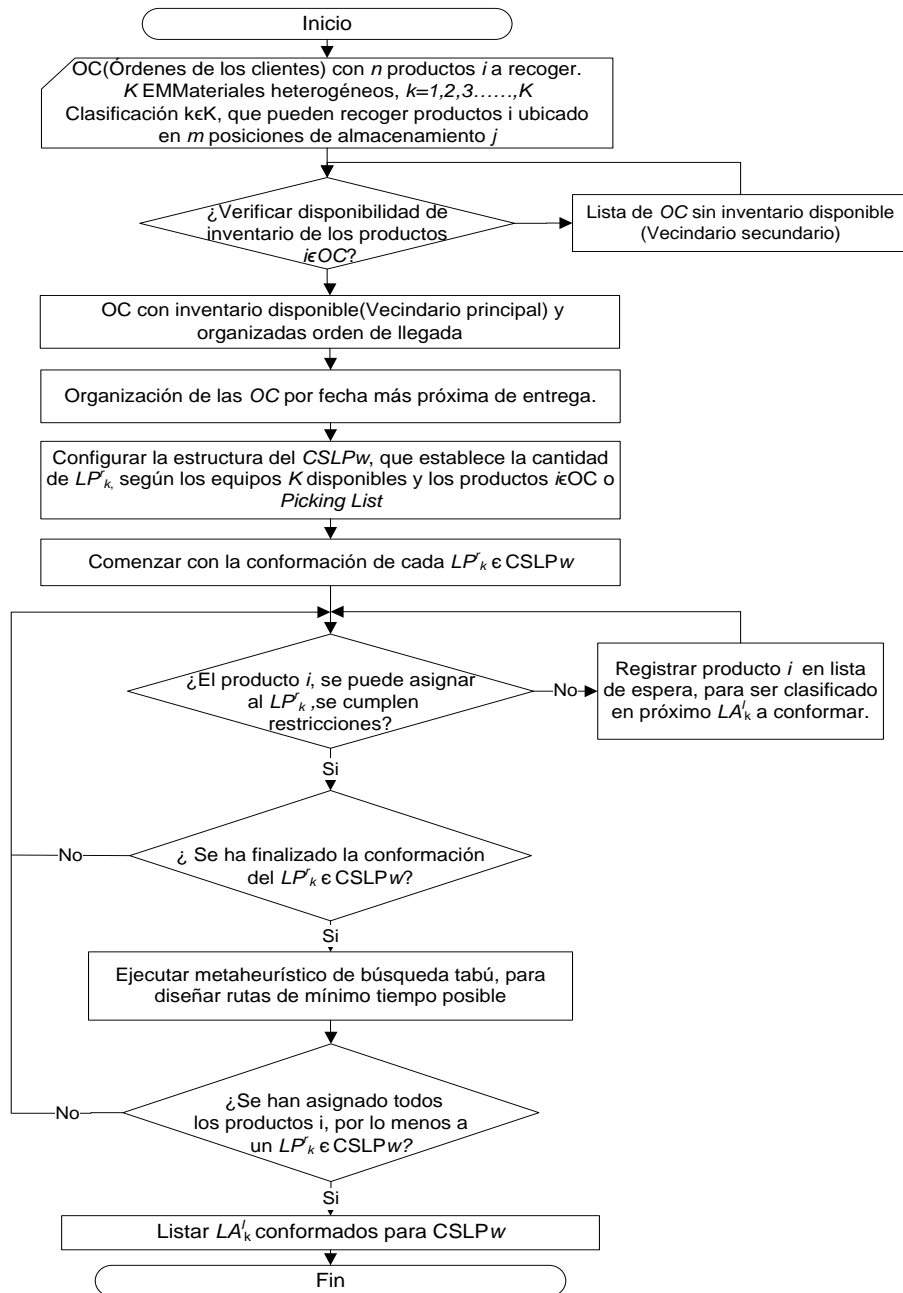
### 5.4.1 Reglas de prioridad para conformación de $LP'$ con ruteo

Esta regla tiene como objetivo conformar lotes  $LP' \in CSLPr$  considerando el criterio del tiempo de llegada más temprana de las  $OC$  al *CEDI*. Esta regla ha cobrado interés, ya

que permite priorizar los pedidos, lo cual, puede mejorar la respuesta a los clientes (Henn y Wäscher, 2012). A continuación, se presentan las etapas de implementación (

Figura 5-4).

Figura 5-4: Regla **PEPR** para conformar  $LP_k \in CSLP_w$



El modelamiento de la regla **PEPR** (

Figura 5-4) inicia con la recepción de las OC en la ventana de tiempo planeada. Luego, las OC son ordenadas por el criterio de fecha más temprana de llegada al CEDI. Posteriormente, se evalúa la disponibilidad del inventario de los  $n$  productos  $i \in OC$ . En caso, que se presente una rotura de inventario, en por lo menos uno de los productos  $i \in OC$ , esta se registra en una lista de pendientes, la cual, se denomina vecindario secundario. Una vez exista inventario, las OC se trasladan a un vecindario principal que contiene las OC con inventario disponible.

Una vez se verifica la condición de inventario, se comienza con la formación de lotes, que consiste en asignar los productos  $i \in OC$  (*Picking List*) del vecindario principal a cada  $LP^r \in CSLPr$  hasta completar la capacidad disponible (cd) de los  $K$  EMMateriales asignados. Al finalizar la conformación de los lotes, se debe verificar que todos los productos  $i \in OC$  se encuentren asignados a un solo  $LP^r \in CSLPr$  y se cumplan las demás restricciones establecidas para el PCLRP.

Finalmente, a cada  $LP^r \in CSLPr$ , se implementa uno de los metaheurísticos de búsqueda tabú, para generar rutas, para recoger los  $n$  productos  $i \in CSLPr$  de las posiciones de almacenamiento  $j$ , en el menor tiempo posible, empleando el EMMateriales  $k \in K$  asignados.

#### **5.4.2 Metaheurístico para la conformación de lotes de preparación de pedidos $LP^r$ con ruteo, considerando $K$ EMMateriales heterogéneos y el inventario disponible**

Se desarrolla un metaheurístico integrado a un WMS denominado PNS (*Picking Neighborhood Search*), que permite solucionar el componente de conformación de lotes  $LP^r \in CSLPr$ , en el PCLRP. El metaheurístico PNS genera y evalúa combinaciones factibles de  $n$  productos  $i \in OC$  y EMMateriales  $k \in K$  heterogéneos, que permite formar cada lote  $LP^r \in CSLPr$ . Debe tenerse en cuenta que un conjunto de lotes  $CSLPr$  es generado en el PCLRP, ya que se pueden modelar simultáneamente  $K$  Emmateriales heterogéneos, según las características de la operación de preparación de pedidos a ejecutar. A continuación, se presentan las etapas del metaheurístico PNS.

- Etapa 1: Clasificar que EMMateriales  $k \in K$  heterogéneos, pueden emplearse para recoger los  $n$  productos  $i \in OC$  ubicados en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ .

Se elabora un procedimiento en el *WMS*, que clasifica que *EM* Materiales heterogéneos  $k \in K$ , pueden ser asignados para recoger cada uno  $n$  productos  $i \in OC$ , ubicados en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ . Cada *EM* Materiales  $k \in K$  disponible en el *CEDI* es clasificado porque estos pueden tener diferentes capacidades de carga disponible (*cd*), velocidades de desplazamiento  $v$ , y una altura máxima  $h$  (desplazamientos verticales). Por este motivo, un *EM* Materiales  $k \in K$  puede presentar restricciones para recoger un producto  $i$  o visitar una posición de almacenamiento  $j$ . A continuación, se presenta la estructura de la clasificación descrita (Tabla 5-2).

**Tabla 5-2:** Clasificación de  $k \in K$  *EM* Materiales en el *PCLRP*.

Producto 1				Producto 2				Producto i			
Pos 1	Pos 2	.....	Pos j	Pos 1	Pos 2	.....	Pos j	Pos 1	Pos 2	.....	Pos j
EM <sub>1</sub>	EM <sub>3</sub>	.....	EM <sub>k</sub>	EM <sub>1</sub>	EM <sub>3</sub>	.....	EM <sub>k</sub>	EM <sub>1</sub>	EM <sub>3</sub>	.....	EM <sub>k</sub>

- Etapa 2: Conformar conjunto de solución inicial de lotes de preparación ( $CSLP_{r_{inicial}}$ ).

Se genera un conjunto inicial de lotes  $CSLP_{r_{inicial}}$ , que se compone de cada  $LP^r$ , que contiene los  $n$  productos  $i \in OC$  a recoger de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , empleando el *EM* Materiales  $k \in K$  asignado.

La formación de los  $LP^r \in CSLP_{r_{inicial}}$  comienza con la ordenación de los  $n$  productos  $i \in OC$  por orden de llegada al *CEDI*, utilizando la regla PEPR (Primero en Entrar, Primero en Recoger). Además, se evalúa si existe inventario para los productos  $i \in OC$ , con el fin de establecer, si pueden ser programados para conformación de  $LP^r \in CSLP_{r_{inicial}}$ . En caso, que exista rotura de inventario para un producto  $i \in OC$  esta se etiqueta como pendiente de asignar hasta que tenga inventario disponible (vecindario secundario).

Para conformar el conjunto inicial, se diseña una estructura con  $r$  lotes de preparación  $LP^r \in CSLP_{r_{inicial}}$  que facilita la asignación los  $n$  productos  $i \in OC$  a recoger (Tabla 5-3). El número de  $LP^r$  asociados a  $CSLP_{r_{inicial}}$ , se determina por los siguientes criterios: i) disponibilidad de  $k \in K$  *EM* heterogéneos ii) la cantidad de  $n$  productos  $i \in OC$  a preparar y iii) el inventario de productos  $i \in OC$  existente en el *CEDI*.



**Tabla 5-3:** Estructura de  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$

1		Producto 1	Producto 2	Producto 3	...	Producto $i$	2	3	4
$LP^r$	EMk	$P^1_1$	$P^1_2$	.....	...	$P^1_i$	Cd	Cu	$Id \geq Is$
$LP^1$	EMk	$P^1_1$	$P^1_2$	.....	...	$P^1_i$	$Cd_1$	$Cu_1$	$Id \geq Is$
$LP^2$	EMk	$P^2_1$	$P^2_2$	.....	...	$P^2_i$	$Cd_2$	$Cu_2$	$Id \geq Is$
.....	.....	.....	.....	.....	..	.....	.....	.....	$Id \geq Is$
$LP^r$	EMk	$P^r_1$	$P^r_2$	.....	...	$P^r_i$	$Cd_k$	$Cu_k$	$Id \geq Is$

Nota:  $P^r_i$ : Producto  $i$  asignado a un lote  $LP^r$

Para conformar cada  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$  (Tabla 5-3), se inicia con la designación aleatoria de los EMMateriales heterogéneos  $k \in K$  disponibles. Posteriormente, se inicia con la asignación de los productos  $i \in OC$  a cada  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$  por orden de llegada en la ventana de tiempo del CEDI hasta completar su capacidad de carga disponible ( $cd$ ). Cada vez que un producto  $i$ , se ubica a un  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$ , se verifica que la capacidad utilizada ( $cu$ ) sea menor o igual a la  $cd$  del EMM  $k \in K$  ( $cu \leq cd$ ) y que el inventario disponible ( $Id$ ) sea igual o mayor al solicitado ( $Is$ ) ( $Id \geq Is$ ). Además, se debe garantizar que cada producto  $i \in OC$ , solo se asigne en un  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$  para no afectar la validez de las soluciones generadas. En caso que alguna de las condiciones descritas, no se cumplan, se repite el procedimiento descrito hasta que cada uno de los productos  $i \in OC$ , pertenezca a un  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$ , y se satisfagan las restricciones.

Una vez, se configura el  $CSLPr_{inicial}$ , se implementa una variante del metaheurístico tabú, que permite generar rutas  $q^r_w$  para cada lote  $LP^r \in CSLPr_{inicial}$ . Por lo tanto, las rutas configuradas  $q^r_w$  forman un conjunto denominado  $CRQW_{inicial}$ . A continuación, se representa una estructura que relaciona el conjunto de lotes iniciales con el ruteo, en la preparación de pedidos (Figura 5-5).

**Figura 5-5:** Estructura que relaciona la conformación de lotes con ruteo en el PCLRP.

$LP^r \in CSLPr$					Ruta $q^r_w \in LP^r$	Restricción inventario
$LP^1$	EMk	$P^1_1$	$P^1_2$		$q^1_w = t LP^1$	$Id \geq Is$
		Pos3	Pos 6			
$LP^2$	EMk			$P^2_3$	$q^2_w = t LP^2$	$Id \geq Is$
				Pos 9		
.....		.....	.....	.....	.....	.....
$LP^r$	EMk	$P^r_1$	$P^r_2$	$P^r_3$	$q^r_w = t LP^r$	$Id \geq Is$



Una

vez, se obtiene el  $CSLP_{inicial}$ , se calcula la duración ( $tLP^r$ ) de cada una de sus rutas  $q^r_w \in CRQ_w$ , las cuales se suman para medir tiempo total de la operación, empleando la siguiente ecuación:

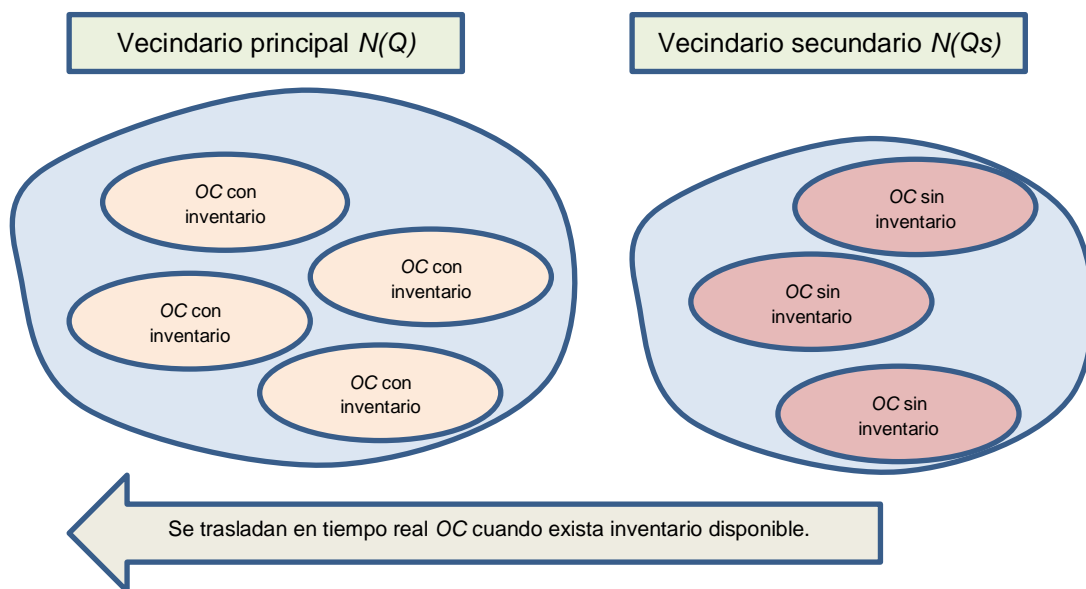
$$TW_{totalinicial} = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K tLP^r \quad (5.11)$$

Finalmente, debe tenerse en cuenta, que el conjunto de lotes iniciales  $LP^r \in CSLP_{inicial}$ , se establece como la solución actual y el mejor  $CSLP_{actual (mejor)}$ , en la primera iteración del metaheurístico *PNS*.

- Etapa 3: Vecindarios y generador de movimientos para conformar  $LP^r \in CSLP_{nuevo}$

En el metaheurístico *PNS* para conformar  $LP^r \in CSLP_{actual}$ , se modela un vecindario de búsqueda principal y otro secundario (Figura 5-6), que presentan las siguientes características:

**Figura 5-6:** Vecindarios principal y secundario en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.

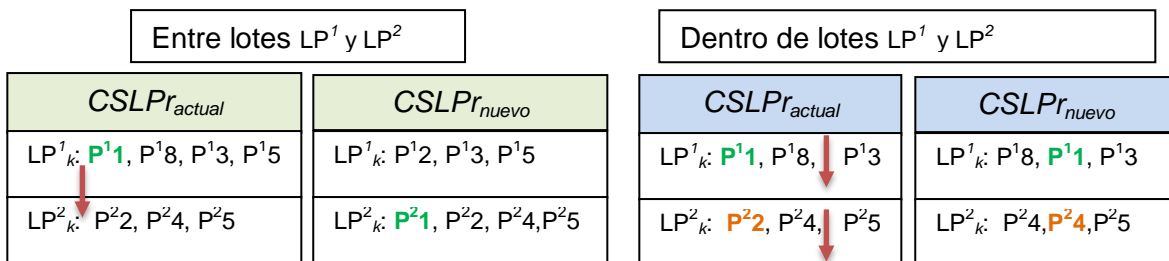


El vecindario principal  $N(Q)$ , se forma de las  $OC$  o listas de preparación (*picking list*) con inventario disponible, las cuales, son etiquetadas como programables para la conformación de nuevos lotes  $LP^i \in CSLPr_{nuevo}$  con ruteo (Figura 5-6). En tanto, el vecindario secundario  $N(Q_s)$ , se compone con las  $OC$ , que presentan un faltante de inventario en al menos uno de sus productos  $i \in OC$  (o *picking list*). En el momento, que exista inventario disponible para preparar las  $OC$  pendientes, estas se trasladan en tiempo real al vecindario principal, con el fin de etiquetarlas como programables para la conformación de  $LP^i \in CSLPr$  con ruteo. Por el motivo expuesto, el vecindario secundario, no sólo se encuentra integrado al principal, sino que también afecta el modelamiento matemático y computacional, del componente de conformación de lotes con ruteo, en el PCLRP.

Para conformar los nuevos lotes  $LP^i \in CSLPr_{nuevo}$  factibles, el metaheurístico  $PNS$  implementa una estrategia de búsqueda inteligente en dos etapas. En la primera etapa, ejecuta movimientos de inserción de productos  $i \in OC$  dentro y entre los  $LP^i \in CSLPr_{actual}$  (tipo 1). En tanto, en la segunda etapa implementa movimientos de intercambio e inserción posiciones de almacenamiento  $j$  dentro de cada  $LP^i \in CSLPr_{actual}$  (tipo 2). A continuación, se describen los dos tipos de movimientos diseñados para ejecutar la búsqueda.

Tipo de movimientos 1. Movimientos de inserción de productos  $i$  dentro y entre  $LP^i \in CSLPr_{actual}$  (Figura 5-7). El movimiento del producto  $i$  a ejecutar, se selecciona al azar con un procedimiento interno en el metaheurístico  $PNS$ .

**Figura 5-7:** Intercambio de movimientos de productos  $i$  entre y dentro  $LP^i$  para generar  $CSLPr_{nuevo}$ .



Tipo de movimiento 2. Este segundo tipo de movimientos consiste en intercambiar e insertar posiciones de almacenamiento  $j$  dentro de los nuevos lotes  $LP^i \in CSLPr_{nueva}$  generados con los movimientos tipo uno. De esta manera, se implementa una estrategia

de doble búsqueda, que no sólo permite obtener nuevos lotes  $LP^r \in CSLPr_{nuevo}$ , sino que configurar sus rutas  $q^r_w \in CRQW$ . Este enfoque, se plantea porque el problema de conformación de lotes con ruteo se resuelve de manera integrada y en paralelo.

La implementación de los movimientos tipo 2, se realiza con uno de los metaheurísticos de búsqueda tabú, que permiten solucionar el componente de ruteo en la preparación de pedidos, que se presenta de manera detallada en el apartado 5.4.3. Además, para calcular el tiempo ( $tLP^r$ ) de los nuevos  $LP^r \in CSLPr_{nuevo}$ , se emplean los grupos de funciones objetivo del metaheurístico para el componente de ruteo seleccionado.

Para calcular el tiempo total del nuevo conjunto de lotes  $CSLPr_{nuevo}$ , se emplea la siguiente ecuación:

$$Tr_{totalnuevo} = \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^K tLP^r \quad (5.12)$$

Una vez, se mide tiempo total  $Tr_{totalnuevo}$  del  $CSLPr_{nuevo}$ , se evalúa, si es menor al tiempo del  $CSLPr_{actual}$  ( $Tr_{totalnuevo} < Tr_{totalactual}$ ). En caso, que esta condición se cumpla, el nuevo conjunto  $CSLPr_{nuevo}$ , se establece como la solución actual, y se almacena en el metaheurístico *PNS* integrado al *WMS*.

Con los movimientos entre y dentro de lotes  $LP^r \in CSLPr_{actual}$  descritos, se busca explorar eficientemente el vecindario principal, con una estrategia de doble búsqueda. De esta manera, se pretende acelerar la convergencia para obtener soluciones del menor tiempo total posible, en la preparación de pedidos. Finalmente, debe resaltarse, que el metaheurístico *PNS* es un enfoque novedoso no detectado en la literatura, que permite contribuir al estado del arte y resolver el PCLRP de forma simultánea e integrada con el componente de ruteo.

- Etapa 4: Criterio de finalización de metaheurístico integrado a *WMS* para conformación de  $LP^r \in CSLPr_{nuevo}$ .

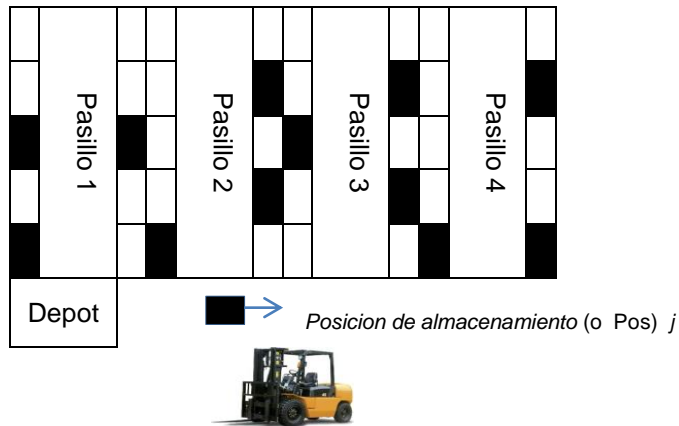
El metaheurístico *PNS* para la conformación de  $LP^r \in CSLPr$  con ruteo, se ejecuta hasta completar las iteraciones planeadas, o alcanzar la meta de tiempo mínimo de  $CSLPr$  establecida por el modelador.

### 5.4.3 Metaheurísticos de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo de mínimo tiempo integrado a la conformación de lotes $LP^r \in CSLPr$

La solución del componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, se representa con un conjunto de rutas  $q^r_w \in CRQw$  que establecen secuencias de recogida de los  $n$  productos  $i \in CSLPr$ , de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , empleando los equipos  $k \in K$  programados. Por lo tanto, con este enfoque cada  $LP^r \in CSLPr$  tienen asociado una ruta  $q^r_w \in CRQw$ .

Las rutas  $q^r_w \in CRQw$  en el problema en estudio, se diseñan para un CEDI con un *layout* en forma de bloque con múltiples pasillos (Figura 5-8), considerando los siguientes supuestos: i) inician y terminan en un mismo lugar físico del CEDI denominado *depot*, ii) se visitan  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , para recoger los  $n$  productos  $i \in CSLPr$ , solicitados en los OC con inventario disponible y iii) las rutas  $q^r_w \in CRQw$ , se ejecutan simultáneamente dependiendo de la cantidad de EMMateriales  $K$  programados.

**Figura 5-8:** Rutas de preparación de pedidos en un CEDI en forma de bloque con múltiples pasillos paralelos.



Aunque, los metaheurísticos de búsqueda tabú desarrollados para resolver el componente de ruteo en la preparación de pedidos presentan algunas similitudes con el acomodo, estos se diferencian en sus objetivos, restricciones y enfoque de modelamiento, como se describe a continuación:

- La preparación de pedidos consiste en recoger o extraer  $n$  productos  $i$  de las posiciones de almacenamiento  $j$ , empleando  $k \in K$  equipos heterogéneos (Bartholdi y Hackman, 2011). Por su parte, en el acomodo, se ubican los  $n$  productos  $i$ , en las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  asignadas. Por tal razón, el acomodo, se orienta al ingreso de los  $n$  productos  $i$  al CEDI, y la preparación de pedidos a su salida, con el fin de atender los requerimientos de los clientes. La diferencias descritas, se reflejan en el objetivo y alcance de cada una de las operaciones, lo cual, impacta en el modelamiento matemático y computacional del componente de ruteo, en el problema, en modelamiento.
- El ruteo integrado a cada lote  $LP' \in CSLPr$  en la preparación de pedidos, no sólo considera el modelamiento de  $k \in K$  equipos heterogéneos, sino que también, la restricción de disponibilidad del inventario de los productos  $i \in OC$  a preparar. Por su parte, en el acomodo, no se hace necesario modelar la restricción del inventario, lo cual, reduce la complejidad de la estructura del vecindario de búsqueda.
- La restricción de la integralidad en la recogida de un OC, que establece que todos sus productos  $i$ , se deben recolectar en una misma ruta o lote, con el fin de evitar ineficiencias en el despacho y atención de los requerimientos de los clientes. En tanto, en el acomodo, no se requiere implementar la restricción de integralidad, ya que los productos  $i$ , se ubican en las posiciones de almacenamiento  $j$  asignadas, sin depender de los otros que ingresaron en la misma orden o pedido de compra.

Las diferencias descritas, conllevan a cambios en el modelamiento matemático y computacional de las rutas en la preparación de pedidos respecto al acomodo. De allí, la importancia de modelar para cada operación, los metaheurísticos de búsqueda tabú que permiten resolver este componente de ruteo en el problema en estudio.

De otra parte, cada vez que se configura un conjunto de rutas  $CRQW_{nuevo}$ , se realiza una verificación de la disponibilidad de inventario para los productos  $i$  asignados los  $LP' \in CSLPr$ . En caso, que se presente un faltante de inventario, el  $LP' \in CSLPr$  y la ruta  $q'_w \in CRQW_{inicial}$  que tiene integrada, se registran en una lista de pendientes de ejecutar, y debe ser reprogramados, empleando las reglas o metaheurísticos para la conformación de lotes descritos en los apartados 5.4.1 y 5.4.2.

Una vez presentadas las generalidades del ruteo integrado a la conformación de lotes con ruteo, a continuación, se modela un metaheurístico de búsqueda tabú clásico y

cuatro metaheurísticos híbridos de este, que implementan estrategias de diversificación e intensificación. Para cada metaheurístico a modelar, se presentan sus etapas de implementación.

5.4.3.1 Metaheurístico de búsqueda tabú clásico (RUPBTCLA) de ruteo integrado a la conformación de  $LP^f \in CSLPr$  de mínimo tiempo

El componente de ruteo integrado a la conformación de lotes  $CSLPr$  puede ser solucionado con un metaheurístico de búsqueda tabú clásico denominado RUPBTCLA (Ruteo en la preparación de pedidos búsqueda tabú clásica). Para generar un conjunto de rutas  $q^f_w \in CRQW$  de mínimo tiempo total con el RUPBTCLA, se implementan las siguientes etapas:

- Etapa 1: Estructura de conjunto de solución inicial de rutas  $CRQW_{inicial}$  en la preparación de pedidos.

Un conjunto inicial de rutas ( $CRQW_{inicial}$ ) es formado utilizando una regla de prioridad llamada *FLNL (Farthest Location, Nearest Location)*. Con esta regla, cada ruta  $q^f_w \in CRQW_{inicial}$  es configurada iniciando desde la posición de almacenamiento más lejana a la más cercana al *depot*. A continuación, se presenta la estructura del conjunto inicial  $CRQW_{inicial}$ :

$$CRQW_{inicial} = \begin{cases} q^1_w = \{Pos\ 0, Pos1, Pos12....., Posj..., Pos0\} & q^1_w \in N(CRQW)^a \\ q^2_w = \{Pos\ 0, Pos2, Pos13....., Posj..., Pos0\} & q^2_w \in N(CRQW) \\ \dots & \dots \\ q^f_w = \{Pos\ 0, Pos3, Pos15....., Posj..., Pos0\} & q^f_w \in N(CRQW) \end{cases}$$

Nota:  $N(CRQW)$  es el vecindario de búsqueda, el cual, se compone de rutas  $q^f_w$

En el  $CRQW_{inicial}$  generado, se debe verificar que cada producto  $i \in LP^f$  tenga inventario suficiente en cada posición de almacenamiento  $j$  perteneciente en una ruta  $q^f_w \in CRQW_{inicial}$  ( $I_s$ : inventario solicitado  $\geq I_dj$ : inventario disponible en la posición de almacenamiento  $j$ ). En caso, que esta condición no se cumpla, se debe reconfigurar el conjunto de lotes  $CSLPr$  utilizando la regla *PEPR* o el metaheurístico *PNS* descrito en el apartado 5.4. Finalmente, este conjunto inicial se establece como una solución semilla para la implementación del RUPBTCLA.

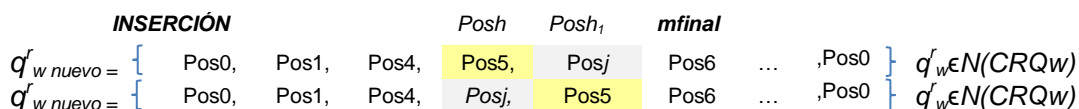
- Etapa 2 Generar un nuevo conjunto de rutas  $CRQW_{nuevo}$

El RUPBTCLA ejecuta movimientos de inserción e intercambio sobre rutas  $q^r_w \in CRQW_{actual}$  (o inicial) para crear nuevos conjunto de rutas  $q^r_w \in CRQW_{nuevo}$ . Además, los movimientos que se implementan en este metaheurístico deben cumplir alguna de las siguientes condiciones: i) no sea un movimiento activo en la lista tabú o ii) cumpla el criterio de aspiración, que se presenta en la etapa 3.

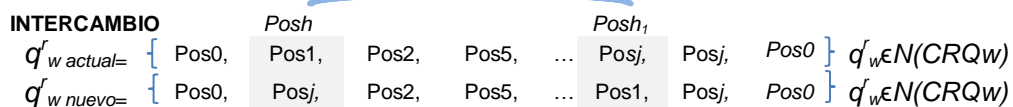
De otra parte, la implementación de los movimientos de inserción e intercambio en el RUPBTCLA dependen de un tamaño de movimiento (tm). Este tm establece la cantidad de lugares que se deben mover las posiciones de almacenamiento  $j$  para intercambiarse o insertarse en una ruta actual  $q^r_w \in CRQW_{actual}$  para generar las nuevas rutas.

En un movimiento de inserción una posición de almacenamiento  $j$  es insertada en un nuevo lugar de la ruta seleccionada  $q^r_w \in CRQW_{actual}$  (Figura 5-9). Por su parte, un movimiento de intercambio, una posición de almacenamiento  $j$  es permutada por otra dentro de una misma ruta actual  $q^r_w \in CRQW_{actual}$  (Figura 5-10).

**Figura 5-9:** Movimiento de inserción RABTCLA



**Figura 5-10:** Movimiento de intercambio RABTCLA



Los movimientos implementados por el RUPBTCLA son registrados en la lista tabú, y su selección se restringe por un número de iteraciones, que depende del tamaño del *ternure list*. De otra parte, las nuevas rutas  $q^r_w \in CRQW_{nuevo}$  se evalúan en el grupo de funciones objetivo correspondiente (etapa 4), con el fin de medir el tiempo de preparación de pedidos de cada una de las rutas  $f(q^r_w_{nuevo}) \in CRQW_{nuevo}$ .

Una vez, se miden los tiempos de cada ruta  $q^r_w \in CRQW_{nuevo}$ , se computa el tiempo total de preparación de pedidos utilizando la siguiente ecuación:

$$T_{rnuevototal} = \sum_{r=1}^R f(q^r_w_{nuevo}) \in CRQW_{nuevo} \quad (5.13)$$



- Etapa 3: Criterio de aspiración: Consiste en seleccionar e implementar movimientos de intercambio o inserción, que se encuentran registrados en la lista tabú (Glover y Laguna, 1997; Henn y Wäscher, 2012). Por lo tanto, si un movimiento tabú genera una ruta nueva  $q^r_w \in CRQW_{nuevo}$  de menor tiempo total ( $T_{total}$ ), este se establece como la nueva solución actual en el metaheurístico RUPBTCLA (Henn y Wäscher, 2012).

- Etapa 4: Grupo de funciones objetivo  $f(q^r_w) \in CRQW$

Dos grupos de funciones objetivo son modeladas para medir el tiempo de las nuevas rutas  $q^r_w_{nueva} \in CRQW_{nuevo}$  (Figura 5-11). El primer grupo corresponde a las rutas obtenidas de la ejecución de movimientos de intercambio, mientras el segundo a movimiento de inserción.

**Figura 5-11:** Grupo de funciones objetivo RUPBTCLA

$$f(q^r_w_{nueva}) = f(q^r_w_{actual}) + (\Delta T_{inserción} \text{ o } \Delta T_{intercambio}) \quad f(q^r_w) \in CRQW$$

Tiempo de ruta $f(q^r_w_{nueva}) \in CRQW$	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción} \text{ o } \Delta T_{intercambio}$	
$f(q^1_w) =$ $\sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^1_k} \cdot S^1_{hj} \cdot Y_k^1$ $+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot t_{be_{kih}} \cdot Y_k^1 \cdot X_i^1$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1-2)}))$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$\left(\frac{1}{V^1_k}\right) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$
	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1-2)}))$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$\left(\frac{1}{V^2_k}\right) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$
.....	.....	.....
$f(q^r_w) =$ $\sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^r_k} \cdot S^r_{hj} \cdot Y_k^r$ $+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot t_{be_{kih}} \cdot Y_k^r \cdot X_i^r$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$\left(\frac{1}{V^r_k}\right) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1-2)}))$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$\left(\frac{1}{V^r_k}\right) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)}))$

Nota: En caso que la primera posición adyacente a la Pos0, se escoga para implementar el RUPBTCLA Inserción, los términos  $d(Pos_{(h-1,h+1)})$  y  $d(Pos_{(h,h-1)})$  del  $\Delta T_{inserción}$  no se modelan.

Para medir el efecto de un movimiento en el tiempo total de preparación de pedidos, se calculan las variaciones de tiempo  $\Delta\tau_{inserción}$  y  $\Delta\tau_{intercambio}$ . Por lo tanto, un  $\Delta\tau$  (negativo) muestra que el movimiento implementado genera una nueva ruta  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$  que reduce el tiempo total de la operación. De otra parte, un  $\Delta\tau$  (positivo) representa un incremento del tiempo total de la preparación de pedidos, generando una solución de menor calidad. Por estos motivos, las variaciones de tiempo permiten analizar la calidad de las nuevas rutas de preparación de pedidos y su impacto en la operación.

- *Etapa 5: Analizar si  $Tr_{nuevototal} \in CSLPr_{nuevo}$  es menor que  $Tr_{mejor} \in CSLPr_{mejor}$*

*Si  $Tr_{nuevototal} \in CSLPr_{nuevo}$  es menor que  $Tr_{mejor} \in CSLPr_{mejor}$  entonces el conjunto  $CSLPr_{nuevo}$  es fijado como la mejor solución para el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos ( $CSLPr_{nuevo} = CSLAr_{mejor}$ ). Esta evaluación, se realiza para cada iteración del RUPBTCLA.*

- *Etapa 6: Criterio de parada.*

*El RUPBTCLA, finaliza su ejecución, cuando se cumple alguno de los siguientes criterios: a) se alcanza una meta de mínimo tiempo total  $Tr_{total}$  en la preparación de pedidos, b) se ejecuta el número de iteraciones planeadas, o c) el tiempo límite de procesamiento de la CPU es excedido.*

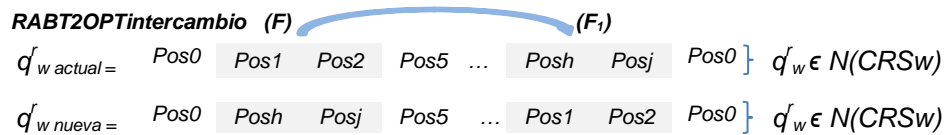
#### 5.4.3.2 Metaheurísticos de búsqueda tabú con estrategias de diversificación RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Intercambio

*En el RUPBTDI (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación) 2-Opt o 3-Opt de Intercambio (swap), se permutan grupos de dos o tres posiciones de almacenamiento pertenecientes a las rutas actuales  $q'_w \in CRQW_{actual}$ . De esta manera, se generan nuevos conjuntos rutas  $CRQW_{nuevo}$ , que permitan recoger los  $n$  productos  $i$  de cada  $LP \in CSLPr$  en el menor tiempo posible (Rios y Gonzalez, 2000; Kulak et al., 2012).*

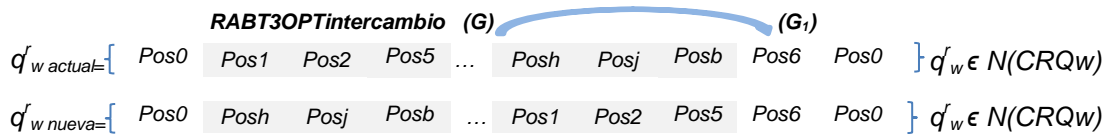
*A continuación, se presentan las etapas de implementación de los metaheurísticos RUPBTDI de Intercambio. Las diferencias entre el 2-Opt y 3-Opt, se presentan en la estructura de los movimientos, los términos de las funciones objetivo, y la estrategia de exploración de los vecindarios.*

- **Etapa 1: Generar conjunto de rutas inicial  $CRQW_{inicial}$**   
 El conjunto inicial de rutas  $CRQW_{inicial}$  es la mejor solución calculada para el RUPBTCLA, en el apartado 5.4.3.2. Adicionalmente, se debe comprobar que cada posición de almacenamiento  $j \in q'_w$  posea la cantidad suficiente de inventario del producto  $i \in CSLPr$  a recoger. En caso, que esta condición no se cumpla, se debe conformar nuevamente el conjunto de lotes CSLPr usando la regla PEPR o el metaheurístico PNS presentados en el apartado 5.4.
- **Etapa 2: Identificar grupos factibles de dos ( $F=\{Pos h, Pos j\}$ ) o tres ( $F =\{Pos h, Posj, Pos b\}$ ) posiciones de almacenamiento, que se puedan intercambiar en las rutas  $q'_w \in CRQW_{actual}$ . Los grupos detectados se registran en el WMS.**
- **Etapa 3: Seleccionar de la lista registrada en el WMS un grupo  $F$  de dos ( $F= \{Pos h, Posj\}$ ) o tres ( $F= \{Pos h_1, Posj_1, Pos b_1\}$ ) posiciones de almacenamiento e intercambiarlo con otro grupo  $F_1$  en una ruta  $q'_w \in CRQW_{actual}$ , para producir nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{actual}$ . Este procedimiento se repite hasta realizar los intercambios de los grupos planeados en cada  $q'_w \in CRQW_{actual}$  o alcanzar un número de iteraciones. A continuación, se representan los intercambios con RABTDI 2-Opt (Figura 5-12) y 3-Opt (Figura 5-13) con un tamaño de movimiento genérico  $tm$ , que lo establece el modelador. El  $tm$  fue descrito en la etapa 2 del apartado 5.4.3.1.**

**Figura 5-12:** Representación de movimientos RUPBTDI 2-Opt Intercambio



**Figura 5-13:** Representación de movimientos RUPBTDI 2-Opt Intercambio



Las nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$  que se configuran con el RUPBTDI 2-Opt y RUPBTDI 3-Opt Intercambio son evaluados en el grupo de funciones objetivo para medir el tiempo de la operación.

- **Etapa 4: Grupo de funciones objetivo**

El tiempo de cada ruta nueva  $q'_w \in CRQW_{nuevas}$  es medido en uno de los grupos de funciones objetivo, que corresponden a RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Intercambio (Figura 5-14). Debe tenerse, en cuenta, que el tiempo de las rutas  $f(q'_w \text{ nueva}) \in CRQW_{nuevo}$ , es un componente del tiempo total de la preparación de pedidos, ya que se desarrolla un enfoque de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el PCLRP.

**Figura 5-14:** Grupos de funciones objetivo RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Intercambio

$$f(q'_w \text{ nueva}) = f(q'_w \text{ actual}) + (\Delta T_{2OPT} \text{ o } \Delta T_{3OPT}) \quad f(q'_w) \in CRQW$$

	Tiempo de ruta $f(q'_w \text{ nueva}) \in CRQW$	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$ o $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$				
$f(q'_w)$	$\begin{aligned} \text{Min } T \\ = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V_k^r} \cdot S^r_{hj} \cdot Y_k^r \\ + \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y_k^r \cdot X_i^r \end{aligned}$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})</math> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) \\ + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - d(Pos_{(b,b+1)}) \\ - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})</math> </td> </tr> </table>	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})$	Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) \\ + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - d(Pos_{(b,b+1)}) \\ - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$
Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})$						
Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) \\ + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - d(Pos_{(b,b+1)}) \\ - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$						
$f(q^2_w)$	$\begin{aligned} \text{Min } T \\ = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V_k^r} \cdot S^r_{hj} \cdot Y_k^r \\ + \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y_k^r \cdot X_i^r \end{aligned}$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})</math> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^2}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})</math> </td> </tr> </table>	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})$	Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^2}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$
Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^1}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,j1+1)})$						
Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^2}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$						
.....	.....	.....				
$f(q'_w)$	$\begin{aligned} \text{Min } T \\ = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V_k^r} \cdot S^r_{hj} \cdot Y_k^r \\ + \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y_k^r \cdot X_i^r \end{aligned}$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,i1+1)})</math> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Variación de tiempo <math>\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}</math></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> <math display="block">\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})</math> </td> </tr> </table>	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,i1+1)})$	Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$	$\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$
Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) + d(Pos_{(h;h+1+tm)}) \\ + d(Pos_{(j1,j1-tm-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - \\ d(Pos_{(j1,i1+1)})$						
Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$						
$\left(\frac{1}{v_k^r}\right) (d(Pos_{(r1,r1-tm-2)}) + d(Pos_{(b1,b1+1)}) \\ + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) + d(Pos_{(r,r+tm+4)}) - d(Pos_{(j,j-1)}) - \\ d(Pos_{(b,b+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(b1,b1+1)})$						

Nota: tm corresponde al tamaño de movimiento descrito en la etapa 2, apartado 3.5.1.

Las variaciones  $\Delta T_{2OPTINTERCAMBIO}$  y  $\Delta T_{3OPTINTERCAMBIO}$  no solo permite medir el efecto de la nueva ruta  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$  generada sobre el tiempo total de la operación, sino también diferenciar la estructura de los movimientos del RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Intercambio. Respecto a la interpretación de las variaciones de tiempo, se puede indicar que un  $\Delta\tau$  (negativo) muestra, que la nueva ruta  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$  genera una disminución en el tiempo total de preparación de pedidos  $T_{w \text{ totalNuevo}}$ . Por su parte, un  $\Delta\tau$  (positivo) indica un

aumento en tiempo total de la operación, lo cual produce soluciones de menor calidad respecto a la variable respuesta.

Una vez, se calculan los tiempos de cada ruta  $f(q_w^r \text{ nueva}) \in CRQW_{\text{nuevo}}$  estas se suman para medir el tiempo total de la preparación de pedidos ( $T_{\text{total}}$ ) empleando la siguiente ecuación:

$$T_{\text{totalnuevo}} = \sum_{r \in W} f(q_w^r \text{ nueva}) \quad (5.14)$$

En la primera iteración del metaheurístico RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt intercambio, el  $T_{\text{totalnuevo}}$  equivale  $T_{\text{totalinicial}}$ .

- *Etapa 4: Evaluar si, el nuevo tiempo total de preparación de pedidos  $T_{\text{totalnuevo}}$ , es menor, que el tiempo actual  $T_{\text{totalactual}}$  ( $T_{\text{totalnuevo}} \leq T_{\text{totalactual}}$ ). En caso que esta condición se cumpla, las rutas nuevas  $q_w^r \in CSLPr_{\text{nuevo}}$ , se establecen como el nuevo conjunto de rutas actuales  $q_w^r \in CRQW_{\text{actual}}$ . Este análisis comparativo de los tiempos totales, se ejecuta en cada iteración de los metaheurísticos en modelamiento.*
- *Etapa 5: Restricciones tabú. Los movimientos de intercambio que se realicen con los RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt sobre las actuales rutas  $q_w^r \in CRQW_{\text{actual}}$  para explorar el vecindario  $N(Q')$ , se almacenan en la lista tabú durante un número de iteraciones (ternure). Esto se realiza para evitar la repetición de movimientos u formar  $q_w^r \in CRQW_{\text{nuevo}}$ , ya creados que conlleven a ciclos en la búsqueda (Kulak et al.,2012),(Henn y Wäscher,2012).*
- *Etapa 6: Criterio de parada: El RUPBTDI con 2-Opt o 3-Opt intercambio, termina su ejecución, cuando se cumple alguno de los siguientes criterios: a) se alcanza una meta de mínimo tiempo total  $T_{\text{total}}$  en la preparación de pedidos, b) se ejecuta el número de iteraciones planeadas, o c) el tiempo límite de procesamiento de la CPU es excedido.*

#### 5.4.3.3 RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción

En el metaheurístico RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción, se selecciona un grupo  $G$  de dos o tres posiciones de almacenamiento, el cual, se inserta en un punto de inserción (INS) de la ruta actual  $q_w^r \in CRQW_{\text{actual}}$ . Como resultado de los movimientos de inserción,

se generan nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nueva}$ . El modelamiento del RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción tiene etapas similares a los metaheurísticos de intercambio, pero presentan diferencias en la estructura de los movimientos y los grupos de funciones objetivo. A continuación, se describen las etapas de implementación de estos metaheurísticos.

• *Etapas 1: Formar un conjunto de rutas iniciales  $CRQW_{inicial}$*

La solución inicial  $CRQW_{inicial}$  del RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción corresponde al mejor conjunto de rutas obtenido de la implementación del RUBTCLA, en el apartado 5.4.3.1. En el  $CRQW_{inicial}$  establecido, se debe verificar que los producto  $i \in LP^r$  posean inventario disponible en cada posición de almacenamiento  $j$  asociado a las rutas  $q'_w \in CRQW_{inicial}$  ( $I_{s_j} \geq I_{d_j}$ ). En caso, que esta condición no se satisfaga, el conjunto de lotes CSLPr debe ser configurado utilizando la regla de prioridad o el metaheurístico descrito en el apartado 5.4

• *Etapas 2: Identificar grupos de posiciones de almacenamiento*

Identificar grupos de dos ( $F=\{Pos h, Pos j\}$ ) o tres ( $F=\{Pos h, Pos j, Pos r\}$ ) posiciones de almacenamiento, que se puedan insertar en un punto INS de una ruta actual  $q'_w \in CRQW_{actual}$  seleccionada, con el fin de generar nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ . Los grupos de inserción F factibles creados, deben ser listados y registrados en el WMS.

• *Etapas 3: Seleccionar grupo de posiciones de almacenamiento a implementar*

Seleccionar de la lista generada un grupo F de dos o tres posiciones de almacenamiento, e insertarlo en el punto de inserción INS de una ruta actual  $q'_w \in CRQW_{actual}$ , según el tamaño de movimiento(tm) establecido. De esta manera, se obtienen las nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{actual}$ . Este procedimiento se repite hasta implementar todos los grupos F factibles configuradas o ejecutar un número de inserciones planeadas en el RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Inserción. A continuación, se representan los movimientos de inserción en el RUPBTDI 2-Opt (Figura 5-15) y 3-Opt (

Figura 5-16).

**Figura 5-15:** Representación de movimientos de inserción RUPBTDI 2-Opt Inserción.



$$q_w^{nuevo} = \left[ \begin{array}{cccccccc} Pos0 & Pos1 & Pos5 & Pos_h & Pos_j & Pos2 & Pos3 & \dots & Pos0 \end{array} \right] \quad q_w \in N(CRQW)$$

$$F_1 = (Pos_{h1}, Pos_{j1})$$

**Figura 5-16:** Representación de movimientos de inserción RUPBTDI 3-Opt Inserción.

**3 Opt Inserción**  $G=(Pos_h, Pos_j, Pos_b)$

$$q_w^{actual} = \left[ \begin{array}{cccccccc} Pos0 & Pos1 & Pos_h & Pos_j & Pos_b & Pos5 & Pos2 & Pos3 & \dots & Pos0 \end{array} \right] \quad q_w \in N(CRQW)$$

*mfinal*

$$q_w^{nuevo} = \left[ \begin{array}{cccccccc} Pos0 & Pos1 & Pos5 & Pos_h & Pos_j & Pos_b & Pos2 & Pos3 & \dots & Pos0 \end{array} \right] \quad q_w \in N(CRQW)$$

$$G_1 = (Pos_{h1}, Pos_{j1}, Pos_{b1})$$

Nota. *mfinal* es la posición de almacenamiento adyacente al punto de inserción, el cual está representado con una fecha.

Los movimientos que se seleccionan y ejecutan en el RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Inserción, se registran en la lista tabú durante un número de iteraciones (tabu tenure). Por este motivo, la lista tabú tiene como propósito evitar la generación de ciclos en la búsqueda, lo cual afecta directamente la calidad de las nuevas rutas  $q_w \in CRQW_{nuevo}$  y la eficiencia computacional de los metaheurísticos.

- **Etapa 4:** Calcular el tiempo de las nuevas rutas  $q_w \in CRQW_{nuevo}$

En esta etapa, se representan los grupos de funciones objetivo, que permiten evaluar las nuevas  $q_w \in CRQW_{nuevo}$  generadas por medio de los RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Inserción (Figura 5-17). Los grupos de funciones objetivo de estos dos metaheurísticos, se diferencian por las estructuras de las variaciones del tiempo  $\Delta T_{2OPTINSERCIÓN}$  y  $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$ .

En cada iteración, el valor  $\Delta T_{2OPTINSERCIÓN}$  o  $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$  (Figura 5-17), se calcula según el metaheurístico RUPBTDI inserción implementado para determinar, si el tiempo total de preparación de pedidos ( $T_{w_{totalnuevo}}$ ), se aumenta o disminuye. Un  $\Delta\tau$ (negativo) indica que la nueva ruta  $q_w \in CRQW_{nueva}$  permite reducir el tiempo total ( $T_{w_{totalnuevo}}$ ). En tanto, un  $\Delta\tau$  (positivo) muestra que el tiempo total del  $CRQW_{nueva}$  se incrementa, lo cual produce una solución de menor calidad.

**Figura 5-17:** Grupos de funciones objetivo para RUPBTDI 2-Opt y 3-Opt Inserción

$$f(q_w^{nueva}) = f(q_w^{actual}) + (\Delta T_{2OPT} \text{ OR } \Delta T_{3OPT}) \quad f(q_w) \in CRQW$$

Tiempo de ruta  $f(q_w^{nueva}) \in CRQW$

Variación de tiempo  $\Delta T_{2OPT}$  o  $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$

$f(q^1_w)$ =	$\sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^1_k} \cdot S^1_{hj} \cdot Y_k^1$ $+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^1_k \cdot X^1_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINSERCIÓN}$
		$\left(\frac{1}{v^1_k}\right) (d(Pos_{(h-1,j+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,h)}) + d(Pos_{(j,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$
$f(q^2_w)$ =	$\sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^2_k} \cdot S^2_{hj} \cdot Y_k^2$ $+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^2_k \cdot X^2_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINSERCIÓN}$
		$\left(\frac{1}{v^2_k}\right) (d(Pos_{(h-1,j+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,h)}) + d(Pos_{(j,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$
$f(q^r_w)$ =	$\sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^r_k} \cdot S^r_{hj} \cdot Y_k^r$ $+ \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^r_k \cdot X^r_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{2OPTINSERCIÓN}$
		$\left(\frac{1}{v^r_k}\right) (d(Pos_{(h-1,j+1)}) + d(Pos_{(mfinal-1,h)}) + d(Pos_{(j,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(j,j+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
		Variación de tiempo $\Delta T_{3OPTINSERCIÓN}$

Nota: En caso que la primera posición adyacente a la Pos0, sea parte del grupo de posiciones a insertar siguientes términos no se incluyen en las variaciones de tiempo:  $d(Pos_{(h-1,b+1)})$  y  $d(Pos_{(h,h-1)})$ .

Una vez, se calculan las  $f(q^r_w \text{ nueva}) \in CRQW_{nuevo}$ , estas se suman, para medir el tiempo total de la preparación de pedidos ( $T_{wtotal}$ )

$$T_{wtotalnuevo} = \sum_{r \in W} f(q^r \text{ nueva}) \quad (5.15)$$

- Etapa 5: Determinar si, el nuevo tiempo total de preparación de pedidos  $T_{totalnuevo}$ , es menor, que el tiempo actual  $T_{totalactual}$  ( $T_{totalnuevo} \leq T_{totalactual}$ ). En el escenario, que esta condición se cumpla, las nuevas rutas  $q^r_w \in CSLPr_{nuevo}$ , se fijan como el nuevo conjunto de rutas actuales  $q^r_w \text{ actual} \in CRQW_{actual}$ . Esta comparación, se realiza en cada iteración del RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt Inserción.



- Etapa 6: Criterio de parada: El RUPBTDI 2-Opt o 3-Opt inserción, termina su ejecución, cuando se cumple alguno de los siguientes criterios: a) se alcanza una meta de mínimo tiempo total  $T_{wtotal}$  en la preparación de pedidos, b) se ejecuta el número de iteraciones planeadas, o c) el tiempo límite de procesamiento de la CPU es excedido.

#### 5.4.3.4 Estrategia de intensificación RUPBTIN en la preparación de pedidos

El RUPBTIN, es un metaheurístico híbrido de búsqueda tabú con una estrategia de intensificación, que permite solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes  $LP' \in CSLPr$ . La estrategia de intensificación del RUPBTIN, se basa en una matriz de frecuencias, que permite explorar exhaustivamente vecindarios de búsqueda, con el fin de obtener conjuntos de rutas  $CRQ_w$  del mínimo tiempo total posible. Por lo tanto, el RUPBTIN, se considera un aporte al conocimiento, ya que en la literatura no se identificaron metaheurísticos con estrategias de intensificación, para configurar rutas integradas a la conformación de lotes para el PCLRP. A continuación, se presentan las etapas para implementar el RUPBTIN.

- Etapa 1: Formar un conjunto de rutas inicial  $CRQ_{w_{inicial}}$

Se forma un conjunto inicial de rutas  $CRQ_{w_{inicial}}$  con la mejor solución obtenida del RUPBTCLA, en el apartado 5.4.3.1. Además, la estructura del  $CRQ_{w_{inicial}}$  es igual a la presentada en la etapa 1 del apartado 5.4.3.4. En esta etapa se verifica que cada posición de almacenamiento  $j \in q'_w$  tiene el inventario suficiente para recoger la cantidad de productos  $i \in LP'$  ( $I_s \geq I_dj$ ). En el escenario, que esta condición no se cumpla, el  $CSLPr_{inicial}$  debe ser reconfigurado utilizando la regla PEPR o el metaheurístico presentado en el apartado 5.4.

- Etapa 2: Obtener  $n_i$  rutas  $q'_{w_{ni}} \in CRQ_w$

Se generan  $n_i$  rutas  $q'_{w_{ni}} \in CRQ_w$ , que permiten configurar la estructura y determinar el tamaño de la matriz de intensificación en el RUPBTIN. Para obtener las  $n_i$  rutas  $q'_{w_{ni}} \in CRQ_w$ , se implementa el RUPBTCLA, el cual ejecuta movimientos de intercambio simple (*swap*) sobre el conjunto de rutas iniciales  $q'_w \in CRQ_{w_{inicial}}$ .

Para facilitar el diseño de la matriz de frecuencias, las  $n_i$  rutas  $q'_{w_{ni}} \in CRQ_w$ , se organizan en una estructura, que permite registrar en que columna  $y \in Y$ , se encuentran ubicadas cada una de sus posiciones de almacenamiento  $j$  (Tabla 5-4).

**Tabla 5-4:** Estructura de rutas  $q'_{w ni}$  representada en columnas (Ct)

Ruta	Posición en la estructura de la ruta $q'_w$								
$q'_{wi}$	C0	C1	C2	C3	C4	C5	.....	Cy	Truta
$q'_{w1}$	Pos 0	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos6	.....	Pos j	Truta1
$q'_{w2}$	Pos 0	Pos2	Pos 3	Pos5	Pos 7	Pos4	.....	Pos j	Truta2
$q'_{wni}$	Pos 0	.....	.....	.....	.....	.....	.....	Pos j	Truta $n_i$

- Etapa 3: Obtener la matriz de frecuencia de intensificación.

Con la información de la estructura generada (Tabla 5-4), se configura una matriz de frecuencias, que permite calcular el % de veces que las posiciones  $j$  pertenecientes a cada una de las  $n_i$  rutas  $q'_{w ni} \in CRQW$ , se ubican en una columna  $y \in Y$ . Por lo tanto, la matriz de frecuencias, se diseña con dos entradas denominadas: Cy (Columnas  $y \in Y$ ) y Pos  $j$  (Posiciones  $j$ ).

Para construir la matriz de frecuencias, primero, se efectúa el conteo ( $C_{jy}$ ) de la cantidad de veces que una posición de almacenamiento  $j$ (pos  $j$ ), se sitúa en cada columna Cy. El resultado obtenido del conteo ( $C_{jy}$ ), se registra en la Tabla 5-5.

**Tabla 5-5:** Conteo de pos  $j$  en columnas  $y \in Y$  en las  $n_i$  rutas  $q'_{w ni} \in CRQW$

	Pos $j \in q'_w \in CRQW_{actual (inicial)}$							
Cy	Pos 0	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	.....	Pos j	
C0	$C_{00}$	$C_{10}$	$C_{20}$	$C_{30}$	$C_{40}$	.....	$C_{j0}$	$\sum_{j=1}^J C_{j0}$
C1	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{21}$	$C_{31}$	$C_{41}$	.....	$C_{j1}$	$\sum_{j=1}^J C_{j1}$
C2	$C_{02}$	$C_{12}$	$C_{22}$	$C_{32}$	$C_{42}$	.....	$C_{j2}$	$\sum_{j=1}^J C_{j2}$
C3	$C_{03}$	$C_{13}$	$C_{23}$	$C_{33}$	$C_{43}$	.....	$C_{j3}$	$\sum_{j=1}^J C_{j3}$
C.	....	....	....	....	....	.....	$C_{j.}$	.....
Cy	$C_{0t}$	$C_{1t}$	$C_{2t}$	$C_{3t}$	$C_{4t}$	.....	$C_{jt}$	$\sum_{j=1}^J C_{jt}$
Truta	$\sum_{y=1}^Y C_{0y}$	$\sum_{y=1}^Y C_{1y}$	$\sum_{y=1}^Y C_{2y}$	$\sum_{y=1}^Y C_{3y}$	$\sum_{y=1}^Y C_{4y}$	.....	$\sum_{y=1}^Y C_{jy}$	

Para garantizar la validez del conteo efectuado ( $C_{jy}$ ), se verifica, que el tamaño (Trutas) de las  $n_i$  rutas sea igual, empleando la siguiente ecuación:

$$\sum_{y=1}^Y C0y = \sum_{y=1}^Y C1y = \dots = \sum_{y=1}^Y Cjy \quad (5.16)$$

En caso, que esta condición no se cumpla, se debe reconfigurar la estructura de las  $n_i$  rutas  $q'_{w,ni} \in CRQ_w$  implementando nuevamente el RUPBTCLA.

Una vez, se realiza el conteo ( $Cjy$ ), se procede al cálculo de los % de frecuencia ( $f_{jy}$ ), empleando la siguiente formula:

$$f_{jy} = \frac{\text{ConteoPos } j \text{ en } Cy(Cjy)}{\text{Truta}} = \frac{\sum_{y=1}^Y Cjy}{\text{Truta}} \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (5.17)$$

A continuación, se definen los elementos modelados en la ecuación 5.17

- $f_{jt}$ : % frecuencia que una posición  $j \in J$ , se sitúa en la  $Cy \in Y$  de cada  $q'_{w,ni} \in CRQ_{w,actual(inicial)}$ .

-ConteoPos $j$ en $Cy(Cjy)$ : Cantidad de veces que una posición  $j \in J$ , se sitúa en la columna  $Cy \in Y$  en cada  $q'_{w,ni} \in CRQ_w$ .

$$\sum_{y=1}^Y Cjy \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \quad (5.18)$$

-*Truta*: Es el tamaño (Truta) de cada ruta  $q'_{w,ni} \in CRQ_w$ , el cual, se obtiene de la sumatoria del conteo de las posiciones  $j$  en  $Cy$ :

$$\sum_{y=1}^Y Cjy \quad \forall y = 1, 2, \dots, Y \quad (5.19)$$

Las frecuencias  $f_{jy}$  calculadas en cada una de las  $n_i$  rutas  $q'_{w,ni} \in CRQ_w$ , se registran en la matriz de frecuencias configurada (Tabla 5-6). Debe tenerse, en cuenta, que la cantidad de posiciones de almacenamiento  $j$  de la matriz, lo establece el índice Posmfinal ( $j$ ), que está determinado por el tamaño de las  $n_i$  rutas  $q'_{w,ni} \in CRQ_w$  generadas (Truta).

**Tabla 5-6:** Matriz de frecuencias para posiciones de almacenamiento  $j$  en  $Ct(f_{jt})$

	Pos $j \in q' \in CRQ_{w,actual(inicial)}$					
Cy	Pos 0	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos j	Pos mfinal(j)
C0	$f_{00}$	$f_{10}$	$f_{20}$	$f_{30}$	....	$f_{Posmfinal(j)0}$
C1	$f_{01}$	$f_{11}$	$f_{21}$	$f_{31}$	....	$f_{Posmfinal(j)1}$
C2	$f_{02}$	$f_{12}$	$f_{22}$	$f_{32}$	....	$f_{Posmfinal(j)2}$
C4	$f_{04}$	$f_{14}$	$f_{24}$	$f_{34}$	....	$f_{Posmfinal(j)4}$
Cy	$f_{0t}$	$f_{1y}$	$f_{2y}$	$f_{3y}$	....	$f_{Posmfinal(j)y}$
% $f_{jtotal}$	$\sum_{y=1}^Y f_{0y}$ = 100%	$\sum_{y=1}^Y f_{1y}$ = 100%	$\sum_{y=1}^Y f_{2y}$ = 100%	$\sum_{y=1}^Y f_{3y}$ = 100%	$\sum_{y=1}^Y f_{jy}$ = 100%	$\sum_{y=1}^Y f_{Posmfinal(j)y}$ = 100%

Para determinar la validez de la matriz creada, se verifica, que la sumatoria de la frecuencia total ( $\%f_{jtotal}$ ) de cada posición  $j$  en una  $Cy(f_{jy})$  sea igual a 100%:

$$\%f_{jtotal} = \sum_{y=1}^Y f_{jy} = 100\% \quad (5.20)$$

En el caso, que esta condición no se cumpla, se debe recalcular la matriz de frecuencia hasta obtener un valor del  $\%f_{jtotal}$  de 100%. Esta condición es crítica para generar soluciones factibles, para el problema en modelamiento.

- Etapa 4: Fijar un criterio de frecuencia meta ( $f_m$ ) en el metaheurístico RUPBTIN matriz de frecuencias

Las posiciones de almacenamiento  $j$ , cuya frecuencia  $f_{jy}$  sea igual o mayor a la frecuencia meta ( $f_m$ ) ( $f_{jy} \geq f_m$ ), se establecerán como fijas o no modificables en la ejecución del metaheurístico RUPBTIN. Por el contrario, las posiciones  $j$  que no cumplan la condición ( $f_{jy} \leq f_m$ ), se etiquetan como libres de intercambiar o insertar para generar las nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ . La evaluación descrita, debe efectuarse para las  $f_{jy}$  registrada en la matriz de frecuencias (Tabla 5-6).

En la implementación del RUPBTIN, la posición 0 y  $Pmfinal$  de las rutas  $q'_{w ni} \in CRQW$ , permanecen fijas. Este supuesto, se establece, ya que las rutas de preparación de pedidos, inician y terminan en un mismo lugar físico del CEDI denominado *depot*.

- Etapa 5: Comenzar la ejecución del RUPBTIN.

Para crear nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ , se ejecuta el metaheurístico RUPBTIN, el cual, efectúa movimientos de intercambio (*swap*) e inserción (*shift*) dentro de las rutas  $q'_w \in CRQW$ . A continuación, se presentan los pasos para crear las nuevas rutas:

-Fijar las posiciones de almacenamiento  $j$ , que cumplieron con el criterio ( $f_{jt} \geq f_m$ ), en las  $n_i$  rutas  $q'_{w ni} \in CRQW$ .

-Listar las posiciones de almacenamiento  $j$  ( $f_{jt} \leq f_m$ ), clasificadas como libres o modificables en las  $n_i$  rutas  $q'_{w ni} \in CRQW$ , las cuales, pueden ser intercambiadas (*swap*) o insertadas (*shift*). Debe resaltarse que el criterio de aspiración únicamente aplica para estas posiciones  $j$  establecidas como libres.

-Implementar el RUPBTIN, ejecutando los movimientos de intercambio (*swap*) e inserción (*Shift*) entre las posiciones  $j$  establecidas como variables, para generar las nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ . Los movimientos de intercambio e inserción a implementar son similares a los presentados en el RUPBTCLA etapa 2 sección 5.4.3.1.

-Medir el tiempo de las rutas configuradas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ , con los grupos de funciones objetivo formuladas en la etapa 6, dependiendo del movimiento ejecutado.

-Registrar las nuevas rutas generadas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$ , en el WMS.

- Etapa 6: Medir el tiempo de las nuevas rutas  $q'_w \in CRQW_{nuevo}$  en el grupo de funciones objetivo correspondiente

En esta etapa, se formulan dos grupos de funciones objetivo para el RUPBTIN. El primer grupo corresponde al RUPBTIN con movimientos de intercambio. En tanto, el segundo grupo está asociado a los movimientos de inserción. Ambos grupos de funciones, se diferencian por las variaciones de tiempo  $\Delta T_{intercambio}$  y  $\Delta T_{inserción}$ . Por lo tanto, estas variaciones  $\Delta t$  permiten medir el impacto de las nuevas rutas sobre el tiempo total de la operación, y establecen la estructura del movimiento seleccionado en el RUPBTIN. A continuación, se representan los grupos de funciones objetivo (Figura 5-18)

**Figura 5-18:** Grupos de funciones objetivo RUPBTIN

$$f(q'_w \text{ nueva}) = f(q'_w \text{ actual}) + (\Delta T_{inserción} \text{ o } \Delta T_{intercambio}) \quad f(q'_w) \in CRQW$$

Tiempo de ruta $f(q'_w \text{ nueva}) \in CRQW$	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$ o $\Delta T_{intercambio}$	
$f(q^1_w) = \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^1_k} \cdot S^1_{hj} \cdot Y^1_k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^1_k \cdot X^1_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$(\frac{1}{v^1_k}) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1+1)})$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$(\frac{1}{W^1_k}) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
$f(q^2_w) = \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^2_k} \cdot S^2_{hj} \cdot Y^2_k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^2_k \cdot X^2_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$(\frac{1}{v^2_k}) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1+1)})$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$(\frac{1}{W^2_k}) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$
$f(q^r_w) = \sum_{k \in K} \sum_{h \neq j \in L} \sum_{j \neq h \in L} \frac{d_{hj}}{V^r_k} \cdot S^r_{hj} \cdot Y^r_k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{h \in L} b_i \cdot tbe_{kih} \cdot Y^r_k \cdot X^r_i$	Variación de tiempo $\Delta T_{intercambio}$	$(\frac{1}{v^r_k}) (d(Pos_{(h1,h1-tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm)}) + d(Pos_{(h,h+tm+2)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(h1,h1-1)}) - d(Pos_{(h1,h1+1)})$
	Variación de tiempo $\Delta T_{inserción}$	$(\frac{1}{W^r_k}) (d(Pos_{(h-1,h+1)}) + d(Pos_{(h,mfinal-1)}) + d(Pos_{(h,mfinal)}) - d(Pos_{(h,h-1)}) - d(Pos_{(h,h+1)}) - d(Pos_{(mfinal,mfinal-1)})$

Nota: En caso que la primera posición adyacente a la Pos0, se escoga para implementar el RUPBTIN Inserción, los términos  $d(Pos_{(h-1,h+1)})$  y  $d(Pos_{(h,h-1)})$  del  $\Delta T_{inserción}$  no se modelan.

Las  $f(q_{nueva}^r) \in CRQ_{wnueva}$  calculadas, permiten calcular tiempo total de la preparación de pedidos ( $T_{total}$ ), empleando la siguiente expresión:

$$T_{totalnuevo} = \sum_{r \in W} f(q_{wnueva}^r) \quad \forall LP^r \in CSLPr \quad (5.21)$$

- Etapa 7: Evaluar el nuevo tiempo total  $T_{totalnuevo}$  de preparación de pedidos generado con el *RUPBTIN*

Establecer si, el nuevo tiempo total de preparación de pedidos  $T_{totalnuevo}$ , es menor, que el tiempo actual de la operación  $T_{totalactual}$  ( $T_{totalnuevo} \leq T_{totalactual}$ ). Si esta condición se cumple, el nuevo conjunto de rutas  $q_w^r \in CRQ_{wnueva}$ , se establece como la solución actual  $q_w^r \in CRQ_{wactual}$ , en el metaheurístico *RUPBTIN*.

- Etapa 8: Restricciones tabú

Los movimientos de intercambio e inserción que se desarrollan en las actuales rutas  $q_w^r \in CRQ_{wactual}$  para estudiar el vecindario  $N(Q)$ , se almacenan en la lista tabú durante un número de iteraciones (*tenure*). De esta manera, se evita la implementación de movimientos ya ejecutados o crear  $q_w^r \in CRQ_{wnuevo}$  idénticos generadas, que causen ciclos en la exploración de vecindarios y produzcan ineficiencias computacionales (Kulak *et al.*, 2012; Henn y Wäscher, 2012).

- Etapa 9: Criterios de parada.

El *RUPBTIN* matriz de frecuencias termina su ejecución, si se cumple alguno de los siguientes criterios: a) se alcanza una meta de mínimo tiempo total  $T_{total}$  en la preparación de pedidos, b) se ejecuta el número de iteraciones planeadas, o c) el tiempo límite de procesamiento de la CPU es excedido.

Los resultados obtenidos permitieron la formulación matemática del problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos considerando  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos,  $m$  posiciones de almacenamiento y la condición de la disponibilidad del inventario. De otra parte, para resolver el componente de conformación de lotes, se modeló un metaheurístico denominado *PNS* y una regla de prioridad denominada *PEPR*. En tanto, para solucionar el componente de ruteo integrado a la formación de lotes se modelaron cinco variantes del metaheurístico tabú, que incluyen estrategias de intensificación y diversificación (2-Opt y 3-Opt de Intercambio e Inserción). Debe indicarse, que los metaheurísticos modelados se encuentran integrados

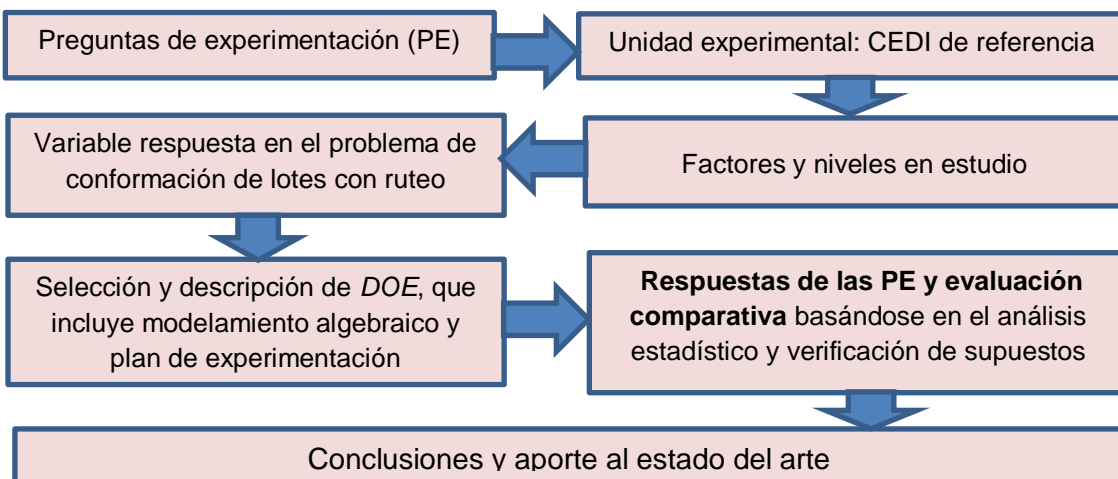
---

a un *WMS*, y permiten resolver el problema de conformación de lotes con ruteo de una manera integrada y paralela. Finalmente, los metaheurísticos modelados y el enfoque planteado para el problema de conformación de lotes no fueron detectados en los artículos del estado del arte, de allí del aporte al conocimiento alcanzado para la preparación de pedidos en el CEDI.

## 6. Validación experimental del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos

La validación experimental que se desarrolla en este capítulo tiene como propósitos principales: a) estudiar el desempeño que generan las reglas y metaheurísticos para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo; b) establecer, si los efectos principales e interacciones de los factores analizados en el problema en estudio son significativos sobre la variable de respuesta de interés y c) determinar, cuáles combinaciones de los niveles de los factores producen soluciones de menor tiempo total y mayor eficiencia, para el problema en modelamiento. Para la validación experimental, se emplean modelos de *DOE* (*Design of Experiment*), que permiten analizar de manera eficiente las reglas y metaheurísticos modelados, ya que implementan una metodología sistemática basada en métodos estadísticos. A continuación, se representan las siete etapas de la validación experimental basada en *DOE* (Figura 6-1):

**Figura 6-1:** Etapas de validación experimental con DOE





En la primera etapa (Figura 6-1), se plantean cinco preguntas de experimentación (PE), que establecen el enfoque y alcance del análisis estadístico desarrollado en la validación experimental. En la segunda etapa, se configura la unidad experimental, que caracteriza la operación de preparación de pedidos y el CEDI sobre el cual se planean y ejecutan las combinaciones de niveles del *DOE*. Por su parte, en la tercera etapa, se describen los factores y niveles seleccionados del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. En la cuarta etapa, se establecen las siguientes variables de respuesta: tiempo total de preparación de pedidos y eficiencia generada por la combinación de los niveles de los factores en análisis respecto al patrón de referencia. De otra parte, en la quinta etapa, se seleccionan y modelan algebraicamente los *DOE*, que se ejecutan para desarrollar la validación experimental. Dentro esta etapa, también se diseña el plan de experimentación, que determina el orden de ejecución de las corridas. En la sexta etapa, se realiza el análisis estadístico y se validan los supuestos de los modelos de *DOE* elegidos. A partir de estos resultados, se da respuesta a las preguntas de experimentación y se desarrolla la evaluación comparativa para establecer, cuál combinación de niveles de los factores produce una solución de mínimo tiempo total para el problema representado. Finalmente, en la octava etapa, se establecen las conclusiones de la validación experimental y el aporte al conocimiento logrado para esta área de investigación.

## **6.1 Preguntas de experimentación en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos**

En este subnumeral, se presentan cinco preguntas de experimentación (PE), con sus respectivas hipótesis nulas y alternas, que permiten orientar el objetivo y el alcance de la validación experimental con *DOE* del problema en estudio. Adicionalmente, para cada PE formuladas, se presentan algunas observaciones o factores asociados para facilitar su comprensión (Tabla 6-1).

**Tabla 6-1:** Preguntas de experimentación (PE), con sus hipótesis nulas y alternas

<p><b>PE1 ¿Determinar, si el metaheurístico PNS de conformación de lotes con ruteo integrado al WMS, permite disminuir el tiempo total e incrementar eficiencia de la preparación de pedidos, respecto a la implementación de la regla de prioridad PEPR(Primero Entregado Primero Recogido)</b></p>
<p>Esta pregunta permite medir las diferencias en el tiempo total y la eficiencia que genera la implementación del metaheurístico PNS respecto a la regla de prioridad PEPR. De esta manera, se pretende justificar cuantitativamente el aporte al conocimiento que produce el modelamiento del metaheurístico PNS para solucionar el componente de la conformación de lotes desde la perspectiva científica y empresarial.</p>
<p><b>PE2 ¿Establecer estadísticamente, cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes genera un menor tiempo total de preparación de pedidos?</b></p>
<p>Esta pregunta permite analizar estadísticamente cuál de las variantes del metaheurístico del búsqueda tabú integrados a la formación de lotes producen los menores tiempos totales y las mayor eficiencia de la preparación de pedidos. Debe tenerse en cuenta, que las rutas integradas a la conformación de lotes en el problema en estudio, se configuran con los siguientes variantes del metaheurístico de búsqueda tabú: RUPBTCLA, RUPBTDI 2-Opt Intercambio, RUPBTDI 2-Opt Inserción, RUPBTDI 3-Opt Intercambio, RUPBTDI 3-Opt Inserción y RUPBTIN. Por su parte, el componente de conformación de lotes se soluciona metaheurístico PNS y las regla de prioridad PEPR. Este enfoque se plantea porque el problema de conformación de lotes con ruteo, se soluciona de una manera integrada y paralela.</p>
<p><b>PE3 ¿Evaluar, si el mejor metaheurístico de búsqueda tabú para solucionar el componente de ruteo produce un menor tiempo total de preparación de pedidos, que la implementación de un metaheurístico de algoritmos genéticos?</b></p>
<p>La variante del metaheurístico de búsqueda tabú que se selecciona para la comparación experimental, es aquel, que generó el menor tiempo total para resolver el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, en la PE2. De esta manera, se analiza el desempeño de la búsqueda tabú respecto a un metaheurístico que ha mostrado buen desempeño para resolver esta clase de problemas en la literatura científica (Tsai <i>et al.</i>, 2008; Kulak <i>et al.</i>, 2012).</p>
<p><b>PE4 ¿Evaluar, si el factor grupo de K EMMateriales heterogéneos y sus interacciones, tienen un efecto significativo sobre el tiempo total y la eficiencia en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos?</b></p>
<p>Esta PE4 permite evaluar si el factor grupo de K EMMateriales heterogéneos afecta significativamente la solución del problema de conformación de lotes con ruteo. Debe resaltarse, que ninguno de los artículos estudiados en el SLR modeló K EMMateriales heterogéneos, de allí la importancia de validar el efecto de este factor, ya que permitiría generar un aporte al conocimiento soportado en un análisis cuantitativo.</p> <p>En la validación experimental de esta pregunta utilizando DOE, se incluyen factores como: metaheurístico PNS, regla de prioridad PEPR para la conformación de lotes, variantes de metaheurísticos de búsqueda tabú(RUPBTCLA,RUPBTIN y RUPBTDI), ubicación del depot , política de inventario y K EMMateriales heterogéneos</p>
<p><b>PE5 ¿Analizar, si el factor política de inventario y sus interacciones, presentan un efecto significativo sobre el tiempo total y la eficiencia, en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos?</b></p>
<p>Esta pregunta es formulada para estudiar estadísticamente si el factor política de inventario y sus interacciones afectan significativamente las soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo. En la literatura científica únicamente el artículo de Daniels <i>et al.</i>, (1998) modelo la condición de disponibilidad del inventario, pero no se evaluaron diferentes niveles de políticas de inventario. Por este motivo, en la validación experimental se estudian tres niveles de la política de inventario: a) Ajustada, baja cantidad de productos en inventario (nivel 1), b) Moderada, cantidad de inventario según pronóstico de la demanda, por lo cual, es una política intermedia a la moderada y la conservadora, y c) conservadora, con alta cantidad de productos en inventario para evitar rotura. Con la inclusión del factor política de inventario, se pretende contribuir al fortalecimiento y avance del modelamiento del problema de conformación de lotes con ruteo, en esta operación del CEDI.</p>

Una vez se presentan las cinco PE (Tabla 6-1), se procede a la descripción de los factores, las variables de respuesta y se eligen los modelos de DOE cuyos análisis estadísticos permiten validar los enfoques de solución desarrollados. En el anexo D, se

presentan las hipótesis nulas y alternas para las cinco preguntas formuladas. En el siguiente apartado, se caracteriza la unidad experimental, sobre la cual, se ejecutan las corridas para la experimentación.

## 6.2 Unidad experimental para la conformación de lotes con ruteo de la preparación de pedidos de mínimo tiempo

La unidad experimental es un CEDI con un *layout* en forma de bloque con 4 pasillos (pl), 192 posiciones de almacenamiento y un área de 720 m<sup>2</sup>. Las características de este CEDI fueron descritas en la unidad experimental de la validación del problema de conformación de lotes con ruteo, en la operación de acomodo en la sección 0.

En el CEDI establecido como unidad experimental, se ejecuta una operación de preparación de pedidos, que consiste en recoger cajas, canastillas o bultos con los productos *i* solicitados en órdenes de los clientes (OC). Estos productos posteriormente se consolidan y paletizan en la operación de *packing*, la cual, no se considera en el alcance de la unidad experimental.

Un parámetro que permite caracterizar la dinámica del CEDI como unidad experimental, es el tamaño de las órdenes de los clientes (*oc*) que ingresan al proceso logístico. Las *oc* se modelan con una variable aleatoria que sigue una distribución uniforme  $U\sim(T1,T2)$ , que permite establecer la cantidad de productos *i* solicitados por un cliente en la cadena de logística. Debe tenerse en cuenta, que el T1, es el valor mínimo y T2 el valor máximo de tamaño de una *oc* cuando esta se representa con la distribución uniforme. Una vez, se establece el tamaño de la *oc*, se determina la referencia y cantidad de productos que la conforma, la cual, se modela con un procedimiento implementado en el *WMS*. De otra parte, el tiempo entre llegadas de *oc*, se modela como una distribución exponencial  $(1/\lambda)$ .

De otra parte, las políticas de almacenamiento que se establecen en el CEDI son clasificación ABC y ubicaciones en posiciones aleatorias. Estas políticas fueron descritas detalladamente en la unidad experimental del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo sección 0.

En el CEDI representado también se implementan estrategias de ruteo de mínimo tiempo integradas a la conformación de lotes  $LP\epsilon CSLPr$ , que se resuelven con metaheurísticos de búsqueda tabú clásico (RUPBTCLA), con intensificación (RUPBTIN) y diversificación

(RUPBTDI). Como resultado de los metaheurísticos, se obtienen secuencias de mínimo tiempo, para recoger los  $n$  productos  $i \in LP_k$  de las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ , empleando los  $K$  EMMateriales heterogéneos asignados y la condición de disponibilidad del inventario.

En el problema de conformación de lotes con ruteo se modelan siguientes tiempos en la preparación de pedidos. Tiempo de desplazamiento dentro y entre los pasillos para recoger los productos  $i$  ubicados en las posiciones de almacenamiento  $j$  (1), se determina, según la velocidad (metros/minuto) y los metros que recorren los  $K$  EMMateriales heterogéneos. El tiempo de extracción del producto  $i$  de la posición de almacenamiento  $j$  (2) depende del nivel de la estantería en que se encuentra ubicado y de las características del EMMateriales  $K$  asignado para la operación. Las velocidades y distancias de las operaciones de preparación de pedidos, se establecen según los datos registrados en las tablas de origen y destino entre las posiciones de almacenamiento  $j$  en el CEDI. Finalmente, el tiempo de programación para la conformación de lotes con ruteo (3), depende de la cantidad de  $OC$ , de las características del CEDI y de las capacidades computacionales del equipo en que se corre el modelamiento, entre otros factores. Los diferentes tiempos descritos, se registran y gestionan en el *WMS*.

### 6.3 Factores y niveles en la conformación de lotes con ruteo para la preparación de pedidos

En este subnumeral, se presentan los factores y niveles, que se analizan estadísticamente con los modelos de *DOE*, para determinar, cuales, tienen efecto significativo en la solución del problema en estudio. Los factores elegidos, se obtienen de la revisión de la literatura académica, los resultados de la metodología *SLR* y el conocimiento de la operación de la preparación de pedidos (Frazelle y Rojo, 2006; (Albareda *et al.*, 2009; Bartholdi y Hackman, 2011; Henn, 2010; Henn y Wäscher, 2012). A continuación, se describen los seis factores con los respectivos niveles elegidos:

**F1: Conformación de lotes.** Este factor, permite resolver el componente de conformación de lotes en el problema en estudio, implementando los siguientes niveles.

n1: Metaheurístico *PNS* de conformación de lotes basado en búsqueda en vecindarios.

n2: Regla de prioridad *PEPR* (Primero Entregado Primero Recogido) lista de pedidos.

**F2: Ruteo integrado a la conformación de lotes.** Este factor, permite analizar estadísticamente cuál de las variantes metaheurísticas de búsqueda tabú que resuelven el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes permite obtener el menor tiempo posible de preparación de pedidos. A continuación, se representan los seis niveles del factor de ruteo:

n1: RUPBTCLA (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú clásica)

n2: RUPBTDI 2-Opt Inserción (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación)

n3: RUPBTDI 2-Opt Intercambio (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación)

n4: RUPBTDI 3-Opt Inserción (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación)

n5: RUPBTDI 3-Opt Intercambio (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú diversificación)

n6: RUPBTIN con matriz de frecuencia (Ruteo de preparación de pedidos búsqueda tabú intensificación).

Se configuran seis niveles, ya que se tiene interés de determinar estadísticamente, cuál de las variantes del metaheurístico tabú generan el mejor desempeño y mayor eficiencia para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes. Además, estos metaheurísticos fueron un componente principal modelado en la tesis y de allí el interés de validarlos estadísticamente.

**F3: Tamaño de la OC o la lista preparación de pedidos (*Picking List*).** Este factor permite analizar estadísticamente el efecto de dos tamaños de listas de preparación (*picking list*), en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo. A continuación, se presentan los dos niveles de este factor:

n1=150 productos/lista

n2=250 productos/lista

La selección de los dos tamaños de lista, se justifican por: i) La cantidad de posiciones de almacenamiento y el número de *SKU* (*Stock Keep Unit*) en el CEDI y ii) composición de las órdenes de los clientes (OC) (Albareda *et al.*, 2009; Bartholdi y Hackman, 2011;

Henn, 2012). De otra parte, el tamaño de lista del nivel 2 es casi el doble del nivel 1, ya que se tiene interés en cuantificar la diferencia de tiempo que se genera entre los niveles de este factor. Este enfoque se plantea, porque en pruebas iniciales de validación se detectó diferencias entre estos dos niveles, debido a la cantidad de productos que se deben recoger por lista.

**F4: Ubicación del *DEPOT*.** Este factor tiene como propósito analizar estadísticamente, que efecto tiene la ubicación del *depot* en el tiempo promedio total de la preparación de pedidos. Para este factor, se seleccionan las siguientes ubicaciones del *depot*, los cuales suelen ser los más referenciados en la literatura científica (Albareda *et al.*, 2009; Bartholdi y Hackman, 2011; Henn y Schmid, 2013).

n1: Central

n2: Extremo izquierdo del CEDI

**F4: Grupos de *K* EMMateriales heterogéneos.** Este factor tiene como objetivo analizar estadísticamente, si el grupo de *K* EMMateriales heterogéneos y sus interacciones, tienen un efecto significativo, en la solución del problema en estudio. A continuación, se representan los tres niveles del factor grupos de EMMateriales *K*:

n1: 1 EMMateriales ( 1 Order Picker\* )

n2: 3 EMMateriales heterogéneos ( 2 Order Picker\* y 1 Montacarga\*\* )

n3: 5 EMMateriales heterogéneos ( 3 Order Picker\* y 2 Montacarga\*\* )

A continuación, se presentan las características de los EMMateriales (Tabla 6-2)

**Tabla 6-2:** Características EMMateriales modelados en la experimentación.

	Capacidad de carga	Velocidad de viaje	Altura máxima
Order Picker(OP)*	1550 kg(1,2 m <sup>3</sup> )	168,33 metros/min	5 metros
Montacargas**	2665 kg(1,4 m <sup>3</sup> )	146,33 metros/min	5 metros

Para reducir la variabilidad en la validación experimentación, los mismos *K* EMMateriales se utilizaran en la configuración de los grupos de los niveles n2 y n3.

**F6: Política de Inventario.** Este factor tiene como objetivo evaluar el efecto de dos políticas de inventario sobre el tiempo de preparación de pedidos.

n1: Nivel ajustado, equivalente a 5 productos/*SKU* en inventario.

n2: Nivel conservador, equivalente a 15 productos/*SKU* en inventario.

Un nivel 15 productos/referencia en inventario puede generar más desplazamientos en la preparación de pedidos, porque un producto *i* de una misma referencia, puede ubicarse en varias posiciones de almacenamiento *j* dentro de la zona asignada. Adicionalmente, se seleccionaron las políticas de inventario más implementadas en un CEDI (Daniels *et al.*, 1998; Bartholdi y Hackman, 2011).

## **6.4 Variables respuesta en la conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo de preparación de pedidos**

Las variables respuesta (VR), que se modelan para estudiar los efectos de los diferentes factores en el problema de conformación de lotes con ruteo, se presentan a continuación:

- (VR1)Tiempo mínimo total de preparación de pedidos (minutos (min)/CSLPr), que producen las soluciones del problema de conformación de lotes con ruteo, que se componen de las combinaciones de los niveles de los factores en estudio.
- (VR2) Medición del % de eficiencia que genera las combinaciones de los niveles de los factores evaluación respecto a un patrón de referencia, en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.
- (VR3)Número de veces que una regla o metaheurístico para resolver los componentes de conformación de lotes y ruteo, producen una solución de menor tiempo total, que los patrones de referencia establecidos.

## **6.5 Selección y descripción de modelos de *DOE* que soportan las respuestas a las PE.**

En este apartado se seleccionan y modelan *DOE*, que permiten desarrollar los análisis estadísticos, para responder las cinco PE formuladas. Para la selección de los diseños, se consideran criterios como: capacidad de modelamiento estadístico del problema en estudio, cumplimiento de los supuestos estadísticos y eficiencia en la experimentación. A continuación, se presentan los *DOE* elegidos para cada una de las PE, que incluye su modelamiento algebraico, aspectos de su planeación y plan de experimentación.

### 6.5.1 Modelos de *DOE* seleccionados para responder las PE1, PE2, PE4 y PE5

El análisis estadístico para responder las PE1, PE2, PE4 y PE5, puede realizarse con un sólo modelo de *DOE*, ya que los componentes del problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos se solucionan de una manera integrada y simultanea. Con este enfoque, se pretende incrementar la eficiencia de la experimentación, garantizando la validez estadística de los resultados.

Un diseño de parcelas divididas con el factor grupo de *K* EMMateriales heterogéneos como difícil de variar en la experimentación, puede elegirse como una alternativa para desarrollar el análisis estadístico. Esto se plantea, porque este factor genera una restricción a la aleatorización, que no permite ejecutar aleatoriamente los tratamientos (Gutiérrez y De La Vara, 2010). La restricción a la aleatorización descrita, suele ser más crítica, cuando los *K* EMMateriales heterogéneos del grupo, se utilizan en diferentes operaciones del CEDI o el sistema productivo de la empresa, lo cual, reduce su disponibilidad para la experimentación.

A continuación, se representa la estructura del *DOE* de parcelas divididas, la cual incluye el factor de difícil (F5) y los factores (F1, F2, F3, F4, F6) fáciles de modificar en la experimentación (Tabla 6-3).

**Tabla 6-3:** Estructura de parcela dividida problema conformación de lotes.

Tamaño del grupo de <i>K</i> EMMateriales heterogéneos(factor difícil de cambiar)(F5)	
<b>K=1</b>	<p><b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>PNS</i> y <i>PEPR</i>  <b>F2:</b> Estrategia de ruteo: RUPBTCLA, RUPBTDI 2-Opt Inserción, RUPBTDI 2-Opt Intercambio, RUPBTDI 3-Opt Inserción, RUPBTDI 3-Opt Intercambio, RUPBTIN.  <b>F3:</b> Ubicación <i>DEPOT</i>: Central y Pos0_Izquierdo.  <b>F4:</b> Tamaño de la lista de <i>picking</i> (<i>PickingList</i>):150 y 250.  <b>F6:</b> Política de inventario: Ajustado (5 productos) y conservador (15 productos).</p>
<b>K=3</b>	<p><b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>PNS</i> y <i>PEPR</i>  <b>F2:</b> Estrategia de ruteo: RUPBTCLA, RUPBTDI 2-Opt Inserción, RUPBTDI 2-Opt Intercambio, RUPBTDI 3-Opt Inserción, RUPBTDI 3-Opt Intercambio, RUPBTIN.  <b>F3:</b> Ubicación <i>DEPOT</i>: Central y Pos0_Izquierdo.  <b>F4:</b> Tamaño de la lista de <i>picking</i> (<i>PickingList</i>):150 y 250.  <b>F6:</b> Política de inventario: Ajustado (5 productos) y conservador (15 productos).</p>
<b>K=5</b>	<p><b>F1:</b> Conformación de lotes: Metaheurístico <i>PNS</i> y <i>PEPR</i>  <b>F2:</b> Estrategia de ruteo: RUPBTCLA, RUPBTDI 2-Opt Inserción, RUPBTDI 2-Opt Intercambio, RUPBTDI 3-Opt Inserción, RUPBTDI 3-Opt Intercambio, RUPBTIN.  <b>F3:</b> Ubicación <i>DEPOT</i>: Central y Pos0_Izquierdo.  <b>F4:</b> Tamaño de la lista de <i>picking</i> (<i>PickingList</i>):150 y 250.  <b>F6:</b> Política de inventario: Ajustado(5 productos) y convservador(15 productos).</p>



Una vez, se configura la estructura y la planeación del modelo de *DOE* de parcelas divididas, a continuación, se representa su modelo estadístico, el cual considera los efectos de los factores principales e interacciones y términos del error:

$$Y_{ijklhv} = \mu + F5_h + U_{ijklv(h)} + F1_i + F2_j + F3_k + F4_l + F6_v + (F1F2)_{ij} + (F1F3)_{ik} + (F1F4)_{il} + (F1F5)_{ih} + (F1F6)_{iv} + (F2F3)_{jk} + (F2F4)_{jl} + (F2F5)_{jh} + (F2F6)_{jv} + (F3F4)_{kl} + (F3F5)_{kh} + (F3F6)_{kv} + (F4F5)_{lh} + (F4F6)_{lv} + (F5F6)_{hv}$$

$Y_{ijklhv}$  : Tiempo total de preparación de pedidos, que se compone de los  $LP \in CSLPr$

$\mu$  : Tiempo promedio total de preparación de pedidos

$U_{ijklv(h)}$  : Error de la parcela grande (aleatorio)

$\epsilon_{ijklhv}$  : Error de la parcela pequeña (aleatorio)

$F1_i$  : Efecto principal estrategia conformación de lotes (F1)

$F2_j$  : Efecto principal estrategia de ruteo (F2)

$F3_k$  : Efecto principal tamaño de lista de acomodo (TLAcomodo)(F3)

$F4_l$  : Efecto principal ubicación del *depot* (F3)

$F5_h$  : Efecto principal grupo de EM Materiales  $K$

$(F1F2)_{ij}$  : Efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y ruteo(F2)

$(F1F3)_{ik}$  : Efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y TLPpedidos(F3)

$(F1F4)_{il}$  : Efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y ubicación del *depot*

$(F1F5)_{ih}$  : Efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y grupo  $K$  EM Materiales heterogéneos(F5)

$(F1F6)_{iv}$  : Efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y política de inventario (F6)

$(F2F3)_{jk}$  : Efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y TLPpedidos(F3)

$(F2F4)_{jl}$  : Efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y ubicación del *depot*(F4)

$(F2F5)_{jh}$  : Efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y grupo  $K$  EM Materiales heterogéneos (F5)

$(F2F6)_{jv}$  : Efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y política de inventario(F6)

$(F3F4)_{kl}$  : Efecto interacción TLPpedidos (F3) y ubicación del depot (F4)

$(F3F5)_{kh}$  : Efecto interacción TLPpedidos (F3) y  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5)

$(F3F6)_{kv}$  : Efecto interacción TLPpedidos (F3) y política de inventario (F6)

$(F4F5)_{lh}$  : Efecto interacción TLPpedidos (F3) y  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5)

$(F4F6)_{lv}$  : Efecto interacción ubicación del depot (F3) y política de inventario (F6)

$(F5F6)_{hv}$  : Efecto interacción grupo  $K$  EMMateriales heterogéneos(F5) y política de inventario (F6).

La metodología de implementación del *DOE* de parcelas divididas, inicia con la asignación aleatoria de cada nivel del factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos (parcela principal). Seguidamente, se forman aleatoriamente los tratamientos con los factores fáciles de modificar en la experimentación dentro de cada uno de los tres niveles de la parcela principal. A cada una de las 288 combinaciones de los niveles de los factores (tratamientos) configuradas, se le ejecutan dos replicas que generan 576 corridas. Las combinaciones de los niveles y las réplicas permiten diseñar el plan experimental, el cual se presenta en el Anexo E.

Posteriormente, las 576 corridas asociadas a las combinaciones de los niveles registrados en el plan de experimentación, se ejecutan en los modelos computacionales, que contienen las reglas de prioridad y metaheurísticos integrados a un *WMS*. De esta manera, se obtienen los tiempos de preparación de pedidos, los cuales son analizados estadísticamente con las técnicas analíticas y gráficas del diseño seleccionado.

### 6.5.2 Modelos de DOE seleccionados para responder la PE3

La respuesta a esta pregunta PE3, puede obtenerse a partir del análisis estadístico de un diseño de parcelas divididas (*split plot*), similar al descrito para las PE1, PE2, PE4 y PE5. La única diferencia, se presenta en la configuración del factor metaheurísticos de ruteo (F2), ya que, se modelan dos niveles denominados "Mejor RUPBT"(mejor ruteo preparación de pedidos búsqueda tabú) y metaheurístico algoritmo genético(nivel 2).

El nivel "mejor RUPBT" del factor estrategia de ruteo integrada a la conformación de lotes (F2), corresponde al metaheurístico de búsqueda tabú, que permitió obtener la solución de menor tiempo total de preparación de pedidos. Por su parte, el nivel algoritmo

genético, se selecciona, ya que es un metaheurístico que ha mostrado buen desempeño para solucionar problemas combinatoriales en la gestión de almacenes, incluyendo la preparación de pedidos (Tsai *et al.*, 2008; Kulak *et al.*, 2011). De esta manera, se pretende desarrollar una evaluación comparativa de la mejor variante del metaheurístico de búsqueda tabú (RUPBT) respecto al algoritmo genético, para determinar, cuál de los dos niveles, genera soluciones de menor tiempo total, en el problema en estudio.

Para responder esta PE3, se elige un *DOE* de parcelas divididas, con el factor grupo de *K* de EM Materiales heterogéneos (F5) como difícil de cambiar en la experimentación, ya que origina la misma restricción en la aleatorización, que se presentó en las PE1, PE2, PE4 y PE5. Entre los factores fáciles de modificar en la experimentación, se incluyen: estrategias de conformación de lotes (F1), estrategias de ruteo (F2), ubicación del *depot* (F3), tamaño de la lista de preparación de pedidos (F4) y política de nivel de inventario (F6).

El modelo estadístico del *DOE* de parcelas divididas para la PE3, incluye el efecto principal e interacciones del factor estrategia de ruteo (F2), efecto de la parcela principal grupo de *K* EM Materiales (F5), los términos del error, entre otros términos, que se representan, a continuación:

$$Y_{ijklhv} = \mu + F5_h + U_{ijklv(h)} + F2_j + (F1F2)_{ij} + (F2F3)_{jk} + (F2F4)_{il} + (F2F5)_{jh} + (F2F5)_{jh} + (F2F6)_{jv} + \epsilon_{ijklhv}$$

$Y_{ijklhv}$ : Tiempo total de preparación de los pedidos, que se compone por los  $LP \in CSLPr$

$\mu$ : Tiempo promedio total de preparación de pedidos

$U_{ijklv(h)}$ : Error de la parcela grande (aleatorio)

$\epsilon_{ijklhv}$ : Error de la parcela pequeña (aleatorio)

$F2_j$ : Efecto principal estrategia de ruteo

$(F2F4)_{il}$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y ubicación del *depot*

$(F2F3)_{jk}$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y tamaño de lista de preparación de pedidos

$(F2F6)_{jv}$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y política nivel de inventario

$(F2F5)_{jh}$ : Efecto interacción factores estrategia de ruteo y grupo de *K* EM Materiales heterogéneos

$(F1F2)_{ij}$  : Efecto interacción factores conformación de lotes y estrategia de ruteo

En el modelo de *DOE* parcelas divididas para esta PE3, se diseña un plan de experimentación con 144 tratamientos, que ejecuta dos replicas, para producir un total de 288 corridas. Estas corridas son analizadas estadísticamente para dar respuesta a la PE3. El plan de experimentación detallado para este *DOE*, se presenta en el Anexo E Finalmente, debe tenerse en cuenta que la metodología de implementación del *DOE* de parcelas divididas en esta PE3, es equivalente, a la descrita en las PE1, PE2 y PE5, por tal motivo, no se detalla.

Una vez se seleccionan, modelan y ejecutan las corridas de los diseños para las PE planteadas, se procede al desarrollo de los análisis estadísticos y la verificación de los supuestos, empleando el software Infostat® en su versión académica. A partir de los resultados del análisis estadístico, se estudian las hipótesis y se responden las cinco PE. En los próximos apartados se presentan los resultados obtenidos de los análisis estadísticos de los diseños modelados.

## 6.6 Respuestas de las PE basado en el análisis del *DOE*

En esta sección, se da respuesta a las cinco PE, utilizando los resultados obtenidos en los análisis estadísticos de los diseños seleccionados en la experimentación. Para presentar las respuestas de las PE, se emplean tablas de *ANOVA (Analysis of Variance)*, gráficos y otras representaciones, que permiten registrar los tiempos y las eficiencias, que producen las combinaciones de los niveles de los factores en el problema en estudio.

La estructura de esta sección, se divide en dos etapas. En la primera etapa, se diseña una tabla dónde se registra el tiempo promedio total de preparación de pedidos, que producen las dos réplicas de los 288 escenarios o combinaciones de los niveles de los factores modelados y la eficiencia que genera cada solución respecto a los patrones de referencia establecidos en la experimentación. Por su parte, en la segunda etapa se desarrolla un análisis estadístico de las corridas de los tratamientos, utilizando los diseños elegidos, con el propósito de: a) establecer si los efectos principales e interacciones de los factores en estudio son significativos sobre la variable de respuesta y b) determinar cuáles combinaciones de los niveles de los factores o escenarios, producen soluciones de menor tiempo total y mayor eficiencia para el problema en

estudio. A partir de la información y hallazgos que se obtienen del análisis estadístico se procede a dar respuesta a las cinco PE planteadas.

### 6.6.1 Representación de las soluciones de las combinaciones de niveles de los factores para el problema en estudio

Esta sección tiene como propósito representar el tiempo promedio total y la eficiencia que generan cada uno de los escenarios o combinaciones de los niveles de los factores analizados, los cuales corresponden a las soluciones del problema en estudio. Dentro del presente análisis, no se incluye el nivel algoritmo genético del factor estrategia de ruteo (RUPGA\_Ruteo preparación de pedidos algoritmo genético)(F2), ya que este se modela como un metaheurístico de referencia(*benckmark*). De esta manera, se pretende determinar, si este produce menores tiempos promedios totales y mayor eficiencia, que el mejor metaheurístico de búsqueda tabú (mejor RUPBT-Ruteo preparación de pedidos búsqueda tabú), en la PE2. Debe señalarse, que el mejor metaheurístico de búsqueda tabú, se obtiene del análisis estadístico de la PE1.

Para facilitar la presentación de las soluciones, se diseña una tabla, que contiene todas las combinaciones de niveles de los seis factores modelados para el problema en estudio. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que a cada escenario se le ejecutaron dos replicas, lo cual generó un total de 576 corridas que se analizaron estadísticamente para dar respuesta a las cinco PE. El orden de ejecución de las corridas en los modelos computacionales, para obtener las soluciones del problema, se establece en el plan de experimentación del *DOE* (Anexo E).

Para la medición de la eficiencia que genera cada solución con relación al patrón establecido en la experimentación, se emplea la siguiente expresión:

$$\%eficiencia = \frac{T_{totalTratamientoActual} - TiempoTotalPatron}{TiempoTotalPatron} \quad (6.21)$$

-*%eficiencia*: Aumento o reducción del tiempo total de la preparación de pedidos que genera el tratamiento en evaluación respecto al patrón de referencia.

-*TTotalTratamientoActual*: Tiempo total de preparación de pedidos que genera el tratamiento o escenario actual en evaluación.

-*TiempoTotalPatron*: Tiempo total que produce la solución establecida como el patrón de referencia en la experimentación.

En las PE1, PE2, PE3, PE4 y PE5, se fijan los siguientes patrones de referencia, que se forman con las combinaciones de niveles (Tabla 6-4)

**Tabla 6-4:** Patrones de referencia para la experimentación

Factor	Nivel	
Estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1)	PEPR(Primero en Entrar Primero en Recoger)	
Estrategia de ruteo (ER)(F2)	RUBTCLA ( <i>Ruteo Preparación de Pedidos Búsqueda Tabú Clásico</i> )	
Tamaño lista de preparación de pedidos (TLPpedidos)(F3)***	150	250
Ubicación del <i>depot</i> (F4)	Derecha	
Grupo <i>KEM</i> Materiales heterogéneos (F5)	$K=1$	
Política de inventario(F6)	Conservadora 15 productos	

Nota: Los dos patrones de referencia establecidos difieren únicamente en el tamaño de la lista de pedidos (TLPpedidos). Estas diferencias se presentan porque a menor TLPpedidos, en el *CSLPr* se deben recoger menos productos, lo cual, genera un menor tiempo promedio total. Este planteamiento, se obtuvo de una validación estadística inicial del problema. Por este motivo, el interés de la validación es establecer si el efecto principal o las interacciones de este factor son significativos sobre el tiempo promedio total. En el caso, que sean significativa, se pretende determinar la magnitud de las diferencias que producen los niveles del TLPpedidos.

Los niveles de los factores que componen los dos patrones de referencia, representan la configuración típica del problema de conformación de lotes con ruteo. Para escoger los niveles, se utilizaron los resultados de la metodología *SLR* del estado del arte, información técnica y el conocimiento en la operación (Daniels *et al.*, 2014; Henn y Wäsher ,2012; Kulak *et al*, 2012; Matusiak *et al.*, 2014). Respecto a la política de inventario, se eligió al azar los niveles de 5 y 15 productos/*SKU*, ya que no se identificaron en la literatura fundamentos cuantitativos o planteamientos teóricos, que indicaran que cantidades de productos eran los más comunes para establecer una política conservadora y ajustada. A continuación, se presentan el tiempo promedio total y la eficiencia que producen cada uno de los 288 escenarios, para el problema de conformación de lotes con ruteo (Tabla 6-5).

**Tabla 6-5:** Tiempo promedio total y eficiencia de las soluciones del problema.

ECL (F1)	Plnven Tario (F6)	Depot (F3)	TLP pedidos (F4)	Grupo Emmate-eriales (F5)	ER(F6)								
					RUPBT DI 2-Opt Ins	RUPBTDI 2-Opt Int	RUPBTDI 3-Opt Ins	RUPBTDI 3-Opt Int	RUPBT CLA	RUPBTIN			
PEPR***	5	Centro	150	1	66,73 0,00%	65,67 1,59%	65,27 2,19%	65,35 2,08%	66,73 0,00%	65,43 1,96%			
				3	29,81 55,33%	29,05 56,47%	29,40 55,94%	29,40 55,94%	29,89 55,20%	28,87 56,74%			
				5	18,61 72,12%	18,99 71,54%	18,13 72,84%	18,73 71,94%	19,92 70,15%	19,10 71,38%			
				250	1	113,94 -1,38%	115,02 -2,34%	114,55 -1,93%	114,29 -1,69%	112,39 0,00%	114,87 -2,21%		
					3	40,92 63,59%	40,84 63,66%	40,97 63,55%	41,19 63,35%	41,02 63,51%	40,89 63,62%		
					5	104,24 7,25%	103,97 7,49%	103,23 8,15%	103,35 8,04%	104,49 7,03%	104,18 7,30%		
			Izquierda		150	1	68,14 -2,11%	68,29 -2,34%	68,75 -3,02%	68,75 -3,02%	69,17 -3,65%	68,08 -2,02%	
						3	27,01 59,53%	26,95 59,61%	27,42 58,91%	27,67 58,54%	27,67 58,54%	27,67 58,54%	
						5	58,35 12,56%	58,33 12,58%	57,69 13,55%	58,37 12,54%	58,95 11,66%	58,00 13,08%	
				250	1	113,52 -1,01%	114,38 -1,77%	113,98 -1,42%	113,74 -1,20%	112,11 0,25%	114,07 -1,50%		
					3	103,58 7,84%	103,28 8,10%	102,98 8,37%	103,39 8,01%	104,33 7,17%	103,33 8,06%		
					5	34,26 69,51%	35,00 68,86%	34,39 69,40%	33,93 69,81%	34,74 69,09%	35,16 68,72%		
		15	Centro	150	1	63,57 4,73%	63,30 5,15%	63,27 5,19%	63,34 5,09%	64,23 3,75%	63,11 5,43%		
					3	29,21 56,22%	28,53 57,25%	27,20 59,24%	27,69 58,51%	30,30 54,60%	28,60 57,15%		
					5	58,46 12,39%	58,02 13,05%	58,34 12,58%	57,74 13,48%	58,48 12,37%	58,27 12,69%		
					250	1	102,40 8,89%	101,78 9,44%	103,07 8,29%	102,88 8,46%	103,09 8,27%	101,63 9,58%	
						3	99,69 11,30%	99,63 11,35%	99,69 11,30%	99,68 11,31%	100,32 10,74%	99,72 11,27%	
						5	98,64 12,24%	98,85 12,04%	98,28 12,55%	98,46 12,39%	98,93 11,98%	98,88 12,02%	
				Izquierda		150 ***	1	62,65 6,12%	63,92 4,21%	62,45 6,42%	65,76 1,46%	66,10 0,94%	61,76 7,46%
							3	68,34 -2,42%	59,77 10,43%	61,96 7,16%	60,04 10,03%	60,46 9,39%	62,00 7,09%
							5	57,07 14,48%	63,38 5,03%	62,12 6,91%	61,41 7,98%	63,59 4,72%	63,38 5,02%
					250	1	102,11 9,15%	101,14 10,01%	101,21 9,95%	101,73 9,49%	101,67 9,54%	100,99 10,14%	
						3	99,07 11,85%	99,25 11,69%	98,90 12,00%	99,48 11,49%	100,18 10,87%	99,33 11,62%	
						5	30,64 72,74%	31,07 72,36%	31,09 72,34%	30,85 72,55%	31,34 72,12%	31,29 72,16%	

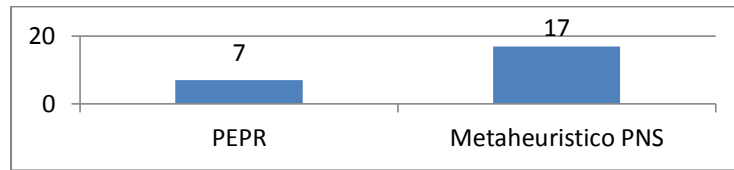
Tabla 6-5: (Continuación)

ECL (F1)	Plnven Tario (F6)	Depo t (F3)	TLP pedidos (F4)	Grupo Emmate-eriales (F5)	ER(F6)					
					RUPBTDI 2-Opt Ins	RUPBTDI 2-Opt Int	RUPBTDI 3-Opt Ins	RUPBTDI 3-Opt Int	RUPBT CLA	RUPBTI N
Metaheurístico PNS	5	Centro	150	1	66,78	65,87	65,62	65,62	67,16	65,72
					-0,07%	1,29%	1,66%	1,67%	-0,64%	1,52%
				3	30,17	29,69	30,11	30,19	30,61	29,87
					54,79%	55,51%	54,88%	54,77%	54,13%	55,23%
				5	12,41	12,85	12,91	12,91	12,91	12,91
					81,40%	80,74%	80,66%	80,66%	80,66%	80,66%
			250	1	114,96	114,76	115,51	116,23	114,18	114,34
					-2,29%	-2,11%	-2,77%	-3,41%	-1,59%	-1,74%
				3	43,34	43,60	43,82	43,94	44,31	43,63
					61,44%	61,20%	61,01%	60,90%	60,57%	61,18%
				5	25,32	25,24	25,08	24,75	25,56	25,27
					77,47%	77,54%	77,69%	77,98%	77,26%	77,52%
		Izquierda	150	1	66,19	66,78	66,76	66,66	68,11	66,71
					0,81%	-0,08%	-0,04%	0,11%	-2,07%	0,03%
				3	30,19	29,46	30,17	30,14	31,66	29,71
					54,76%	55,85%	54,79%	54,83%	52,55%	55,48%
				5	12,87	12,96	12,95	12,46	13,47	13,07
					80,72%	80,58%	80,59%	81,34%	79,81%	80,42%
			250	1	115,26	112,66	112,52	112,63	113,67	112,49
					-2,55%	-0,24%	-0,11%	-0,22%	-1,14%	-0,09%
				3	43,23	43,54	43,54	43,19	43,67	43,48
					61,53%	61,26%	61,26%	61,57%	61,14%	61,32%
				5	26,30	26,13	26,28	26,07	26,66	26,33
					76,60%	76,75%	76,62%	76,81%	76,28%	76,57%
	15	Centro	150	1	62,32	60,33	62,35	62,41	62,98	60,10
					6,62%	9,59%	6,56%	6,47%	5,63%	9,93%
				3	27,71	27,80	27,36	27,32	29,18	27,41
					58,48%	58,34%	59,00%	59,06%	56,27%	58,93%
				5	9,94	10,52	10,63	10,75	11,33	11,08
					85,10%	84,23%	84,07%	83,89%	83,02%	83,40%
			250	1	101,89	103,59	102,90	102,57	102,69	103,10
					9,34%	7,83%	8,45%	8,74%	8,63%	8,27%
				3	38,92	39,42	38,66	38,51	39,17	39,54
					65,37%	64,92%	65,61%	65,74%	65,15%	64,82%
				5	22,57	22,79	22,92	23,72	23,00	22,76
					79,92%	79,73%	79,61%	78,89%	79,54%	79,75%
		Izquierda	150	1	61,95	61,82	61,86	61,35	62,77	61,15
					7,17%	7,37%	7,30%	8,07%	5,94%	8,37%
				3	27,82	29,14	27,76	27,62	29,17	27,94
					58,31%	56,33%	58,40%	58,62%	56,28%	58,13%
				5	11,20	11,35	11,29	11,50	11,89	11,48
					83,22%	82,99%	83,08%	82,77%	82,18%	82,79%
			250	1	101,93	101,79	101,18	101,88	102,82	101,72
					9,30%	9,44%	9,97%	9,35%	8,52%	9,49%
				3	38,91	39,71	38,73	38,09	39,37	39,71
					65,38%	64,66%	65,54%	66,11%	64,97%	64,67%
				5	23,54	24,05	23,64	23,57	24,14	24,12
					79,05%	78,61%	78,97%	79,03%	78,52%	78,54%

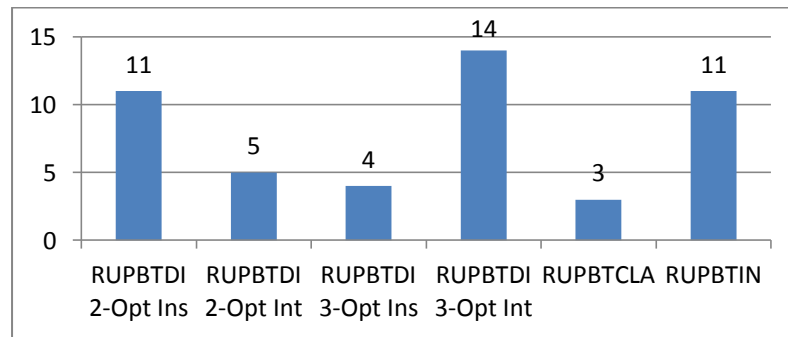


Para complementar la presentación de los resultados de las combinaciones de niveles (Tabla 6-5), a continuación, se calcula la cantidad de veces que la regla de prioridad y los metaheurísticos produjeron las soluciones de menor tiempo promedio total para el *CSLPr*. en el problema en estudio. Debe tenerse en cuenta que la regla y los metaheurísticos para resolver los componentes de conformación de lotes (F1) y ruteo (F2), se combinan con todos los niveles de los otros cuatros factores modelados.

**Figura 6-2:** Cantidad de veces que la regla de prioridad o el metaheurístico *PNS* produce la mejor solución.



**Figura 6-3:** Cantidad de veces que un metaheurístico de ruteo genera la mejor solución



De la Figura 6-2 relacionada con el componente conformación de lotes, se identifica que el metaheurístico *PNS* produce 17 de las 24 soluciones con el menor tiempo total para el problema en estudio. Los resultados presentados y el desempeño de la regla y los metaheurísticos se validan por medio del análisis estadístico del diseño *Split Plot* a desarrollar en el siguiente numeral. Respecto a la Figura 6-3, se detecta que los metaheurísticos RUPBTDI 3-Opt Int, RUPBTDI 2-Opt Ins y RUPBTIN para resolver el componente de ruteo generan las soluciones de menor tiempo total con frecuencias de 14, 11 y 11 veces respectivamente.

### 6.6.2 Respuestas a las cinco PE planteadas

Para responder las cinco PE, se realiza el análisis estadístico de las 288 soluciones, para determinar si los efectos principales e interacciones de los seis factores modelados, son significativos sobre el tiempo promedio total de la operación. Adicionalmente, con las

respuestas de las PE, se busca establecer la combinación de niveles, que producen las soluciones de menor tiempo promedio total, para el problema.

PE1 ¿Determinar, si el metaheurístico *PNS* de conformación de lotes con ruteo integrado al *WMS*, permite disminuir el tiempo total e incrementar eficiencia de la preparación de pedidos, respecto implementación de la regla de prioridad PEPR?

Para establecer, si el nivel metaheurístico *PNS* genera soluciones de menor tiempo promedio total, que el modelamiento de la regla PEPR en la conformación de lotes (F1), se estudia la *ANOVA* y los gráficos de medias para los efectos detectados como significativos. De esta manera, se busca medir las diferencias en el tiempo promedio total y el % de eficiencia, que se producen entre los niveles de este factor. A continuación, se presenta La *ANOVA* del diseño de parcelas divididas para esta P1, se calcula con el software InfoStat® (Tabla 6-6).

**Tabla 6-6:** ANOVA DOE parcelas divididas para PE1

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	639557,87	290	2205,37	2080,08	<0,0001
EMMateriales	247859,44	2	123929,72	530,81	0,0001
EMMateriales>Replica	700,41	3	233,47	220,20	<0,0001
ECL	70873,60	1	70873,60	66847,31	<0,0001
Depot	1,21	1	1,21	1,14	0,2855
TLPpedidos	126893,39	1	126893,39	119684,65	<0,0001
Pinventario	342,33	1	342,33	322,88	<0,0001
ER	30,53	5	6,10	5,75	<0,0001
EMMateriales*ECL	38121,84	2	19060,92	17978,08	<0,0001
EMMateriales*Depot	14366,21	2	7183,10	6775,03	<0,0001
EMMateriales*TLPpedidos	18372,82	2	9186,41	8664,53	<0,0001
EMMateriales*Pinventario	8134,75	2	4067,37	3836,31	<0,0001
EMMateriales*ER	10,99	10	1,09	1,03	0,41
ECL*Depot	0,009	1	0,01	0,008	0,92
ECL*TLPpedidos	6518,83	1	6518,83	6148,50	<0,0001
ECL*Pinventario	5357,35	1	5357,35	5053,01	<0,0001
ECL*ER	1,39	5	0,27	0,26	0,93
Depot*TLPpedidos	6178,76	1	6178,76	5827,75	<0,0001
Depot*Pinventario	989,27	1	989,27	933,07	<0,0001
Depot*ER	1,147	5	0,22	0,21	0,95
TLPpedidos*Pinventario	1138,27	1	1138,27	1073,60	<0,0001
TLPpedidos*ER	13,78	5	2,75	2,60	0,02
Pinventario*ER	2,55	5	0,51	0,48	0,78
Error	302,16	285	1,06		
Total	639860,04	575			

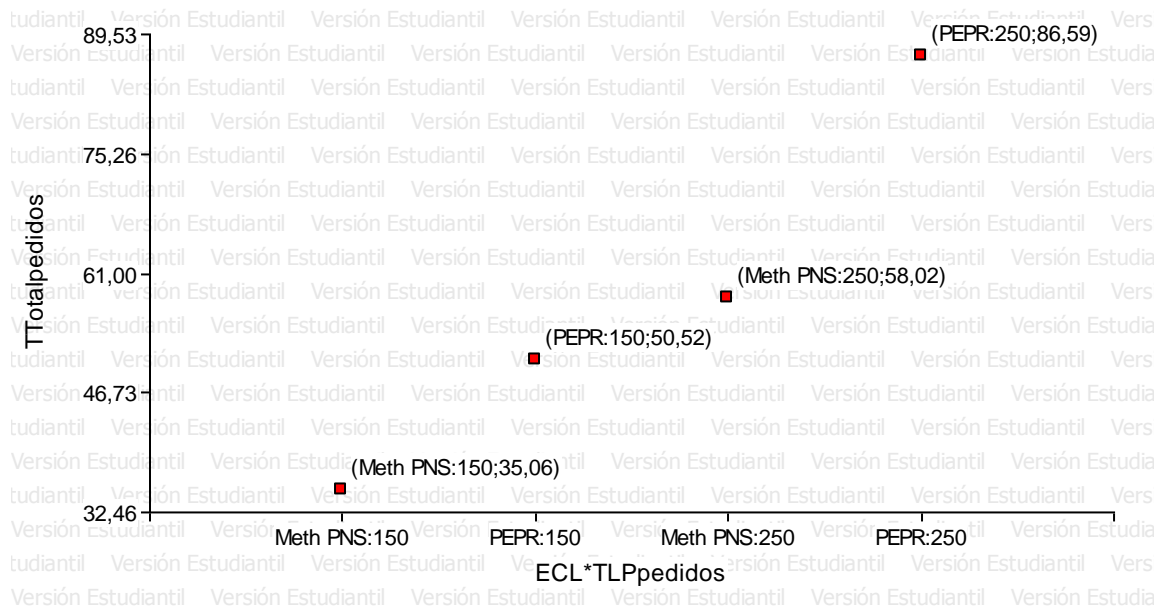
De la tabla ANOVA (Tabla 6-6), se detecta que el efecto principal del factor estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1) y sus interacciones dobles con los factores EMMateriales (F5), tamaño de la lista de preparación (TLPpedidos)(F3) y política de inventario(F6), afectan significativamente el tiempo total de la operación. Esto se plantea porque sus p-valores, son menores o iguales a 0.05. Por este motivo, se rechazan las hipótesis nulas ( $H_0$ ) del efecto principal e interacciones dobles identificadas como significativas en esta PE1.

Del análisis del error de la parcela principal (GrupoKequipos>Replica) y las subparcelas (error), se establece, que estos son apropiados, ya que representan apenas un 0.11% y 0,04% del error total del modelo. Por su parte, el valor  $R^2$ ajustado es de 99.6%, por lo cual, el modelo obtenido, permite analizar los efectos principales e interacciones de los factores de interés sobre la variable respuesta.

Respecto a la verificación de los supuestos del modelo, se estudia la normalidad y varianza homogénea de los residuos, empleando el análisis gráficos y pruebas analíticas, que se implementan con la versión académica del InfoStat®. Para estudiar, el supuesto de normalidad, se elabora un análisis gráfico Q-Q y la prueba analítica de *Shapiro Wilk*. Al aplicar la prueba analítica, se detecta que los residuos del modelo, no se comportan normalmente, porque su p-valor es 0.001(p-valor $\leq$ 0.05). Por este motivo, se procede a realizar una transformación de los residuos con una función raíz cuadrada, la cual, generó un comportamiento más cercano a una distribución normal. Con relación, al supuesto de la varianza homogénea, se detecta del análisis gráfico de residuos vs valores predichos, que este se cumple, porque los datos no evidencian una tendencia o patrón marcado. Otro aspecto que garantiza la validez del problema, es que los p-valores de los factor ECL y sus interacciones con el factor grupo EMMateriales y PInventario son menores a 0.001. Estos resultados ofrecen robustez estadística al modelo obtenido.

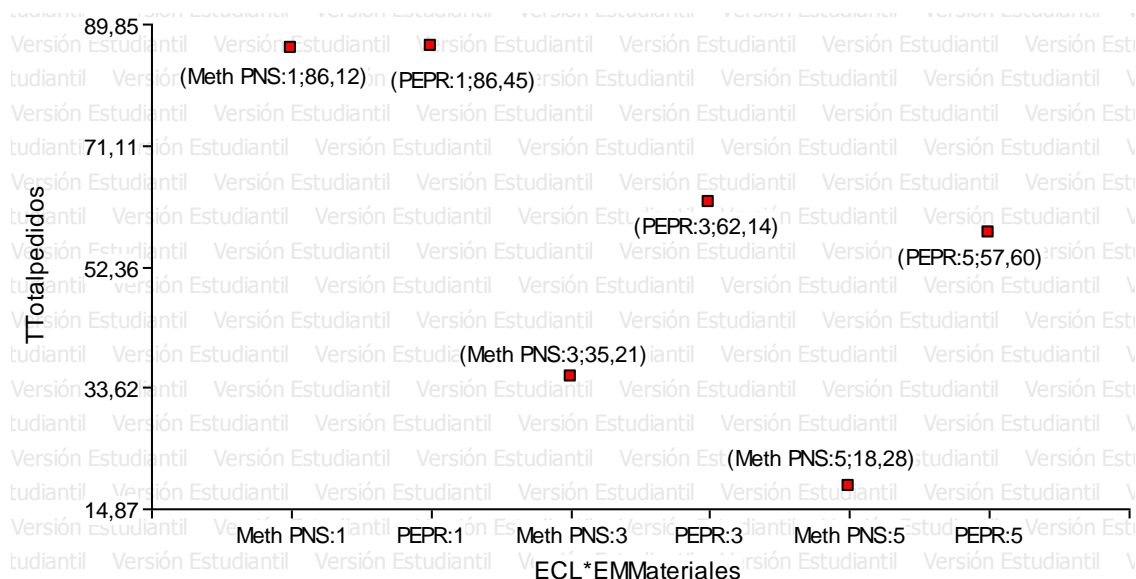
Para complementar el análisis estadístico del diseño de parcelas divididas, a continuación, se estudian los gráficos de medias de los efectos de las interacciones detectadas como significativas. No se estudia el efecto principal del factor 1 Estrategia de conformación de lotes (ECL), ya que sus conclusiones no son válidas al existir interacciones dobles significativas.

**Figura 6-4:** Tiempo promedio total de la interacción ECL (F1)\*TLPpedidos (F3).



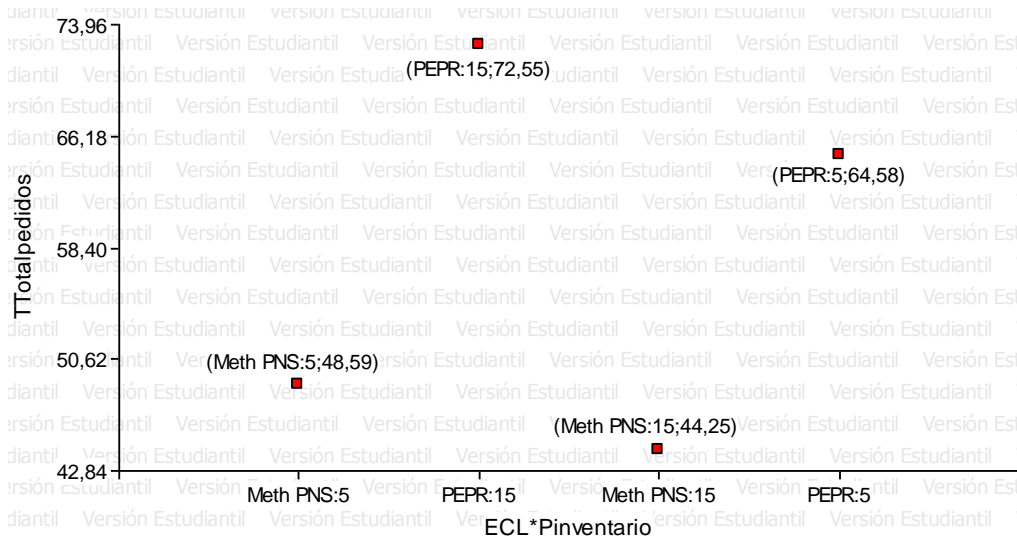
De la interacción (Figura 6-4), se identifica que la combinaciones del nivel metaheurístico *PNS* (F1) con los TLPpedidos 150 y 250(F3), generan reducciones en el tiempo promedio total de la operación en 28,57 y 15,46 min/CSLPr respecto a la regla de prioridad PEPR. Inclusive, las mejoras que produce el metaheurístico *PNS* aumentan la eficiencia en 30,60% y 32,99% para los TLPpedidos 150 y 250(F3), respectivamente. De esta manera, se evidencia la calidad de las soluciones, que produce el nivel metaheurístico *PNS*, en el problema en estudio.

**Figura 6-5:** Tiempo promedio total del efecto ECL (F1)\*EMMateriales (F3).



Del gráfico (Figura 6-5), se detecta que las interacciones del nivel metaheurístico *PNS* (ECL) (F1) con los niveles  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales heterogéneos generan una reducción del tiempo promedio total en 26,93 y 39,32 min/*CSLPr* respecto a la regla PEPR (F1). Adicionalmente, estas interacciones permiten aumentar la eficiencia en 43,37 y 68,26%/CSLPr. En el escenario, de modelar un EMMateriales ( $K=1$ ), sus interacciones con los niveles metaheurístico *PNS* y regla de prioridad *PEPR* (F1), producen una diferencia de un minuto por *CSLPr* en el tiempo promedio total de la operación. De este último hallazgo, se puede inferir, que es indiferente seleccionar cualquiera de los niveles del factor estrategia de conformación de lotes (ECL)(F1) para obtener solución de adecuada calidad para el problema en estudio.

**Figura 6-6:** Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción ECL (F1)\*PInventario (F6).



De la interacción (Figura 6-6), se detecta que las interacciones del nivel metaheurístico *PNS* (F1) con los niveles de PInventario 5 y 15 productos/*SKU* (F6) generan los menores tiempos promedios totales para la preparación de pedidos con valores de 48,59 y 44,25 min/ *CSLPr*. Inclusive, las interacciones del nivel metaheurístico *PNS* descritas permiten disminuir el tiempo promedio total de la operación respecto a la regla de prioridad PEPR en 16 y 16,59 min/*CSLPr*. Esta reducción de tiempo permite incrementar la eficiencia en 24,75% y 63,95%/ *CSLPr*.

Finalmente, con el modelamiento del nivel metaheurístico *PNS*, se aporta al estado del arte del tema desde dos perspectivas. En la primera, se modela un metaheurístico

novedoso en la literatura, que permitió solucionar el problema en estudio en la preparación de pedidos, considerando  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento y la disponibilidad del inventario. Inclusive, el menor tiempo promedio total obtenido fue de 18,28 min/CSLPr, y se generó con la combinación de niveles Metaheurístico  $PNS$  (nivel 2, Factor 1)\*Grupo  $K=5$  EMMateriales (nivel1, Factor5). En la segunda, se comprueba estadísticamente que el metaheurístico  $PNS$ , permite reducir el tiempo promedio total e incrementar la eficiencia de la preparación de pedidos, respecto a la implementación de una regla de prioridad PEPR comúnmente modelada en la literatura e implementada en la industria.

PE2 ¿Establecer estadísticamente, cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el acomodo, genera un menor tiempo total de preparación de pedidos?

Para identificar, cuál de las variantes del metaheurístico tabú produce conjuntos de rutas  $CRQw$  integradas al  $CSLPr$  de menor tiempo promedio total, se estudia la  $ANOVA$  modelada en la PE1 (Tabla 6-7) y se elaboran gráficos de medias para las interacciones. En caso, que se requiera información de los otros términos estadísticos de la  $ANOVA$ , incluyendo el error de la parcela principal y modelo, se debe revisar la PE1.

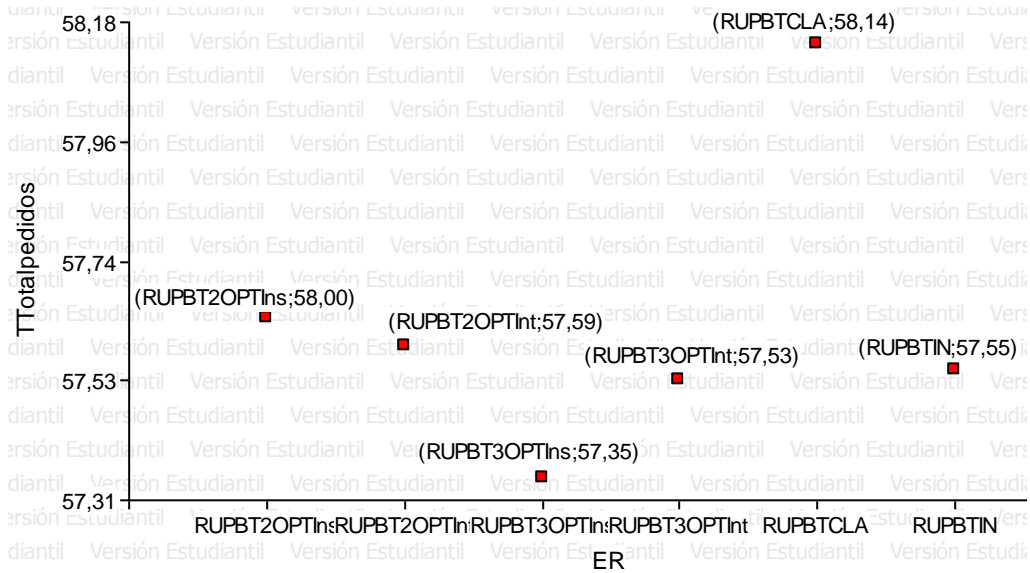
**Tabla 6-7:**  $ANOVA$  del diseño de parcelas divididas, con efecto principal e interacciones dobles del factor estrategia de ruteo (ER)(F2).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
ER	30,5329441	5	6,10658882	5,75967693	<0,0001
EMMateriales*ER	10,9960882	10	1,09960882	1,03714066	0,41210092
ECL*ER	1,39024869	5	0,27804974	0,26225389	0,93336703
Depot*ER	1,14720001	5	0,22944	0,21640564	0,95536596
TLPpedidos*ER	13,7889858	5	2,75779715	2,60112824	0,02548748
Pinventario*ER	2,55978271	5	0,51195654	0,48287258	0,78896778
Error	302,165874	285	1,06023114		
Total	639860,04	575			

De la  $ANOVA$  (Tabla 6-7), se identifica que el efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER)(F2) y sus interacciones no son significativos sobre el tiempo promedio total de preparación de pedidos, porque sus p-valores son mayores a 0.05. Por este motivo, la información de la  $ANOVA$ , no se empleará para realizar el análisis en esta PE2. Aunque

el efecto principal no afecta significativamente, a continuación, se desarrolla un gráfico de los tiempos totales de los  $CRQw \in CSLPr$  para entender su comportamiento (Figura 6-7).

**Figura 6-7:** Tiempo promedio total generado por el efecto principal ER (F2)



Del análisis gráfico de medias del factor ER (F2)(Figura 6-7), se identifica que los niveles RUPBT3OPTIns y RUPBT3OPTInt, producen el conjunto rutas  $CRQw \in CSLPr$  de menor tiempo promedio total en la preparación de pedidos, con valores de 57,35 min y 57,53 min. Del análisis, también, se detecta, que la reducción de tiempo que generan el RUPBT3OPTIns y RUPBT3OPTInt respecto al metaheurístico de búsqueda tabú clásica (RUPBTCLA), fue de aproximadamente un minuto por  $CSLPr$ , lo cual, produce una mejora en la eficiencia del 1,38%, que justifica el modelamiento de las variantes. Aunque, la diferencia calculada es baja, su importancia aumenta, a medida, que se incrementa la cantidad de conjuntos de lotes de pedidos  $CSLPr$ , que se preparan por día o turno. En el caso del CEDI unidad experimental, en un turno de trabajo, se recoge en promedio 10 listas de preparación, lo que puede producir una disminución del tiempo promedio total de 10 min/turno respecto al modelamiento del RUPBTCLA. De esta manera, se puede inferir, que el nivel RUPBTDI 3-Opt Int, contribuye al aumento de la eficiencia y reducción del tiempo de las operaciones del CEDI, en estudio.

Para facilitar la detección de la mejor variante del metaheurístico tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, a continuación, se presentan los escenarios o combinaciones de niveles, que generan las soluciones del menor tiempo promedio total (Tabla 6-8).

**Tabla 6-8:** Mejores soluciones para el factor estrategia de ruteo (ER)

Combinación de niveles o escenario	Tiempo total de acomodado(solución)
RUPBTDI 3-Opt Ins * <i>depot</i> centro	= 57,34 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Int * <i>depot</i> izquierda	= 57,36 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Int *Metaheurístico <i>PNS</i>	= 46,40 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Ins *Metaheurístico <i>PNS</i>	= 46,31 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Ins *TLPpedidos 250	= 72,21 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Ins *TLPpedidos 150	= 42,49 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Ins *Grupo EMmaterialesK=3 EMmateriales	= 48,37 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Ins *Grupo EMmaterialesK=5 EMmateriales	=37,74 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Int *Grupo EMmaterialesK=3 EMmateriales	= 48,43 min/ <i>CSLPr</i>
RUPBTDI 3-Opt Int *Grupo EMmaterialesK=5 EMmateriales	= 37,76 min/ <i>CSLPr</i>

De las soluciones representadas (Tabla 6-8), se detecta que las combinaciones de los niveles RUPBTDI 3-Opt Ins y RUPBTDI 3-Opt Int con el nivel grupo de K=5 EMmateriales producen las mejores soluciones para el problema, con tiempos promedios de 37,74 y 37,76 min/*CSLPr*. Situación similar, se presenta con las interacciones con el nivel metaheurístico *PNS* en el factor ECL (F1), donde se obtienen tiempos promedios totales de 46,31 y 46,40 min/*CSLPr*. Debe resaltarse, que la mejor combinación de niveles obtenida fue implementada en cuatro corridas de verificación, en las cuales, se modificaron únicamente las *OC*. Como resultado de estas corridas, se obtuvo que las combinaciones de niveles seleccionados generaron las mejoras soluciones.

A partir de estos hallazgos, se puede inferir que las diferencias en el tiempo promedio total de las interacciones de los niveles RUPBTDI 3-Opt Ins y RUPBTDI 3-Opt Int son muy bajas, casi cercanas a cero. De esta evidencia, y teniendo en consideración que el nivel RUPBT3OPTIns generó el menor tiempo promedio total en el gráfico de medias (Figura 6-7), este se selecciona como la mejor variante metaheurístico tabú.

PE3 ¿Evaluar, si el mejor metaheurístico de búsqueda tabú para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, produce un menor tiempo total de preparación de pedidos, que la implementación de un metaheurístico de algoritmo genéticos?

Para dar respuesta a la PE3, se desarrolla un análisis estadístico de la tabla ANOVA del diseño de parcelas divididas. Este diseño incluye los niveles algoritmo genéticos (*genetic algorithm*) (RUPGA) (nivel 1) y el mejor metaheurístico RUPBT (Ruteo Preparación de Pedidos de Búsqueda Tabú) (nivel 2), denominado RUPBTDI 3-Opt Ins (nivel 2) en la



estrategia de ruteo (F2). La justificación de la selección del nivel RUPBTDI 3-Opt Ins (nivel 2) (F2), se presentó con detalle en la PE2.

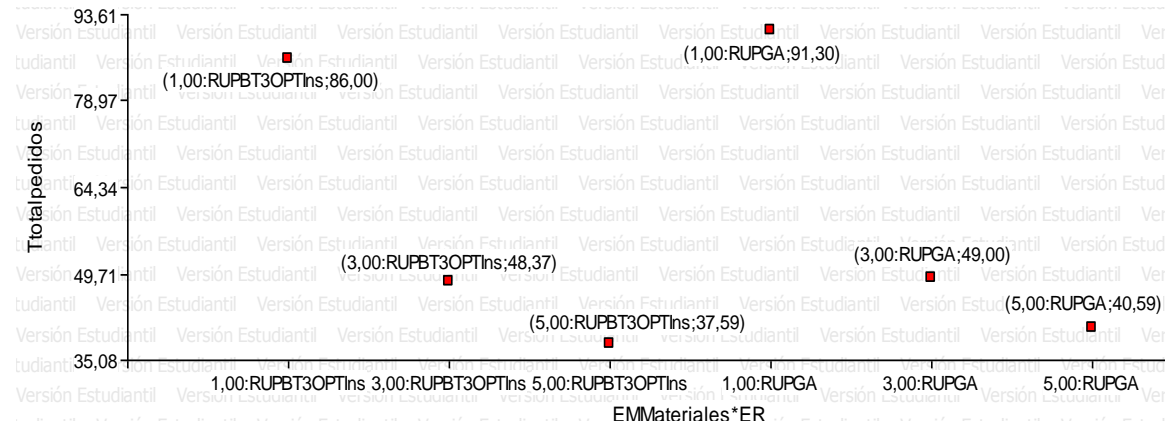
A continuación, se presenta la ANOVA del diseño de parcelas divididas para la PE3, que se obtuvo de la versión académica del software InfoStat® (Tabla 6-9).

**Tabla 6-9:** ANOVA diseño parcelas divididas PE3

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
ER	385,441675	1	385,441675	369,082062	<0,0001
EMMateriales*ER	153,610108	2	76,8050542	73,5451551	<0,0001
ECL*ER	0,59410858	1	0,59410858	0,56889235	0,45260499
Depot*ER	5,3496E-05	1	5,3496E-05	5,1225E-05	0,99430478
TLPedidos*ER	26,4307357	1	26,4307357	25,3089146	<0,0001
Pinventario*ER	35,1170421	1	35,1170421	33,6265411	<0,0001
Error	97,1222378	93	1,04432514		
Total	221292,364	191			

De la tabla ANOVA (Tabla 6-9), se identifica, que el efecto principal del factor estrategia de ruteo (ER) y sus interacciones con los factores EMMateriales (F5) y Pinventario (F6) afectan significativamente el tiempo total de preparación de pedidos (variable respuesta), porque sus p-valores, son menores a 0.05. Para establecer la magnitud de las diferencia en el tiempo promedio total, que generan los niveles RUPBTDI 3-Opt Ins y RUPGA en el factor estrategia de ruteo (ER)(F2) se elaboran gráficos de medias.

**Figura 6-8:** Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción entre ER (F1) con el grupo EMMateriales (F5)



Del gráfico de medias de la interacción (Figura 6-8), se identifica que las combinaciones del nivel RUPBT3OPTIns con los grupos de K=3 y K=5 EMmateriales, producen las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 48,39 y 37,59 *min/CRQw*, respectivamente. A partir análisis, también, se infiera, que las interacciones del nivel

RUPBT3optIns (F2) con los niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales (F5) respecto al modelamiento nivel RUPGA, no sólo generan un ahorro de tiempo de 1 y 3 min/ $CRQw$ , sino que también permiten incrementar los niveles de eficiencia en 1,28 y 7,39%/ $CRQw$ , respectivamente. De esta forma, se evidencia, que el mejor RUPBT produce soluciones de más alta calidad que el RUPGA, para solucionar el componente de ruteo, en el problema en estudio.

Respecto a la interacción entre los niveles de los factores ER(F2) y la Pinventario(F6), se detecta que el nivel RUPBT3OPTIns genera soluciones de mejor calidad, que el RUPGA, ya que permite disminuir el tiempo promedio total, en 4,09 y 3,42 min/ $CRQw$  en los niveles Pinventario 5 y 15 productos/ $SKU$ . Otro aspecto que debe considerarse del análisis de esta interacción, es que tiene un cuadrado medio(CM) de 35,12 que es menor al generada por los niveles de los factores grupos de EMMateriales heterogéneos(F5) con la ECL(F1) que tiene un CM de 12778,52. Por este motivo, la interacción en estudio tiene un efecto muy bajo sobre el tiempo promedio total de la preparación de pedidos, de allí, su baja importancia para apoyar decisiones en la configuración del problema.

Del análisis de la PE3, se concluye que la mejor variante del metaheurístico de búsqueda tabú denominado *RUPBT3OPTIns* (nivel 2), produce conjuntos de rutas  $CRQw \in CSLPr$  de menor tiempo promedio total, que el modelamiento del nivel algoritmo genético(RUPGA)(nivel 1) en el factor ER(F2). Por este motivo, al seleccionar el RUPBT3OPTIns, se puede contribuir al aumento de la eficiencia, reducir los tiempos promedios totales de la operación, y disminuir potencialmente los costos, ya que se invierte menor cantidad de recursos, para ejecutar la recogida de los pedidos.

PE4 ¿Evaluar, si el factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos y sus interacciones, tienen un efecto significativo sobre el tiempo total y la eficiencia, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos?

La respuesta de esta PE4, se basa el análisis estadístico de la misma ANOVA del diseño de parcelas divididas, configurada en la PE1. Para simplificar el análisis, únicamente, se representan el efecto principal e interacciones del factor grupo  $K$  EMMateriales, los términos del error de la parcela y el modelo (Tabla 6-10).

**Tabla 6-10:** ANOVA parcelas divididas factor 5 EMMateriales en la PE4, InfoStat®

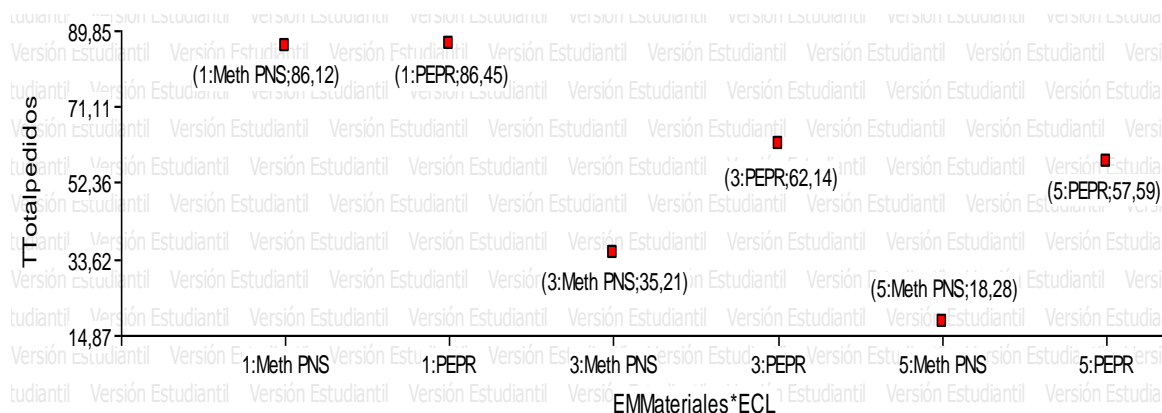
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	639557,875	290	2205,37198	2080,08604	<0,0001
EMMateriales	247859,447	2	123929,723	530,815465	0,00014958
EMMateriales>Replica	700,411338	3	233,470446	220,207121	<0,0001
EMMateriales*ECL	38121,847	2	19060,9235	17978,0831	<0,0001
EMMateriales*Depot	14366,2106	2	7183,10528	6775,03709	<0,0001
EMMateriales*TLPpedidos	18372,8272	2	9186,41359	8664,53859	<0,0001
EMMateriales*Pinventario	8134,75856	2	4067,37928	3836,31374	<0,0001
EMMateriales*ER	10,9960882	10	1,09960882	1,03714066	0,41210092
Error	302,165874	285	1,06023114		
Total	639860,04	575			

De la tabla ANOVA (Tabla 6-10), se detecta que el efecto principal del factor grupo EMMateriales heterogéneos (F5) y sus interacciones con los factores ECL (F1), Depot (F2), TLPpedidos (F3) y Pinventarios (F6) afectan significativamente el tiempo total promedio de preparación de pedidos. Esto se plantea porque sus p-valores son menores o iguales a 0.05, que es el criterio de rechazo. Con relación al análisis estadístico del valor  $R^2_{ajustado}$ , el error de la parcela principal y error del modelo, se infiere que estos son apropiados, ya que cumplen con los criterios evaluados. En caso de requerirse, información de la validación de supuestos revisar la PE1.

Para detectar las combinaciones de los niveles, que generan las soluciones de menor tiempo promedio total, se elaboran gráficos de medias para los efectos significativos de las interacciones del factor 5, que tengan los valores de cuadrados medios (CM) más altos en la ANOVA. Las interacciones dobles del factor 5 seleccionadas corresponden a ECL (F1), TLPpedidos (F3) y ubicación del *depot* (Figura 6-9), (Figura 6-10). Debe resaltarse, que en el análisis, no se estudia el efecto principal del factor grupo EMMateriales (F5), debido a que este tiene interacciones dobles significativas, que hacen perder validez a este efecto.

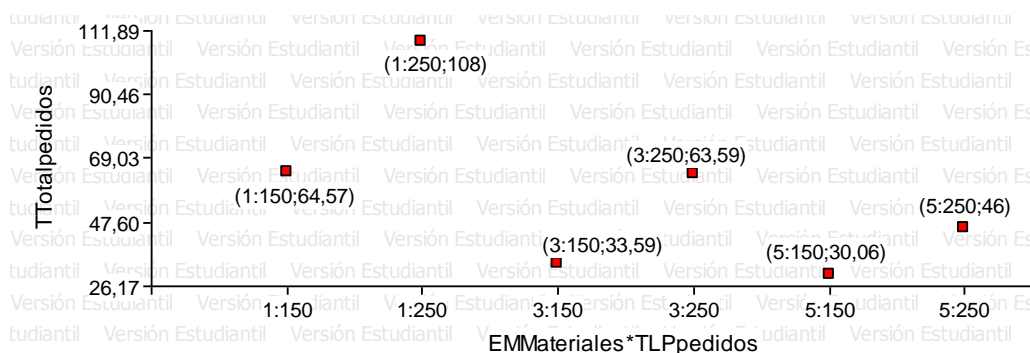
Del gráfico de medias (Figura 6-9), se identifica, que las combinaciones de niveles (K=5 EMMateriales (F5) y Metaheurístico PNS (F1)) y (K=3 EMMateriales y Metaheurístico PNS (F1)) producen las mejores soluciones para el problema, con tiempos promedios totales de 18,21 y 35,21 min/CSLPr, respectivamente. Respecto a las interacciones de los niveles de grupos de K=3 y K=5 EMMateriales con el nivel regla PEPR en la ECL(F1), se detecta, que el tiempo promedio total, se aumenta en 26 y 39,31 min/CSLPr con relación a la implementación del nivel metaheurístico PNS.

**Figura 6-9:** Tiempo promedio de la interacción entre K EMMateriales (F5) y la ECL (F1)



A partir de este hallazgo, y teniendo en cuenta, que la interacción entre los factores grupo *K* EMMateriales heterogéneos (F5) y ECL (F1), tiene el mayor efecto sobre el tiempo promedio de preparación de pedidos, se sugiere seleccionar el nivel metaheurístico *PNS* como ECL (F1). Esto se plantea porque permite incrementar la eficiencia de la operación en 43,37% y 68,43%/CSLPr respecto al nivel regla de prioridad PEPR.

**Figura 6-10:** Tiempo promedio total generado por la interacción entre el grupo de *K* EMMateriales heterogéneos (F5) y (TLPpedidos) (F3)



Del gráfico de medias (Figura 6-10), se identifica, que las combinaciones del nivel TLPpedidos de 150 productos (nivel 1) (F3) con los niveles grupos de *K*=3 y 5 EMMateriales (*F5*) permiten obtener las mejores soluciones para el problema de conformación de lotes con ruteo (CSLPr), con tiempos promedios de 33,59 y 30,06 min/CSLPr, respectivamente. Igual situación, se detecta, con el TLPpedidos de 250 productos, donde las combinaciones con estos mismos niveles del factor grupo *K* EMMateriales, producen los menores tiempos promedios totales para operación con valores de 63,59 y 46 min/CSLPr. Debido a que las diferencias de los tiempos entre las combinaciones de niveles de las TLPpedidos(150,250) y grupos de *K* EMMateriales (*K*=3

y  $K=5$ ), se encuentran en 4 y 17 *min/CSLPr* aproximadamente; se recomienda complementar el análisis estadístico con un estudio de costos, eficiencia y nivel de servicio al cliente para determinar la combinación de niveles mas conveniente.

De otra parte, del análisis de medias, se detecta que la combinación  $K=5$  EMMateriales (F5) y *depot* Izquierda permite obtener la mejor soluciones para el problema con un tiempo promedio total de 32 *min/CSLPr*. A partir de este hallazgo, se evidencia que para el CEDI unidad experimental, es apropiado configurar el *depot* la izquierda (nivel 1), buscando de esta manera generar el menor tiempo para la operación.

La conclusión, que se plantea para esta interacción, tiene su alcance en el CEDI unidad experimental en estudio, o algún otro de características similares, ya que el impacto del efecto del *depot*, en el tiempo promedio total de la preparación de pedidos. Esto se plantea porque el problema en de conformación de lotes con ruteo suele depender del tipo de productos  $\in$  OC a recoger, la cantidad y asignación de las posiciones en el sistema de almacenamiento y los EMMateriales disponibles. Por este motivo, en cada CEDI unidad experimental que se modele, se sugiere estudiar estadísticamente, cual, es la mejor ubicación para el *depot*, buscando que este contribuya a la obtención de soluciones de buena calidad respecto al tiempo promedio total y la eficiencia de la operación.

**PE5 ¿Analizar, si el factor política de inventario y sus interacciones, presentan un efecto significativo sobre el tiempo total e impacta eficiencia, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.**

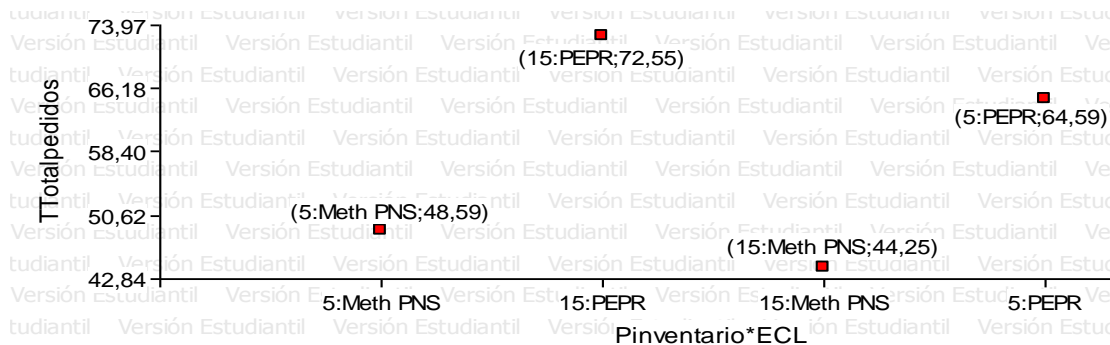
Para determinar, si el factor política de inventario (Pinventario) afecta significativamente, el tiempo promedio total de la preparación de pedidos, se analiza ANOVA para diseño de parcelas divididas presentada en la PE1 (Tabla 6-11).

**Tabla 6-11:** ANOVA diseño parcelas divididas (Pinventarios) (F6) en la PE5, InfoStat®

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Pinventario	342,332705	1	342,332705	322,884976	<0,0001
EMMateriales*Pinventario	8134,75856	2	4067,37928	3836,31374	<0,0001
ECL*Pinventario	5357,35978	1	5357,35978	5053,01117	<0,0001
Depot*Pinventario	989,272434	1	989,272434	933,072422	<0,0001
TLPpedidos*Pinventario	1138,27071	1	1138,27071	1073,60619	<0,0001
Pinventario*ER	2,55978271	5	0,51195654	0,48287258	0,78896778
Error	302,165874	285	1,06023114		
Total	639860,04	575			

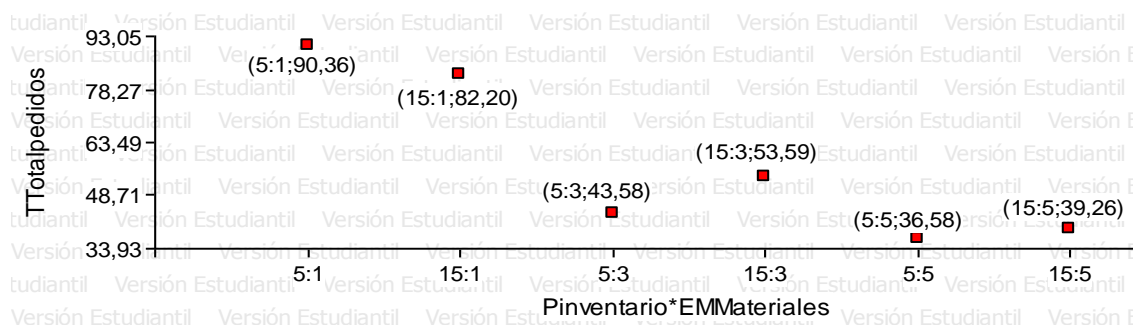
De la ANOVA (Tabla 6-11), se detecta que el efecto principal de Pinventario (F6) y sus interacciones con los factores ECL(F1),TLPpedidos(F3), ubicación del Depot(F4) y grupos EMMateriales heterogéneos(F5) son significativos sobre el tiempo promedio total de la operación. Esto se plantea porque sus p-valores son menores a 0.05 (criterio de rechazo). En el presente análisis se estudiarán únicamente las interacciones dobles con los factores grupo EMMateriales heterogéneos (F5) y ECL (F1), ya que sus valores F son de 7689,29 y 5013,40 respectivamente, siendo los más altos en la ANOVA.

**Figura 6-11:** Tiempo promedio total generado por el efecto de la interacción entre la Pinventario (F6) con la ECL (F1)



Del gráfico de medias (Figura 6-11), se detecta que las combinaciones del nivel metaheurístico *PNS* en la ECL (F1) con los niveles 5 y 15 productos/SKU en la Pinventario (F6) reducen el tiempo promedio total en 16 y 28,30 *min/CSLPr* respecto a la implementación de la regla PEPR. Por lo tanto, las mejoras que producen estas combinaciones permiten el incremento de la eficiencia en 24,77 y 39 %/*CSLPr*. De esta manera, se identifica que la combinaciones del nivel metaheurístico *PNS* (F1) con los niveles Pinventario (F6), contribuyen a la eficiencia, porque requiere menor tiempo para ejecutar la operación.

**Figura 6-12:** Tiempo promedio efecto entre Pinventario (F6) con el EMMateriales (F5)



A partir del gráfico de medias (Figura 6-12), se identifica que las combinaciones de niveles: (Pinventario: 5 productos/SKU,  $K=5$  EMMateriales), (Pinventario: 15 productos/SKU,  $K=5$  EMMateriales) y (Pinventario: 5 productos/SKU,  $K=3$  EMMateriales) generan las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 36,58; 39,26 y 43,58 min/CSLPr, respectivamente. Incluso de los resultados obtenidos, se evidencia, que la diferencia de tiempo promedio total, entre los niveles Pinventario de 5 productos/SKU con los niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales es de 7 min/CSLPr con un incremento de la eficiencia del 16.35%. A partir de este hallazgo, se concluye que con una Pinventario de 5 productos/SKU, se debe elegir un grupo de  $K=3$  EMMateriales.

En el contexto del CEDI unidad experimental en estudio, una reducción de 7 min/CSLPr es baja e irrelevante, de allí, la decisión de seleccionar el nivel  $K=3$  EMMateriales heterogéneos. En el caso de modelar otros CEDI, se debe realizar un análisis detallado de la importancia de este tipo de reducciones de tiempo, porque en otras condiciones operacionales, 7 min/CSLPr puede impactar en el nivel de servicio y eficiencia de la preparación de pedidos. Por los motivos expuestos, en el CEDI unidad de experimentación, se sugiere implementar una Pinventario de 5 productos/SKU, ya que permite disminuir el tiempo, garantiza la disponibilidad de productos a preparar y reduce potencialmente los costos de operación. Este último planteamiento, se justifica ya que a menor cantidad unidades/SKU en inventario ( $5 < 15$  productos/SKU), se espera una disminución del valor económico del mantenimiento y gestión del inventario.

Debido a la configuración del CEDI unidad de experimentación en estudio, la conclusión obtenida del análisis estadístico, se considera válida, ya que se estableció una política de zonificación ABC, donde los productos A son los de mayor rotación, y C los de menor. Por este motivo, los productos de una misma referencia, se encuentran concentrados en una misma zona del CEDI. Por este motivo, se espera que el factor Pinventario, no tenga un efecto tan importante, en el tiempo promedio total del problema en estudio, como los factores de ECL (F1) y grupos de  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5). Esta afirmación, se soporta en el análisis de la ANOVA donde esta interacción obtuvo un CM bajo respecto a otras interacciones del modelo.

## 6.7 Principales hallazgos y conclusiones de las PE

Una vez, se responden las cinco PE planteadas, a continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos:

De la PE1 y PE4, se detectó que la interacción entre los factores Estrategias de conformación de lotes (ECL) (F1) y grupos de  $K$  EM materiales heterogéneos (F2), tienen el efecto más importante sobre el tiempo promedio total de la preparación de pedidos. Esto se plantea porque su cuadrado medio (CM) fue el más alto de la ANOVA, con un valor de 19060,92. La solución de menor tiempo promedio total obtenida para la interacción de estos factores fue de 18,28 min/CSLPr y se formó con la combinación de niveles metaheurístico PNS (nivel 2, Factor 1)\*Grupo  $K=5$  EM Materiales (nivel1, Factor5). Inclusive, esta mejor solución permite aumentar la eficiencia en 68,26%/CSLPr con relación a la implementación del nivel regla PEPR (F1).

De los resultados obtenidos en la PE2, se identificó que los niveles RUPBTDI 3-Opt Ins y RUPBT3OPTInt, generaron los conjuntos de rutas  $CRQw \in CSLPr$  de menor tiempo promedio total en la preparación de pedidos, con valores de 57,35 y 57,53 min/CSLPr. Adicionalmente, debe resaltarse, que la reducción de tiempo que generan el RUPBTDI 3-Opt Ins y RUPBTDI 3-Opt Int respecto al metaheurístico de búsqueda tabú clásica (RUPBTCLA) fue de aproximadamente un minuto por CSLPr, lo cual, produce una mejora en la eficiencia del 1,35% que justifica el modelamiento de las variantes. De otra parte, en el CEDI unidad experimental, en un turno de trabajo, se recoge en promedio 10 listas de preparación, lo que puede producir una disminución, en el tiempo promedio total de 10 min/turno con relación al modelamiento del RUPBTCLA. De esta manera, se puede inferir, que el nivel RUPBTDI 3-Opt Ins, contribuye a la eficiencia, la reducción de tiempos, y costos potenciales del CEDI.

A partir del análisis realizado en la PE2, se evidenció que las combinaciones de los niveles RUBT3OPTIns y RUPBT3OPTInt con el nivel grupo de  $K=5$  EM materiales permitieron obtener las mejores soluciones para el problema, con tiempos promedios de 37,74 y 37,76 min/CSLPr, respectivamente. Situación similar, se presentó con las interacciones de las dos estrategias de ruteo descritas con el nivel metaheurístico PNS en el factor ECL (F1), donde se obtienen tiempos promedios totales de 46,31 y 46,40



$\text{min}/\text{CSLPr}$ . De esta manera, se detectó que el RUPBTDI 3-Opt Ins, es la mejor variante del metaheurístico tabú para resolver el componente de ruteo  $q' \in \text{CSLPr}$ .

Del análisis realizado en la PE3, se identificó que el nivel RUPBTDI 3-Opt Ins (nivel 2), produjo un ahorro promedio de 2,7 minutos por  $\text{CRQw} \in \text{CSLPr}$  y un aumento en la eficiencia de 4,5% con relación a la implementación del nivel algoritmo genético (nivel 2). Inclusive, en el CEDI unidad experimental, en un turno de trabajo, se recogieron en promedio 10 listas de preparación, lo que generó una disminución en el tiempo promedio total de la operación de 27 min/turno. A partir de los hallazgos, se infirió que el nivel RUPBT3OPTint, contribuye a la eficiencia, la reducción de tiempos, y costos potenciales del CEDI, ya que se emplean mejor los recursos de la operación.

Del análisis de la interacción entre la ER y los EMMateriales (Figura 6-8), se identificó que las combinaciones del nivel RUPBT3OPTIns con los grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales, producen las soluciones de menor tiempo promedio total con valores de 48,39 y 37,59  $\text{min}/\text{CRQw}$ , respectivamente. A partir del análisis, también, se infiere, que las interacciones del nivel RUPBT3optIns (F2) con los niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales (F5) respecto al modelamiento nivel RUPGA, no sólo generan un ahorro de tiempo de 1 y 3  $\text{min}/\text{CRQw}$ , sino que también permiten incrementar los niveles de eficiencia en 1,28 y 7,39%/CRQw, respectivamente. De esta manera, se valida, que el mejor RUPBT denominado RUPBT3OPTIns, produce soluciones de menor tiempo promedio total, que el RUPGA, lo cual, impacta directamente en la eficiencia de la operación.

Respecto a la interacción entre los niveles de los factores ER(F2) y la Pinventario(F6) en la PE3, se detecta que el nivel RUPBT3OPTIns genera soluciones mejor calidad, que el RUPGA, ya que permite reducir el tiempo promedio total, en 4,09 y 3,42  $\text{min}/\text{CRQw}$  en los niveles Pinventario 5 y 15 productos/SKU. Con estos resultados, se valida el mejor desempeño RUPBT3OPTIns para resolver el componente de ruteo en el problema en estudio.

De la PE4, se identificó que las combinaciones de niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales (F5) con el nivel metaheurístico PNS (F1) respecto al modelamiento del nivel PERP (F1) generó una reducción en el tiempo promedio total de 26 y 39,31  $\text{min}/\text{CSLPr}$ . Este ahorro conllevó a un aumento de la eficiencia en 43,37 y 68,43%/CSLPr, respectivamente.

De los hallazgos en la PE5, se obtuvo que las combinaciones de niveles: (Pinventario 5 productos/SKU, K= 5 EMMateriales), (Pinventario 15 productos/SKU, K= 5 EMMateriales) y (Pinventario 5 productos/SKU, K= 3 EMMateriales) produjeron las mejores soluciones con tiempos promedios totales de 36,58; 39,26 y 43,58 *min/CSLPr*. A partir de los resultados, también se identificó, que la diferencia de tiempo promedio total, entre el nivel Pinventario de 5 productos/SKU respecto a los niveles grupos de K=3 y K=5 EMMateriales fue 7 *min/CSLPr*. Esta reducción generó una mejora en la eficiencia del 19,13%/CSLPr. Por tal motivo, en caso de elegirse una Pinventario de 5 productos/SKU, se debe seleccionar un nivel de K=3 EMMateriales, ya que en el CEDI unidad experimental, la mejora que se obtuvo por CSLPr, no es relevante.

De los resultados obtenidos de las cinco PE, se detectó que los siguientes niveles de los factores producen las soluciones de menor tiempo promedio total, para el problema en estudio, en la preparación de pedidos (Tabla 6-12). Debido a las diferencias en el tiempo promedio total, que generan las soluciones de los niveles 150 y 250 productos en el TLPpedidos (F3), las combinaciones de tratamientos, se presentan individualmente, para cada una de estas.

**Tabla 6-12:** Mejores Combinaciones de niveles de los factores obtenidas del análisis estadístico en PE

TLPpedidos 150	
Estrategia conformación de lotes(ECL)(F1)	Metaheurístico PNS(nivel 1)
Estrategia de ruteo(ER)(F2)	RUPBT3OPTIns
Depot(F4)	Izquierda
Grupo de EMMateriales heterogéneos(F5)	K=5 ó K=3**
Política de inventario(F6)	5
TLPpedidos 250	
Estrategia conformación de lotes(ECL)(F1)	Metaheurístico NS(nivel 1)
Estrategia de ruteo(ER)(F2)	RUPBT3OPTIns
Depot(F4)	Centro
Grupo de EMMateriales heterogéneos(F5)	K=5
Política de inventario(F6)	5

Nota: \*\* Diferencia de las soluciones de las combinaciones de niveles del factor grupo K equipos (F5) con nivel metaheurístico PNS (F1) de 4 *min/CSLPr* aproximadamente. Esta interacción fue detectada con mayor peso en el problema en estudio, ya que su CM en la ANOVA fue de 19060,92. Adicionalmente, las combinaciones de niveles seleccionados fueron ejecutadas cinco corridas de prueba, en las cuales generaron las soluciones del

menor tiempo total de preparación de pedidos. De esta manera, se demostró la robustez de los niveles de los factores detectados de la validación experimental.

Finalmente, de los hallazgos de los análisis estadísticos y respuestas de las cinco PE, se puede concluir, que regla y metaheurísticos integrados al *WMS*, permiten solucionar de una manera integrada y simultánea, el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos. Un aporte del problema planteado y solucionado fue el modelamiento de  $n$  productos  $i$ ,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$ ,  $K$  EM Materiales heterogéneos y el inventario. Por este motivo, se valida el funcionamiento de los modelos elaborados, y se evidencia cuantitativamente, el aporte al estado del arte, que se formula en el objetivo específico dos de la presente tesis doctoral.

# 7. Conclusiones y líneas futuras de investigación

## 7.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones de la tesis doctoral.

### 7.1.1 Conclusiones generales

- De los resultados de la metodología *SLR*, se identificó, que los artículos que abordaban el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos modelaban únicamente un equipo de manejo de materiales (EMMateriales) de capacidad fija o  $K$  homogéneos (igual capacidad, velocidad y manejo de productos en altura). A partir del hallazgo de este vacío en la tesis doctoral, se modeló un problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos, considerando: i)  $K$  EMMateriales heterogéneos, ii)  $n$  productos  $i \in OC$  (órdenes de los clientes), iii) la ubicación de las posiciones  $j$  a visitar, iv) tiempos de manipulación y preparación variables y v) la disponibilidad del inventario. De esta manera, se contribuye al conocimiento, ya que se supera el vacío detectado en la literatura y se aporta al aumento de la capacidad del modelamiento de esta operación del CEDI.
- Los problemas de conformación de lotes con ruteo modelados, apoyan decisiones táctico-operativas en el acomodo y la preparación de pedidos. Desde la perspectiva táctica, permite detectar las combinaciones de niveles de los factores, que tiene mayor efecto sobre las variables de respuesta basándose en los resultados de la tabla *ANOVA* y análisis gráficos generados por los diseños de experimentos (*DOE*) seleccionados. De esta manera, se busca identificar de forma eficiente las combinaciones de factores que generan los menores tiempos promedios totales e incrementan la eficiencia de las operaciones. Con relación a las decisiones operativas, las soluciones de los problemas conforman conjuntos de lotes con ruteo, que permiten ejecutar las operaciones en el menor tiempo posible y utilizar sus recursos eficientemente. El enfoque planteado de

soportar decisiones tácticas y operativas en las operaciones en estudio no había sido detectado en la literatura científica, de allí su aporte al conocimiento.

- El modelamiento de un *DOE* de parcelas divididas, en la validación experimental de los problemas de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos y el acomodo, permitió:
  - Identificar las combinaciones de los niveles de factores, que producen las soluciones de menor tiempo promedio total, de una manera eficiente y orientada a cumplir los objetivos de las operaciones en estudio.
  - Detectar los efectos principales e interacciones significativas sobre la variable respuesta de interés y su importancia en la solución del problema, basándose en el análisis de medidas estadísticas como el cuadrado medio del error (CM) y p-valor en la tabla *ANOVA*.
  - Modelar apropiadamente la restricción a la aleatorización, que generó el factor grupo de *K* EM materiales heterogéneos en los problemas de conformación de lotes con ruteo, en las operaciones en estudio. Por este motivo, se garantizó un análisis estadístico válido para los resultados obtenidos en la experimentación que permitieron responder las PE formuladas.
  - Mostrar la capacidad de análisis y eficiencia, que ofrece el *DOE* de parcelas divididas como método de experimentación, lo cual, busca desmotivar el uso de metodologías basados en análisis de escenarios y ensayo-error, que predominan en la literatura. De esta manera, se logró un aporte metodológico al conocimiento, ya que el *DOE* de parcelas divididas no fue detectado en los resultados del *SLR*.
- Se garantiza la validez de los análisis estadísticos del *DOE* que permitieron responder las PE, ya que se desarrolló una segunda validación experimental donde se modificaron algunos parámetros de las unidades experimentales y los productos de las órdenes de los clientes (OC) y entrada (OE) modelados. En los resultados de la segunda validación experimental las combinaciones de los tratamientos de los factores que generaron las mejores soluciones fueron similares a los que se obtuvieron en la primera validación. Por los motivos expuestos, se puede indicar que los resultados y conclusiones de la presente tesis pueden ser extendibles a un CEDI que tengan un tipo de *layout*, política de almacenamiento y productos similares a los modelados.

### 7.1.2 Conclusiones enfocadas en la preparación de pedidos:

- Se ha modelado un problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos, que considera las siguientes restricciones: i) relación entre los  $n$  productos  $i \in OC$  a preparar, las  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  donde se encuentran almacenados y  $K$  EMMateriales heterogéneos, ii) la condición de disponibilidad del inventario, iii) tiempos de manipulación y recogida variables y iv) integralidad en la recogida de las  $OC$ . En el enfoque propuesto, se modelan restricciones que no habían sido abordadas de manera integrada en los problemas analizados en el estado del arte, de allí la relevancia del aporte alcanzando para esta línea del conocimiento.
- Con el problema modelado en la preparación de pedidos, se superan las siguientes limitaciones que fueron dectados en los resultados del *SLR*: i) productos idénticos a recoger, ii) posiciones de almacenamiento que no consideran el nivel de altura, iii) un solo EMMateriales o  $K$  homogéneos que únicamente ejecutaban movimientos horizontales y iv) tiempos de búsqueda, extracción y manipulación constantes. De esta manera, se incluyen componentes que no habían sido considerados en la literatura, lo cual permite aumentar la capacidad de modelamiento de este problema en el ámbito científico y empresarial.
- Como resultado de la tesis se han modelado matemática y computacionalmente, una regla y metaheurísticos integrados a un *WMS* que permiten resolver de una manera simultánea e integrada los componentes de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.
- Para solucionar el componente de conformación de lotes, se desarrolló una estrategia de exploración de vecindarios de doble búsqueda, que acelera la convergencia para obtener soluciones del menor tiempo total posible y mejorar la eficiencia computacional. La primera búsqueda, se realiza con un metaheurístico *PNS (Picking Neighborhood Search)*, que explora los vecindarios, ejecutando intercambios factibles de  $n$  productos  $i$  dentro y entre  $LP_r \in CSLPr$ , considerando las restricciones asociados a lo EMMateriales heterogéneos  $k \in K$  y la disponibilidad de inventario. En tanto, la segunda búsqueda, implementa un metaheurístico búsqueda tabú clásico o algunas de sus cinco variantes para realizar movimientos dentro cada ruta  $q^r \in CRQr$ , con el fin de generar las secuencias del menor tiempo total posible. De esta manera, se modeló una estrategia de búsqueda novedosa no detectada en la literatura, que supera las limitaciones

identificadas en los artículos de Albareda *et al.*,(2009), Henn(2010), Henn(2012), Kulak *et al.*,(2012), Henn y Schmid(2013) y Öncan(2013).

- Con las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú (RUBT) desarrollados para solucionar el componente de ruteo, se supera la limitación de los heurísticos *S-Shape*, *Largest Gap* o *combined* que predominan en la literatura. Esto se plantea porque los heurísticos detectados en la literatura generaban secuencias de recogida basándose en patrones fijos (única solución), que no exploraban sistemáticamente los vecindarios de búsqueda y sólo consideraban las ubicaciones de las posiciones de almacenamiento para diseñar las rutas. Por su parte, los metaheurísticos RUPBT modelados configuran las rutas según las características de los  $n$  productos  $i$  a recoger, los tiempos de manipulación, el nivel de altura de la posición de almacenamiento a visitar y los  $K$  EM Materiales heterogéneos disponibles.
- Adicionalmente, los metaheurísticos RUBT desarrollados, se encuentran integrados a un WMS, que guía a los operarios en la recolección de los productos pertenecientes a los lotes con ruteo conformados. De esta manera, se elimina un supuesto establecido por Henn (2012) y Henn y Schmid (2013), que indicaban que al utilizar metaheurísticos para resolver el problema de ruteo, se podían producir ineficiencias y aumentar los errores en la preparación de pedidos. Este supuesto fue planteado por los autores porque las rutas producidas por los metaheurísticos no siguen un patrón fijo de posiciones de almacenamiento como los heurísticos (*S-shape*, *Largest Gap* y *Combined*), que es de fácil recordación para los operarios. Por los motivos expuestos, el WMS permite eliminar un supuesto que limitaba el modelamiento de los metaheurísticos para solucionar el componente de ruteo.
- De la validación experimental con *DOE*, se identificó que las interacciones dobles del factor  $K$  EM Materiales heterogéneos (F5) con la estrategia de conformación de lotes (ECL) (F1) y tamaño de lista (TLPedidos)(F5) tienen la mayor influencia, en la obtención de soluciones de menor tiempo promedio total, en la preparación de pedidos. Esta conclusión, se soporta en las siguientes evidencias: a) Los cuadrados medios (CM) de las interacciones descritas fueron los más altos de la ANOVA con valores de 38121,85 y 18372,82 y b) las mejores soluciones detectadas para el problema corresponden a las combinaciones de niveles: (metaheurístico *PNS*(F1), Grupo  $K=5$  EM materiales(F5)=18,28 minutos), (TLPedidos 150(F3), Grupo  $K=5$  EM materiales(F5)=30,06 minutos), (TLPedidos 150(F3), Grupo  $K=3$

EMmateriales(F5)=33,59 minutos), (TLPpedidos 250(F3), Grupo K=5 EMmateriales (F5)=50,46 minutos),(TLPpedidos150(F3),GrupoK=5 EMmateriales(F5)=63,59 minutos).

- Del modelamiento del factor estrategia de ruteo (ER), se identificó que los niveles RUPBTDI 3-Opt Inserción y RUPBTDI 3-Opt Intercambio, generaron los conjuntos de rutas  $CQRw \in CSLPr$  de menor tiempo promedio total en la preparación de pedidos, con valores de 57,35 *min* y 57,53 *min/CQRw*. Inclusive, la diferencia calculada de estos niveles respecto al metaheurístico de búsqueda tabú clásica (RUPBTCLA), fue de aproximadamente un minuto por *CQRw*, lo cual evidenció una mejora en la operación, que justifica el modelamiento de las variantes de este metaheurístico. En el CEDI unidad experimental modelado, en un turno de trabajo, se recogen en promedio 10 listas de preparación, lo que puede producir una disminución en el tiempo promedio total de 10 minutos/turno respecto a la implementación del RUPBTCLA. De esta manera, se comprueba el aporte del modelamiento de las variantes de la búsqueda tabú denominadas RUPBTDI 3-Opt Inserción y RUPBTDI 3-Opt Intercambio para disminuir el tiempo promedio total de la preparación de pedidos.
- Del análisis comparativo de las interacciones del nivel RUPBTDI 3-Opt Inserción (F2) con los niveles grupos de  $K=3$  y  $K=5$  EMMateriales (F5) respecto al modelamiento nivel RUPGA (algoritmo genético), se generó un ahorro de tiempo de 1 y 3 *min/CRQw*. Esta reducción de tiempo conllevó a un incremento de los niveles de eficiencia de la operación de 1,28 y 7,39%/CRQw, respectivamente. De esta manera, se valida, que el mejor RUPBT denominado RUPBTDI 3-Opt Inserción, produce soluciones de menor tiempo promedio total y mayor eficiencia, que el metaheurístico RUPGA basado en un algoritmo genético.
- De los resultados del análisis estadístico se identificó, que la interacción doble entre las combinaciones de niveles Grupo K=5 EMMateriales (F5) con el nivel metaheurístico PNS en la ECL (F1), obtuvo la mejor solución para el problema de preparación de pedidos con un tiempo promedio total de 18,28 *min/CSLPr*. Inclusive, del análisis de la tabla ANOVA, se evidenció que la interacción entre estos dos factores, tenía el cuadrado medio (CM) más alto con un valor de 19060,92. A partir de estos hallazgos, se puede concluir, que las combinaciones entre los niveles del factor grupo  $K$  EMmateriales heterogéneos (F5) y estrategia de conformación de lotes (ECL) (F1), permiten generar las soluciones de menor tiempo total para el problema en estudio.
- Del análisis del factor política de inventario (Pinventario) (F6), se detectó que este tiene un efecto significativo sobre el tiempo promedio total de la preparación de pedidos. Para



este factor las combinaciones de niveles: (PInventario: 5 productos/referencia, K=5 EMmateriales), (PInventario: 15 productos/referencia=5 EMmateriales) y (PInventario: 5 productos/referencia, K= 3 EMmateriales) produjeron las mejores soluciones, con tiempos promedios totales de 36,58; 39,26 y 43,58 *min/CSLPr*, respectivamente. De esta manera, se comprobó cuantitativamente el efecto de este factor sobre el tiempo total de la preparación de pedidos, y la importancia su configuración.

### 7.1.3 Conclusiones enfocadas en el acomodo:

- Se ha modelado un problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, que considera: i)  $K$  EMmateriales heterogéneos, ii)  $n$  productos  $i$ , iii)  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y iv) tiempos de ubicación y manipulación variables según las condiciones operacionales. De esta manera, se cubre un vacío en el estado del arte, ya que únicamente, se detectaron problemas que modelaban la asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*) en el acomodo, sin considerar la conformación de lotes y la configuración de las rutas, para ubicar los productos, en el menor tiempo posible. Por lo expuesto, el problema modelado puede considerarse uno de los primeros que se desarrolla en la literatura científica para abordar este problema.
- El problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo modelado, no pretende reemplazar los modelos de asignación de posiciones de almacenamiento (*slotting*), sino complementarlos para contribuir a la disminución del tiempo total y aumento de la eficiencia de la operación. Esto se plantea, porque la asignación de posiciones de almacenamiento a los productos, se convierte en la información de entrada para conformar los lotes con ruteo. De esta manera, se busca fortalecer las capacidades de modelamiento de la operación de acomodo, que no suele tener la importancia empresarial, ni científica que presenta la preparación de pedidos.
- Para solucionar el problema de conformación de lotes con ruteo en el acomodo, se modeló una regla de prioridad y metaheurísticos sincronizados a un *WMS*. Con este enfoque, se soluciona el problema de una manera integrada y simultánea similar a la desarrollada en la preparación de pedidos. Las diferencias, se presentan en el objetivo, factores, variables y las restricciones de las operaciones, lo cual genera cambios en el modelamiento algebraico y computacional.
- Para resolver el componente de conformación de lotes (ECL) (F1), se detectó que el nivel metaheurístico *NS* (*Neighborhood Search*) generó mejores soluciones, que la

regla *FCFS* (*First Come, First Served*), ya que permitió reducir el tiempo promedio total en  $35,28 \text{ min/CSLA}_L$  aproximadamente. De esta manera, se evidenció, la disminución en el tiempo promedio total de la operación, lo cual demuestra cuantitativamente el aporte que produce el metaheurístico *NS* para resolver el componente de conformación de lotes.

- Del análisis estadístico de seis variantes del metaheurístico de búsqueda tabú (niveles) para solucionar el componente de ruteo (F2), se identificó que los niveles RABTIN y RABTDI 2-Opt Intercambio generaron los conjuntos de rutas de menor tiempo total en el acomodo, con valores de  $54,50$  y  $54,59 \text{ min/CSLA}_L$ , respectivamente. Inclusive, al comparar estas estrategias de ruteo respecto al RABTCLA (Ruteo Acomodo Búsqueda Tabú Clásica), se detectó una reducción en el tiempo promedio total del acomodo en  $2,07$  y  $1,98 \text{ min/CSLA}_L$ . Con este hallazgo, se demostró cuantitativamente la reducción del tiempo total de acomodo, que producen los metaheurísticos de búsqueda tabú híbridos con estrategias de diversificación e intensificación respecto a su versión clásica (RABTCLA) para solucionar el componente de ruteo en el acomodo.
- Del análisis estadístico del factor grupo de  $K$  EMMateriales heterogéneos (F5) y sus interacciones con los factores estrategia de conformación de lotes (ECL) (F1) y TLAcomodo (F3), se detectó que estas tenían el mayor efecto significativo sobre el tiempo promedio total de acomodo. Por tal motivo, estas combinaciones son las más importantes para apoyar decisiones y resolver el problema estudio. Las conclusiones obtenidas, se soportaron en: i) los cuadrados medios (CM) de estas interacciones, fueron las más altas del modelo ANOVA con valores de  $22965,39$  y  $1436,62$  y ii) los tiempos promedios totales de sus combinaciones de tratamientos, fueron las mejores soluciones para este problema del acomodo. De esta manera, se estableció cuantitativamente que el factor  $K$  EMMateriales heterogéneos tenía un efecto significativo en tiempo promedio total del acomodo, de allí la importancia de modelar este factor en el problema de conformación de lotes con ruteo para obtener soluciones validas.

## 7.2 Futuras líneas de investigación

- Integración del problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo a un modelo de asignación de posiciones de almacenamiento (*Slotting*). Con este enfoque,

se puede modelar integralmente los componentes del acomodo buscando que esta opere eficientemente y contribuya al aumento del desempeño global del CEDI.

- Desarrollo un problema de programación (*Scheduling Problem*), que permita la minimización de la tardanza, en la preparación de pedidos, con el fin de atender los requerimientos de los clientes adecuadamente y usar los recursos del CEDI eficientemente. El modelo de programación, sería una extensión del problema de conformación de lotes con ruteo modelado en la presente tesis doctoral por lo cual consideraría  $K$  EMMateriales heterogéneos,  $n$  productos  $i \in OC$  de los clientes, tiempos de entrega,  $m$  posiciones de almacenamiento  $j$  y disponibilidad del inventario.
- Modelamiento integrado de los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos. En la tesis doctoral, ambas operaciones, únicamente compartían la política de almacenamiento y el inventario. En la extensión del problema, las decisiones que se modelen en el acomodo, simultáneamente, se deberían evaluar en la preparación de pedidos. Debe resaltarse, que abordar este problema de manera integrada aumenta considerablemente la complejidad matemática y computacional debido a las variables y restricciones asociadas a las operaciones.
- Extensión del problema de conformación de lotes con ruteo, a un CEDI con sistemas de almacenamiento con *robots* o *AS/RS* (*Automatic Storage/Retrieval System*). Inclusive, se podría modelar un CEDI híbrido con operaciones manuales, y sistemas automatizados.
- Evaluación de los problemas de conformación de lotes con ruteo en diferentes tipos de *layout* como: múltiples bloques, espina de pescado entre otros, para analizar su desempeño. Debe resaltarse, que en la presente tesis se evaluó un sistema de almacenamiento de múltiples pasillos paralelos, el cual es considerado el más típico en la literatura de los CEDI y la gestión de almacenes en general.

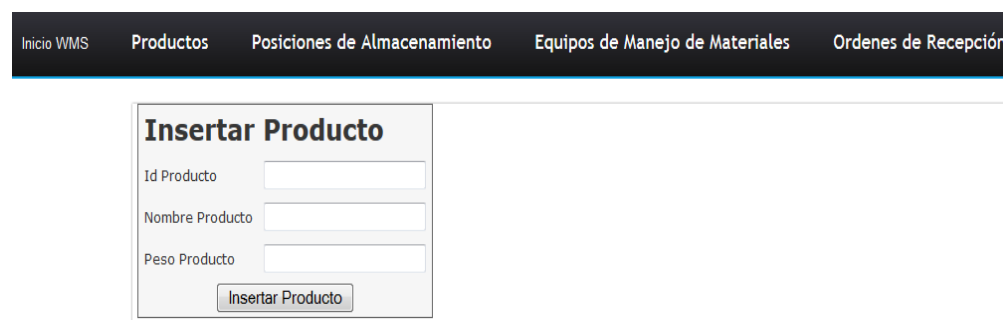
# A. Características computacionales de los metaheurísticos y reglas integrados a un WMS en el acomodo y la preparación de pedidos

Este anexo tiene como objetivo describir las características computacionales y las funcionalidades de los metaheurísticos y reglas que se integraron a un WMS, con el fin de solucionar los componentes de los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos. El WMS está desarrollado en el lenguaje JAVA® y una base de datos MySQL. A continuación, se presentan sus principales módulos:

## A.1 Gestión de productos


- Insertar productos: Este módulo permite registrar cada uno de los productos que se acomodan y posteriormente se recogen de las posiciones de almacenamiento. Para cada producto el WMS permite asignar un código, el nombre y el volumen en m<sup>3</sup>. El total de productos registrados configuran la tabla maestra del CEDI. A continuación, se presenta una imagen del módulo de gestión de productos.

**Figura A-1:** Insertar productos a almacenar o preparar en el WMS.




The image shows a screenshot of a web application interface. At the top, there is a dark navigation bar with five menu items: 'Inicio WMS', 'Productos', 'Posiciones de Almacenamiento', 'Equipos de Manejo de Materiales', and 'Ordenes de Recepción'. Below the navigation bar, a white box titled 'Insertar Producto' contains three input fields: 'Id Producto', 'Nombre Producto', and 'Peso Producto'. Below these fields is a button labeled 'Insertar Producto'.

- Consultar productos:

Permite consultar los productos que hacen parte del almacén y eliminar los productos que no se quieren dando clic en la 

**Figura A-2:** Consultar productos registrados en el WMS.



The screenshot shows a web application interface with a dark navigation bar at the top containing the following menu items: Inicio WMS, Productos, Posiciones de Almacenamiento, Equipos de Manejo de Materiales, and Ordenes de Recepción. Below the navigation bar, the main content area is titled 'Lista de Productos' and contains a table with the following data:

Id Producto	Nombre	Peso(Kg)	Eliminar
p1	ESPUMA MACH3 IRRITACION DEFENSE	4.41	X
p10	MACARRON CORTO DORIA 250 GR	6.0	X
p11	DORITOS MEGAQUESO X10 UNIDADES	2.4	X
p12	FRITO LAY LONCHERA	1.506	X
p13	RAMA MARGARINA CON SAL 250 GR	4.5	X
p14	RAMA MARGARINA CULINARIA 250 GR	6.0	X

## A2. Gestión de posiciones de almacenamiento:

El WMS permite registrar, editar y eliminar posiciones de almacenamiento de manera flexible. Las posiciones de almacenamiento presentan las siguientes características:

- Codificación: Número que identifica la posición de almacenamiento. La codificación facilita la identificación del pasillo y nivel de altura de la posición.
- Capacidad de almacenamiento: Se establece la capacidad de almacenamiento de la posición que se mide en volumen ( $m^3$ ) y peso (kg).

De otra parte, el WMS permite asignar productos a la posición de almacenamiento. Para la asignación se puede utilizar un método matemático de *slotting*, ABC u otros métodos diseñados por el modelador. Adicionalmente, se debe considerar aspectos como la contaminación cruzada, restricciones entre productos.

A continuación, se representa el modulo de insertar posiciones de almacenamiento en el WMS:

**Figura A-3:** Insertar posiciones de almacenamiento en el WMS.

El WMS también incluye una función para consultar las posiciones de almacenamiento generadas, la cual presenta la siguiente estructura:

**Figura A-4:** Consultar posiciones de almacenamiento registrados en el WMS.

Id Estante	Ubicación	Volumen Total	Volumen Utilizado	Peso Total(Kg)	Peso Utilizado(Kg)	Eliminar
1	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
2	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
3	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
4	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
5	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
6	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
7	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X
8	zona1	50.0	0.0	1500.0	0.0	X

### A3. Gestión de EMMateriales

El WMS permite crear y gestionar una flota de EMMateriales heterogéneos. A continuación, se representa la información de los EMMateriales que se gestiona por medio de este módulo:

**Figura A-5:** Insertar EMMateriales disponibles en el WMS.

The screenshot shows a web application interface with a dark navigation bar at the top containing the following menu items: Inicio WMS, Productos, Posiciones de Almacenamiento, Equipos de Manejo de Materiales, and Ordenes de Recepción. Below the navigation bar is a light gray form titled "Insertar Equipo de Manejo de Materiales". The form contains four input fields: "Id Equipo de Manejo de Materiales" with the value "0", "Capacidad Peso(Kg)" with the value "0.0", "Capacidad Volumen" with the value "0.0", and "Velocidad Equipo de Manejo de Materiales(km/h)" which is currently empty. At the bottom of the form is a button labeled "Insertar Equipo de Manejo de Materiales".

Este modulo de insertar EMMateriales, se compone de los siguientes elementos:

- ID del EMMateriales: Este código permite identificar de manera única el EMMateriales.
- Capacidad del EMMateriales: Se configura la capacidad máxima del EMMateriales en volumen ( $m^3$ ), peso (kg) o cantidad de productos.
- Velocidad del EMMateriales: Se establece la velocidad del EMMateriales, el cual se mide en m/s.

De otra parte, en el WMS se modeló una restricción entre los productos, los EMMateriales y posiciones de almacenamiento. Por lo tanto, el WMS permite restringir que productos puede se pueden recoger y acomodar según los EMMateriales disponibles, y las posiciones de almacenamiento que este puede visitar. Con esta funcionalidad también se determina y controla si los EMMateriales pueden ejecutar movimientos verticales y horizontales para ejecutar las operaciones bajo modelamiento.

El WMS tambien incluye una función para consultar los EMMateriales configurados, la cual presenta la siguiente representación:

**Figura A-6:** Consultar EMMateriales registrados en el WMS.

Inicio WMS	Productos	Posiciones de Almacenamiento	Equipos de Manejo de Materiales	Ordenes de Recepción
<b>Equipos de Manejo de Materiales</b>				
Id Equipo	Capacidad de Peso(Kg)	Capacidad de Cantidad	Velocidad Equipo (m/s)	Eliminar
1	1550.0	1.2	168.333	✘
2	1550.0	1.2	168.333	✘
3	1550.0	1.2	168.333	✘
4	2665.0	1.44	146.333	✘
5	2665.0	1.44	146.333	✘

## A.4 Tiempos de manipulación variable en el acomodo y la preparación de pedidos

Este módulo del WMS permite configurar los tiempos de manipulación de los productos en el acomodo o la preparación de pedidos, los cuales dependen de la ubicación de la posición de almacenamiento a visitar (pasillos y nivel de altura) y los EMMateriales disponibles. A continuación, se listan los tiempos que se modelan en los problemas para cada una de las operaciones en estudio.

**Tabla A-1:** Tiempos asociados a la conformación de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos.

	Acomodo	Preparación de pedidos
Conformación de lotes con ruteo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de cargar cada producto en el <i>depot</i>.</li> <li>• Tiempo de buscar la posición de almacenamiento</li> <li>• Tiempo de ubicar el producto dentro de la posición de almacenamiento con el EMMateriales asignado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de buscar la posición de almacenamiento</li> <li>• Tiempo de extraer el producto con el EMMateriales asignado.</li> <li>• Tiempo de descargar el producto en el <i>Depot</i>.</li> </ul>

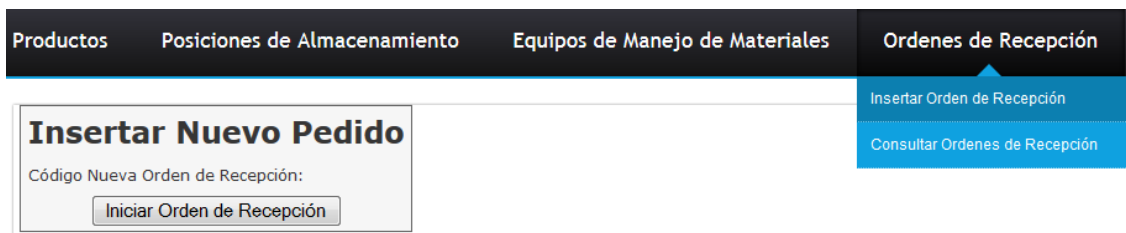
Finalmente, a continuación se representa la interfaz que permite configurar los tiempos de manipulación en el acomodo y la preparación de pedidos:



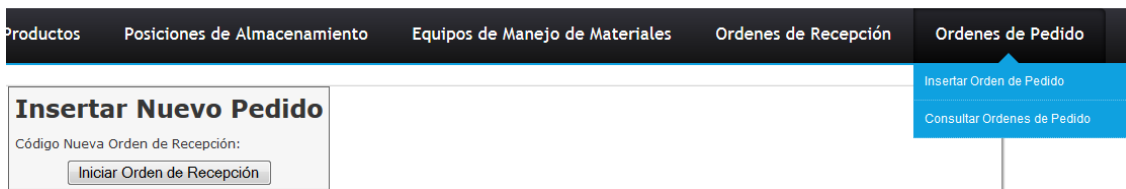
## A.5 Insertar Orden de acomodo o preparación de Pedidos

Este módulo permite recibir y configurar Órdenes de recepción o preparación de pedidos. La primera alternativa para este módulo consiste en recibir órdenes generadas en otros sistemas de información o una macro de Excel. Esta macro permite la gestión de la información para la experimentación en el acomodo. Por su parte, la segunda alternativa permite diseñar una nueva orden directamente en el WMS. A continuación, se representan gráficamente los módulos para las órdenes de recepción y preparación de pedidos.

**Figura A-7:** Insertar o consultar órdenes de recepción en el WMS.



**Figura A-8:** Insertar o consultar órdenes de pedidos de los clientes (OC) en el WMS.



El módulo de gestión de órdenes incluye una función que permite crear listas de acomodo (*Putaway List*) o preparación (*Picking List*). Esta funcionalidad genera flexibilidad en la experimentación, que permite evaluar diferentes escenarios operacionales del acomodo y la preparación de pedidos.

## A.6 Resolver componentes de los problemas de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos.

El WMS tiene integrados reglas y metaheurísticos para resolver los componentes de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos. Adicionalmente, este módulo permite configurar el número de iteraciones de los

metaheurísticos. A continuación, se listan los metaheurísticos y reglas integrados al WMS para resolver los componentes de los problemas en estudio:

**Tabla E-2:** Reglas y metaheurísticos para resolver componentes con conformación de lotes y ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos.

	Acomodo	Preparación de pedidos
Conformación de lotes	Metaheurístico <i>INS</i> Regla <i>FCFS</i>	Metaheurístico <i>PNS</i> Regla <i>PEPR</i>
Ruteo	RABTCLA RABTDI 2-Opt Intercambio RABTDI 2-Opt Inserción RABTDI 3-Opt Intercambio RABTDI 3-Opt Inserción RABTIN	RUPBTCLA RUPBTDI 2-Opt Intercambio RUPBTDI 2-Opt Inserción RUPBTDI 3-Opt Intercambio RUPBTDI 3-Opt Inserción RUPBTIN

Las reglas y metaheurísticos, se encuentran integrados al WMS. Inclusive, estos permiten resolver de manera simultánea los componentes de conformación de lotes con ruteo, en las operaciones en estudio.

## A.7 Reportes

La versión actual del WMS genera los siguientes reportes:

- Conjuntos de lotes con ruteo en el acomodo y la preparación de pedidos. Estos conjuntos miden el tiempo total de la operación
- Reporte de los productos, EMMateriales y secuencias de posiciones de almacenamiento asignadas a los conjuntos de lotes con ruteo, en el acomodo y la preparación de pedidos.
- Reporte de EMMateriales en uso y programados.
- Disponibilidad de posiciones de almacenamiento en el CEDI.
- Reporte de productos ubicados en cada posición de almacenamiento o en tránsito en el CEDI.
- Inventario disponible y reservado de los diferentes productos.

## B. Preguntas de experimentación (PE) y pruebas de hipótesis en el acomodo

En este apartado, se formulan cuatro preguntas de experimentación (PE) y las hipótesis de los efectos principales e interacciones dobles de los factores de interés, que se modelan para el problema en estudio

**Tabla B-1:** Preguntas de experimentación (PE) e hipótesis en el acomodo.

<b>PE1</b> ¿Evaluar, si el metaheurístico <i>NS</i> integrado al <i>WMS</i> , que se modela para resolver el componente de conformación de lotes, permita reducir el tiempo total y aumentar eficiencia del acomodo, respecto a la utilización de prioridad?	
<b>PE2</b> ¿Determinar cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el acomodo, genera un menor tiempo total de acomodo.	
Ho: $F1_1=F1_2$ Ha: $F1_i \neq 0$ para algún $i$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia conformación de lotes (F1).
Ho: $F2_1=F2_2=F2_3=F2_4=F2_5=F2_6$ Ha: $F2_j \neq 0$ para algún $j$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia de ruteo (F2).
Ho: $F3_1=F3_2$ Ha: $F3_k \neq 0$ para algún $k$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal tamaño de lista de acomodo (TLAcomodo) (F3).
Ho: $F4_1=F4_2$ Ha: $F4_l \neq 0$ para algún $l$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal ubicación del <i>depot</i> (F3).
Ho: $F5_1=F5_2=F5_3$ Ha: $F5_h \neq 0$ para algún $h$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal grupo K EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F1F2)_{ij}=0$ Ha: $(F1F2)_{ij} \neq 0$ para todo $(i,j)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y Estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F1F3)_{ik}=0$ Ha: $(F1F3)_{ik} \neq 0$ para todo $(i,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y TLAcomodo (F3).
Ho: $(F1F4)_{il}=0$ Ha: $(F1F4)_{il} \neq 0$ para todo $(i,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y ubicación del <i>depot</i> (F4).
Ho: $(F1F5)_{ih}=0$ para todo $(i,h)$ Ha: $(F1F5)_{ih} \neq 0$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y grupo K EMMateriales heterogéneos (F5).

**Tabla B-1:** (Continuación)

Ho: $(F2F3)_{jk}=0$ Ha: $(F2F3)_{jk} \neq 0$ para todo $(j,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y TLAcomodo (F3).
Ho: $(F2F4)_{il}=0$ Ha: $(F2F4)_{il} \neq 0$ para todo $(j,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y ubicación del <i>depot</i> (F4).
Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh} \neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos(F5).
<b>PE3 ¿Analizar, si la mejor variante del metaheurístico de búsqueda tabú para resolver el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes en el problema en estudio, permite obtener un menor tiempo total de acomodo, que un metaheurístico de algoritmos genéticos?.</b>	
Ho: $F2_1=F2_2$ Ha: $F2_j \neq 0$ para algún $j$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F1F2)_{ij}=0$ Ha: $(F1F2)_{ij} \neq 0$ para todo $(i,j)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y Estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F2F3)_{jk}=0$ Ha: $(F2F3)_{jk} \neq 0$ para todo $(j,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y TLAcomodo(F3)
Ho: $(F2F4)_{il}=0$ Ha: $(F2F4)_{il} \neq 0$ para todo $(j,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y ubicación del <i>depot</i> (F4).
Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh} \neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo(F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos(F5).
<b>PE4 ¿Qué impacto tiene en la solución del problema de conformación de lotes con ruteo de mínimo tiempo total, el modelamiento de <math>K</math> EMMateriales heterogéneos, que permiten ubicar los <math>n</math> productos <math>i</math>, en las <math>m</math> posiciones asignadas del CEDI?</b>	
Ho: $F5_1=F5_2=F5_3$ Ha: $F5_h \neq 0$ para algún $h$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal grupo $K$ EMMateriales heterogéneos(F5)
Ho: $(F1F5)_{ih}=0$ Ha: $(F1F5)_{ih} \neq 0$ para todo $(i,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes(F1) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos(F5)
Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh} \neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F3F5)_{kh}=0$ Ha: $(F2F5)_{kh} \neq 0$ para todo $(k,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto efecto interacción TLAcomodo (F3) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F4F5)_{lh}=0$ Ha: $(F2F5)_{lh} \neq 0$ para todo $(l,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción ubicación del <i>depot</i> (F4) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos(F5).

## C. Preguntas de experimentación (PE) e hipótesis en la preparación de pedidos.

En este subnumeral, se presentan cinco preguntas de experimentación (PE), con sus respectivas hipótesis nulas y alternativas, que permiten orientar el objetivo y el alcance de la validación experimental *con DOE* del problema en estudio. Adicionalmente, para cada PE formuladas, se presentan algunas observaciones o factores asociados para facilitar su comprensión

**Tabla C-1:** Preguntas de experimentación (PE) e hipótesis en la preparación de pedidos.

<b>PE1 ¿Determinar, si el metaheurístico PNS de conformación de lotes con ruteo integrado al WMS, permite disminuir el tiempo total e incrementar eficiencia de la preparación de pedidos, respecto implementación de una regla de prioridad?</b>	
<b>PE2 ¿Establecer estadísticamente, cuál de las variantes del metaheurístico de búsqueda tabú, que se implementa para solucionar el componente de ruteo integrado a la conformación de lotes, en el acomodo, genera un menor tiempo total de preparación de pedidos?</b>	
Ho: $F1_1=F1_2$ Ha: $F1_i \neq 0$ para algún $i$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia conformación de lotes (F1).
Ho: $F2_1=F2_2=F2_3=F2_4=F2_5=F2_6$ Ha: $F2_j \neq 0$ para algún $j$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia de ruteo (F2).
Ho: $F3_1=F3_2$ Ha: $F3_k \neq 0$ para algún $k$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal tamaño de lista de acomodo (TLAcomodo) (F3).
Ho: $F4_1=F4_2$ Ha: $F4_l \neq 0$ para algún $l$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal ubicación del <i>depot</i> (F3).
Ho: $(F1F2)_{ij}=0$ Ha: $(F1F2)_{ij} \neq 0$ para todo $(i,j)$ ,	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y Estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F1F3)_{ik}=0$ Ha: $(F1F3)_{ik} \neq 0$ para todo $(i,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y TLPpedidos (F3).
Ho: $(F1F4)_{il}=0$ Ha: $(F1F4)_{il} \neq 0$ para todo $(i,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y ubicación del <i>depot</i> (F4).

**Tabla C-1:** (Continuación)

Ho: $(F1F5)_{ih}=0$ Ha: $(F1F5)_{ih}\neq 0$ para todo $(i,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F1F6)_{iv}=0$ Ha: $(F1F6)_{iv}\neq 0$ para todo $(i,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y política de inventario (F6).
Ho: $(F2F3)_{jk}=0$ Ha: $(F2F3)_{jk}\neq 0$ para todo $(j,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y TLPpedidos (F3).
Ho: $(F2F4)_{il}=0$ Ha: $(F2F4)_{il}\neq 0$ para todo $(j,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y ubicación del <i>depot</i> (F4).
Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh}\neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F2F6)_{jv}=0$ Ha: $(F2F6)_{jv}\neq 0$ para todo $(j,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y política de inventario (F6).
Ho: $(F3F4)_{kl}=0$ Ha: $(F3F4)_{kl}\neq 0$ para todo $(k,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción TLPpedidos (F3) y ubicación del <i>depot</i> (F4).
Ho: $(F3F5)_{kh}=0$ Ha: $(F3F5)_{kh}\neq 0$ para todo $(k,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción TLPpedidos (F3) y $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F3F6)_{kv}=0$ Ha: $(F3F6)_{kv}\neq 0$ para todo $(k,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción TLPpedidos (F3) y política de inventario (F6).
Ho: $(F4F5)_{lh}=0$ Ha: $(F4F5)_{lh}\neq 0$ para todo $(l,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción TLPpedidos (F3) y $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F4F6)_{lv}=0$ Ha: $(F4F6)_{lv}\neq 0$ para todo $(l,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción ubicación del <i>depot</i> (F3) y política de inventario (F6).
Ho: $(F5F6)_{hv}=0$ Ha: $(F5F6)_{hv}\neq 0$ para todo $(h,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5) y política de inventario (F6).
<b>PE3¿Evaluar, si el mejor metaheurístico de búsqueda tabú para solucionar el componente de ruteo, produce un menor tiempo total de preparación de pedidos, que la implementación de un metaheurístico de algoritmos genéticos?.</b>	
Ho: $F2_1=F2_2$ Ha: $F2_j\neq 0$ para algún $j$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F1F2)_{ij}=0$ Ha: $(F1F2)_{ij}\neq 0$ para todo $(i,j)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y Estrategia de ruteo (F2).
Ho: $(F2F3)_{jk}=0$ Ha: $(F2F3)_{jk}\neq 0$ para todo $(j,k)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y Tlaco modo (F3).
Ho: $(F2F4)_{il}=0$ Ha: $(F2F4)_{il}\neq 0$ para todo $(j,l)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y ubicación del <i>depot</i> (F4).

**Tabla C-1:** (Continuación)

Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh}\neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F2F6)_{jv}=0$ Ha: $(F2F6)_{jv}\neq 0$ para todo $(j,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y política de inventario (F6).
<b>PE4 ¿Evaluar, si el factor grupo de <math>K</math> de EMMateriales heterogéneos y sus interacciones, tienen un efecto significativo sobre el tiempo total y la eficiencia, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos</b>	
Ho: $F5_1=F5_2=F5_3$ Ha: $F5_h\neq 0$ para algún $h$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F1F5)_{ih}=0$ Ha: $(F1F5)_{ih}\neq 0$ para todo $(i,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F2F5)_{jh}=0$ Ha: $(F2F5)_{jh}\neq 0$ para todo $(j,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F3F5)_{kh}=0$ Ha: $(F3F5)_{kh}\neq 0$ para todo $(k,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto de la interacción Tlaco modo (F3) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F4F5)_{lh}=0$ Ha: $(F4F5)_{lh}\neq 0$ para todo $(l,h)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción ubicación del <i>depot</i> (F4) y grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5).
Ho: $(F5F6)_{hv}=0$ Ha: $(F1F5)_{hv}\neq 0$ para todo $(h,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5) y política de inventario (F6).
<b>PE5 ¿Analizar, si el factor política de inventario y sus interacciones, presentan un efecto significativo sobre el tiempo total y la eficiencia, en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos.</b>	
Ho: $F6_1=F6_2$ Ha: $F4v\neq 0$ para algún $v$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto principal política de inventario (F6).
Ho: $(F1F6)_{iv}=0$ Ha: $(F1F6)_{iv}\neq 0$ para todo $(i,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de conformación de lotes (F1) y política de inventario (F6).
Ho: $(F2F6)_{jv}=0$ Ha: $(F2F6)_{jv}\neq 0$ para todo $(j,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción estrategia de ruteo (F2) y política de inventario (F6).
Ho: $(F3F6)_{kv}=0$ Ha: $(F3F6)_{kv}\neq 0$ para todo $(k,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción TLPpedidos (F3) y política de inventario (F6).
Ho: $(F4F6)_{lv}=0$ Ha: $(F4F6)_{lv}\neq 0$ para todo $(l,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción ubicación del <i>depot</i> (F3) y política de inventario (F6).
Ho: $(F5F6)_{hv}=0$ Ha: $(F1F5)_{hv}\neq 0$ para todo $(h,v)$	Hipótesis nula y alterna del promedio del efecto interacción grupo $K$ EMMateriales heterogéneos (F5) y política de inventario (F6).

## D. Plan de experimentación en el acomodo

Este anexo tiene como objetivo presentar el plan de experimentación del diseño de parcelas divididas que se implementó en el problema de conformación de lotes con ruteo, en el acomodo. A continuación, se presenta la estructura del plan de experimentación:

**Tabla D-1:** Plan de experimentación en el acomodo.

Corrida	EMMateriales (F5)	Replica	ECL(F1)	ER (F2)	TIAcomodo (F3)	Depot (F4)	Tiempototal (Variable respuesta)
1	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
2	1	1	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	
3	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
4	1	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
5	1	1	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	
6	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
7	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
8	1	1	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
9	1	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
10	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
11	1	1	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
12	1	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
13	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
14	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
15	1	1	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
16	1	1	FCFS	RABTIN	240	Centro	
17	1	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
18	1	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
19	1	1	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
20	1	1	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
21	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
22	1	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
23	1	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
24	1	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
25	1	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
26	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
27	1	1	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	



**Tabla D-1:** (Continuación)

28	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
29	1	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
30	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
31	1	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
32	1	1	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
33	1	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
34	1	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
35	1	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
36	1	1	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
37	1	1	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
38	1	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
39	1	1	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
40	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
41	1	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
42	1	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
43	1	1	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
44	1	1	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	
45	1	1	FCFS	RABTIN	240	Centro	
46	1	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
47	1	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
48	1	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
49	3	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
50	3	1	FCFS	RABTIN	240	Centro	
51	3	1	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	
52	3	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
53	3	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
54	3	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
55	3	1	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
56	3	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
57	3	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
58	3	1	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
59	3	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
60	3	1	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
61	3	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
62	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
63	3	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
64	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
65	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
66	3	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
67	3	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
68	3	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
69	3	1	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
70	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
71	3	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	

Tabla D-1: (Continuación)

72	3	1	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
73	3	1	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
74	3	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
75	3	1	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
76	3	1	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
77	3	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
78	3	1	FCFS	RABTIN	140	Centro	
79	3	1	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
80	3	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
81	3	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
82	3	1	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
83	3	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
84	3	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
85	3	1	FCFS	RABTIN	240	Centro	
86	3	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
87	3	1	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
88	3	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
89	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
90	3	1	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
91	3	1	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
92	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
93	3	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
94	3	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
95	3	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
96	3	1	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
97	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
98	5	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
99	5	1	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	
100	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
101	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
102	5	1	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
103	5	1	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
104	5	1	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
105	5	1	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
106	5	1	FCFS	RABTIN	140	Centro	
107	5	1	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
108	5	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
109	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
110	5	1	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
111	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
112	5	1	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
113	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
114	5	1	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
115	5	1	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
116	5	1	FCFS	RABTIN	240	Centro	
117	5	1	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
118	5	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
119	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
120	5	1	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	

**Tabla D-1:** (Continuación)

121	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
122	5	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
123	5	1	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
124	5	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
125	5	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
126	5	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
127	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
128	5	1	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
129	5	1	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	
130	5	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
131	5	1	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
132	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
133	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
134	5	1	FCFS	RABTIN	140	Centro	
135	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
136	5	1	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
137	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
138	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
139	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
140	5	1	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
141	5	1	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
142	5	1	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
143	5	1	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
144	5	1	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
145	1	2	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
146	1	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
147	1	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
148	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
149	1	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
150	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
151	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
152	1	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
153	1	2	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
154	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
155	1	2	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
156	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
157	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
158	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
159	1	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
160	1	2	FCFS	RABTCLA	140	Izquierda	
161	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
162	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
163	1	2	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
164	1	2	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
165	1	2	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
166	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	

**Tabla D-1:** (Continuación)

167	1	2	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
168	1	2	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
169	1	2	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
170	1	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
171	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
172	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
173	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
174	1	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
175	1	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
176	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
177	1	2	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
178	1	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
179	1	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
180	1	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
181	1	2	FCFS	RABTCLA	240	Izquierda	
182	1	2	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	
183	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
184	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
185	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
186	1	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
187	1	2	FCFS	RABTIN	140	Centro	
188	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
189	1	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
190	1	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
191	1	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
192	1	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
193	3	2	FCFS	RABTIN	240	Izquierda	
194	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
195	3	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
196	3	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
197	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
198	3	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
199	3	2	FCFS	RABTIN	140	Centro	
200	3	2	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
201	3	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
202	3	2	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
203	3	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
204	3	2	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
205	3	2	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
206	3	2	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
207	3	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
208	3	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
209	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
210	3	2	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
211	3	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
212	3	2	FCFS	RABTIN	140	Centro	
213	3	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	

**Tabla D-1:** (Continuación)

214	3	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
215	3	2	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
216	3	2	Meth INS	RABTCLA	140	Centro	
217	3	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	
218	3	2	Meth INS	RABTCLA	240	Izquierda	
219	3	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
220	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
221	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
222	3	2	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
223	3	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
224	3	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
225	3	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
226	3	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
227	3	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
228	3	2	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
229	3	2	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
230	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
231	3	2	Meth INS	RABTIN	240	Izquierda	
232	3	2	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
233	3	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
234	3	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
235	3	2	FCFS	RABTIN	140	Izquierda	
236	3	2	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	
237	3	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
238	3	2	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
239	3	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
240	3	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
241	5	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
242	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
243	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
244	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
245	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
246	5	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Izquierda	
247	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
248	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
249	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
250	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
251	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	
252	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
253	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
254	5	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
255	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Izquierda	
256	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
257	5	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
258	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
259	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Int	240	Centro	

**Tabla D-1:** (Continuación)

260	5	2	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
261	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
262	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
263	5	2	FCFS	RABTCLA	140	Centro	
264	5	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Centro	
265	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
266	5	2	Meth INS	RABTCLA	140	Izquierda	
267	5	2	Meth INS	RABTIN	140	Centro	
268	5	2	Meth INS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
269	5	2	Meth INS	RABTIN	240	Centro	
270	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	140	Izquierda	
271	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	140	Centro	
272	5	2	FCFS	RABTCLA	240	Centro	
273	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	140	Centro	
274	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
275	5	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	240	Centro	
276	5	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
277	5	2	Meth INS	RABTCLA	240	Centro	
278	5	2	FCFS	RABTDI2-OptInt	140	Izquierda	
279	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Int	240	Izquierda	
280	5	2	Meth INS	RABTIN	140	Izquierda	
281	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Centro	
282	5	2	Meth INS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
283	5	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Centro	
284	5	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	240	Izquierda	
285	5	2	FCFS	RABTDI3-Opt Ins	240	Izquierda	
286	5	2	FCFS	RABTDI2-Opt Ins	140	Izquierda	
287	5	2	FCFS	RABTIN	240	Centro	
288	5	2	Meth INS	RABTDI2-Opt Ins	140	Centro	

## E. Plan de experimentación en la preparación de pedidos

Este anexo tiene como propósito representar el plan de experimentación, que se diseñó para el DOE de parcelas divididas que se modeló en el problema de conformación de lotes con ruteo, en la preparación de pedidos. A continuación, se representa la estructura del plan de experimentación configurado (Tabla E-4).

**Tabla E-4** Plan de experimentación parcelas divididas en el problema de conformación de lotes con ruteo en la preparación de pedidos.

Corrida	EMMateriales(F5)	Replica	ECL (F1)	ER (F2)	TLPedidos (F3)	Depot (F4)	Pinventario (F6)	Tiempototal (Variable Respuesta)
1	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
2	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
3	1	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
4	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
5	1	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
6	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
7	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
8	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
9	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
10	1	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
11	1	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
12	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
13	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
14	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
15	1	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
16	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
17	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
18	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
19	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
20	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
21	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
22	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
23	1	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
24	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	

Tabla E-4: (Continuación)

25	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
26	1	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
27	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
28	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
29	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	
30	1	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
31	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
32	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
33	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
34	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
35	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
36	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
37	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
38	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
39	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
40	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
41	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
42	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
43	1	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
44	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
45	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
46	1	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
47	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
48	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
49	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
50	1	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
51	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
52	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
53	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
54	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
55	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
56	1	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
57	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
58	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
59	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
60	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
61	1	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
62	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
63	1	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
64	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
65	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
66	1	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
67	1	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
68	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	



Tabla E-4: (Continuación)

69	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
70	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
71	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
72	1	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
73	1	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
74	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
75	1	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
76	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
77	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
78	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
79	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
80	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
81	1	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
82	1	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
83	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
84	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
85	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
86	1	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
87	1	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
88	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
89	1	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
90	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
91	1	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
92	1	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
93	1	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
94	1	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
95	1	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
96	1	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
97	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
98	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
99	1	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
100	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
101	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
102	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
103	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
104	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
105	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
106	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
107	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
108	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
109	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
110	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
111	1	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
112	1	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
113	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
114	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	

Tabla E-4: (Continuación)

115	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
116	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
117	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
118	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
119	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
120	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
121	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
122	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
123	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
124	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
125	1	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
126	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
127	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
128	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
129	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
130	1	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
131	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
132	1	2	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
133	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
134	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
135	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
136	1	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
137	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
138	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
139	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
140	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
141	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
142	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
143	1	2	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
144	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
145	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
146	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
147	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
148	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
149	1	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
150	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
151	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
152	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
153	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
154	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
155	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
156	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
157	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
158	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
159	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	

Tabla E-4: (Continuación)

160	1	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
161	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
162	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
163	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
164	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
165	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
166	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
167	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
168	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
169	1	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
170	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
171	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
172	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
173	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
174	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
175	1	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
176	1	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
177	1	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
178	1	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
179	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
180	1	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
181	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
182	1	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
183	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
184	1	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
185	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
186	1	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
187	1	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
188	1	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
189	1	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
190	1	2	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
191	1	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
192	1	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
193	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
194	3	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
195	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
196	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
197	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
198	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
199	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
200	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
201	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
202	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
203	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
204	3	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
205	3	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
206	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	

**Tabla E-4:** (Continuación)

207	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
208	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
209	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
210	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
211	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
212	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
213	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
214	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
215	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
216	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
217	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
218	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
219	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
220	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
221	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
222	3	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
223	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
224	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
225	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
226	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
227	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
228	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
229	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
230	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
231	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
232	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
233	3	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
234	3	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
235	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
236	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
237	3	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
238	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	
239	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
240	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
241	3	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
242	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
243	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
244	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
245	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
246	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
247	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
248	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
249	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
250	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
251	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
252	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	

**Tabla E-4:** (Continuación)

253	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
254	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
255	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
256	3	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	5	
257	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
258	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
259	3	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
260	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
261	3	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
262	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
263	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
264	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
265	3	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
266	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
267	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
268	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
269	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
270	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
271	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
272	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
273	3	1	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
274	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
275	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
276	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
277	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
278	3	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
279	3	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
280	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
281	3	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
282	3	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
283	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
284	3	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
285	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
286	3	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
287	3	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
288	3	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
289	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
290	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
291	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
292	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
293	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
294	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
295	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
296	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	

**Tabla E-4:** (Continuación)

297	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
298	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
299	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
300	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
301	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
302	3	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
303	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
304	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
305	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
306	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
307	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
308	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
309	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
310	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
311	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
312	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
313	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
314	3	2	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
315	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
316	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
317	3	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
318	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
319	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
320	3	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
321	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
322	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
323	3	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
324	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
325	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
326	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
327	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
328	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
329	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
330	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
331	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
332	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
333	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
334	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	15	
335	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
336	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
337	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
338	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
339	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
340	3	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	

Tabla E-4: (Continuación)

341	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
342	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
343	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
344	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
345	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
346	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
347	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
348	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
349	3	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
350	3	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
351	3	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
352	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
353	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
354	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
355	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
356	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
357	3	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
358	3	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
359	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	
360	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
361	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
362	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
363	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
364	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
365	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
366	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
367	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
368	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
369	3	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
370	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
371	3	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
372	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
373	3	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
374	3	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
375	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
376	3	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
377	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
378	3	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
379	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
380	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
381	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
382	3	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
383	3	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	
384	3	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
385	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
386	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
387	5	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	

Tabla E-4: (Continuación)

388	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
389	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
390	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
391	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
392	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
393	5	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
394	5	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
395	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
396	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
397	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
398	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
399	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
400	5	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
401	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
402	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
403	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	5	
404	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
405	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
406	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
407	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
408	5	1	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
409	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
410	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
411	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
412	5	1	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
413	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
414	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
415	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
416	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
417	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
418	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
419	5	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
420	5	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
421	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
422	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
423	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
424	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
425	5	1	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
426	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
427	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
427	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
428	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
429	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	15	
430	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
431	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	



**Tabla E-4:** (Continuación)

432	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
433	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
434	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
435	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
436	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
437	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	5	
438	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
439	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
440	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
441	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
442	5	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
443	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
444	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
445	5	1	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
446	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
447	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
448	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
449	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
450	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
451	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
452	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
453	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
454	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
455	5	1	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
456	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
457	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
458	5	1	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
459	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
460	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	5	
461	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
462	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
463	5	1	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
464	5	1	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
465	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	15	
466	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
467	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
468	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
469	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
470	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	15	
471	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
472	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
473	5	1	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	15	
474	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
475	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
476	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
477	5	1	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	

Tabla E-4: (Continuación)

478	5	1	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
479	5	1	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
480	5	1	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
481	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
482	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
483	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	15	
484	5	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
485	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
486	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
487	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
488	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
489	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	5	
490	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
491	5	2	PEPR	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
492	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
493	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	5	
494	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
495	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	15	
496	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	
497	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	15	
498	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
499	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
500	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
501	5	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
502	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
503	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
504	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	15	
505	5	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
506	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Izquierda	15	
507	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
508	5	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	5	
509	5	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	15	
510	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
511	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
512	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
513	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
514	5	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
515	5	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
516	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Izquierda	15	
517	5	2	PEPR	RUPBTIN	250	Centro	15	
518	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
519	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Izquierda	5	
520	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Centro	15	
521	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
522	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
523	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	

**Tabla E-4:** (Continuación)

524	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	5	
525	5	2	PEPR	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
526	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
527	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
528	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Centro	5	
529	5	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
530	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Centro	15	
531	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	5	
532	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
533	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
534	5	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
535	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Centro	15	
536	5	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	15	
537	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	15	
538	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
539	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
540	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	150	Centro	5	
541	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	150	Izquierda	5	
542	5	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Izquierda	15	
543	5	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Centro	5	
544	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
545	5	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
546	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	250	Centro	15	
547	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
548	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
549	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
550	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
551	5	2	PEPR	RUPBTCLA	150	Izquierda	5	
552	5	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	250	Centro	15	
553	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	15	
554	5	2	PEPR	RUPBT2OPTIns	150	Centro	5	
555	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
556	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Centro	5	
557	5	2	PEPR	RUPBT3OPTInt	150	Izquierda	5	
558	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Centro	5	
559	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	250	Centro	5	
560	5	2	PEPR	RUPBTCLA	250	Centro	15	
561	5	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
562	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Izquierda	15	
563	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	15	
564	5	2	PEPR	RUPBTIN	150	Centro	5	
565	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	250	Centro	5	
566	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTIns	250	Izquierda	5	
567	5	2	Meth PNS	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
568	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	

**Tabla E-4:** (Continuación)

569	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	5	
570	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTInt	250	Izquierda	5	
571	5	2	Meth PNS	RUPBT3OPTIns	250	Centro	5	
572	5	2	Meth PNS	RUPBTCLA	150	Izquierda	15	
573	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	150	Izquierda	15	
574	5	2	Meth PNS	RUPBTIN	250	Centro	5	
575	5	2	PEPR	RUPBT2OPTInt	150	Centro	15	
576	5	2	PEPR	RUPBT3OPTIns	150	Izquierda	5	

En el diseño de parcelas divididas utilizado, se presenta una restricción a la aleatorización producida por el factor EMMateriales (Tabla D-4). Por esta razón, los niveles de este factor se fijaron como las parcelas principales. Las combinaciones de los otros cinco factores se asignan aleatoriamente dentro de cada nivel de la parcela principal.

Las 576 corridas generadas corresponden a las dos réplicas de las 288 combinaciones de niveles de los seis factores modelados para este problema. Las corridas se ejecutan en el *WMS* con las reglas y metaheurísticos integrados en el orden establecido en el plan de experimentación diseñado (Tabla D-4).

Una vez, se ejecutan las corridas que conforman el plan de experimentación estas se registran en el software InfoStat. Posteriormente, se desarrolla el análisis estadístico del diseño de parcelas divididas, y se responden las preguntas las cinco de experimentación formuladas.

## Bibliografía

- Albareda-Sambola, M., Alonso-Ayuso, A., Molina, E., & De Blas, C. S. (2009). Variable neighborhood search for order batching in a warehouse. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 26(05), 655-683.
- Azadnia, A. H., Taheri, S., Ghadimi, P., Mat Saman, M. Z., & Wong, K. Y. (2013). Order Batching in Warehouses by Minimizing Total Tardiness: A Hybrid Approach of Weighted Association Rule Mining and Genetic Algorithms. *The Scientific World Journal*, 2013, e246578.
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2014). *Warehouse & Distribution Science: Release 0.96*. The Supply Chain and Logistics Institute.
- Baker, P., & Halim, Z. (2007). An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. *Supply Chain Management: An International Journal*, 12(2), 129–138.
- Bessenouci, H. N., Sari, Z., & Ghomri, L. (2010). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Bjelić, N., Vidović, M., & Popović, D. (2013). Variable neighborhood search algorithm for heterogeneous traveling repairmen problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5997-6006.
- Brandão, J. (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 716-728.
- Brandão, J. (2011). A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(1), 140-151.
- Chen, F., Wang, H., Xie, Y., & Qi, C. (2014). An ACO-based online routing method for multiple order pickers with congestion consideration in warehouse. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1–20.

- Ceschia, S., Gaspero, L. D., & Schaerf, A. (2011). Tabu search techniques for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and carrier-dependent costs. *Journal of Scheduling*, 14(6), 601-615.
- Choi, E., & Tcha, D.-W. (2007). A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(7), 2080–2095.
- Cruz, J. J. D. la, Paternina-Arboleda, C. D., Cantillo, V., & Montoya-Torres, J. R. (2013). A two-pheromone trail ant colony system—tabu search approach for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products. *Journal of Heuristics*, 19(2), 233-252.
- Daniels, R. L., Rummel, J. L., & Schantz, R. (1998). A model for warehouse order picking. *European Journal of Operational Research*, 105(1), 1–17.
- De Koster, R. D., & Poort, E. V. D. (1998). Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions. *IIE Transactions*, 30(5), 469-480.
- De Koster, M. B. M., Van der Poort, E. S., & Wolters, M. (1999). Efficient orderbatching methods in warehouses. *International Journal of Production Research*, 37(7), 1479-1504.
- De Koster, R., Leduc, T., & Roodbergen, K. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182, 481-501.
- Dekker, R., Asperen, E. van, Ochtman, G., & Kusters, W. (2009). Floating stocks in FMCG supply chains: using intermodal transport to facilitate advance deployment. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(8), 632 - 648.
- Dharmapriya, U. S. S., & Kulatunga, A. K. (2011). New strategy for warehouse optimization—lean warehousing. En *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Council of Supply Chain Management Professionals.
- Duhamel, C., Lacomme, P., & Prodhon, C. (2012). A hybrid evolutionary local search with depth first search split procedure for the heterogeneous vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2), 345–358.
- Euchi, J., & Chabchoub, H. (2010). A hybrid tabu search to solve the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Logistics Research*, 2(1), 3-11. doi:10.1007/s12159-010-0028-3

- Frazelle, E., & Sojo, R. (2006). *Logística de Almacenamiento y Manejo de Materiales de Clase Mundial*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Geng, Y., Li, Y., & Lim, A. (2005). A very large-scale neighborhood search approach to capacitated warehouse routing problem. En *17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2005. ICTAI 05* (p. 8 pp.-65).
- Gendreau, M., Laporte, G., & Yelle, S. (1997). Efficient Routing of Service Vehicles. *Engineering Optimization*, 28(4), 263-271.
- Henn, S., Koch, S., Doerner, K., Strauss, C., & Wäscher, G. (2010). Metaheuristics for the order batching problem in manual order picking systems. *BuR Business Research Journal*, 3(1), 1-24.
- Henn, S., Koch, S., & Wäscher, G. (2010). *Order Batching in Order Picking Warehouses: A Survey of Solution Approaches*. Univ., Fac. of Economics and Management.
- Henn, S. (2012). Algorithms for on-line order batching in an order picking warehouse. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2549-2563.
- Henn, S., & Wäscher, G. (2012). Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 484-494.
- Henn, S., & Schmid, V. (2013). Metaheuristics for order batching and sequencing in manual order picking systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 338-351.
- Heragu, S. S., Du, L., Mantel, R. J., & Schuur, P. C. (2005). Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*, 43(2), 327.
- Hou, J.-L., Wu, Y.-J., & Yang, Y.-J. (2010). A model for storage arrangement and re-allocation for storage management operations. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4), 369-390.
- Ho, Y., Su, T., & Shi, Z. (2008). Order-batching methods for an order-picking warehouse with two cross aisles. *Computers & Industrial Engineering*, 55, 321-347.
- Hong, S., Johnson, A., & Peters, B. (2012). Large-scale Order Batching in Parallelaisle Picking Systems." *IIE Transaction* 44(4): 88-106.
- Imran, A., Salhi, S., & Wassan, N. A. (2009). A variable neighborhood-based heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 509-518.

- Kim, B. S., & Smith, J. S. (2012). Slotting methodology using correlated improvement for a zone-based carton picking distribution system. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 286-295.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33, 2004.
- Kritikos, M. N., & Ioannou, G. (2013). The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows. *International Journal of Production Economics*, 144(1), 68–75.
- Kulak, O., Sahin, Y., & Taner, M. E. (2012). Joint order batching and picker routing in single and multiple-cross-aisle warehouses using cluster-based tabu search algorithms. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(1), 52-80.
- Kutzelnigg, R. (2011). Optimal allocation of goods in a warehouse: Minimizing the order picking costs under real-life constraints. En *Logistics and Industrial Informatics (LINDI), 2011 3rd IEEE International Symposium on* (pp. 65–70).
- Leung, S. C., Zhang, Z., Zhang, D., Hua, X., & Lim, M. K. (2013). A meta-heuristic algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 225(2), 199–210.
- Li, X., Leung, S. C., & Tian, P. (2012). A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 365–374.
- Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A. (2006). Design and control of an AS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7), 766-774.
- Matusiak, M., de Koster, R., Kroon, L., & Saarinen, J. (2014). A fast simulated annealing method for batching precedence-constrained customer orders in a warehouse. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 968-977.
- Min, H. (2009). Application of a decision support system to strategic warehousing decisions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(4), 270 – 281.
- Muppani (Muppant), V. R., & Adil, G. K. (2008). Efficient formation of storage classes for warehouse storage location assignment: A simulated annealing approach. *Omega*, 36(4), 609-618.
- Öncan, T. (2013). A Genetic Algorithm for the Order Batching Problem in Low-level Picker-to-part Warehouse Systems. En *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*.



- Ozfirat, P. M., & Ozkarahan, I. (2010). A Constraint Programming Heuristic for a Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Split Deliveries. *Applied Artificial Intelligence*, 24(4), 277-294.
- Petersen, C. G., & Aase, G. (2004). A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92.
- Petersen, C. G., & Schmenner, R. W. (1999). An Evaluation of Routing and Volume-based Storage Policies in an Order Picking Operation. *Decision Sciences*, 30(2), 481-501.
- Prado, P. P., & Lopes, L. P. L. (2007). Scatter search for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *Central European Journal of Operations Research*, 15(4), 351-368.
- Prins, C. (2002). Efficient Heuristics for the Heterogeneous Fleet Multitrip VRP with Application to a Large-Scale Real Case. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 1(2), 135-150.
- Prins, C. (2009). Two memetic algorithms for heterogeneous fleet vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(6), 916-928.
- Rekersbrink, H., Makuschewitz, T., & Scholz-Reiter, B. (2009). A distributed routing concept for vehicle routing problems. *Logistics Research*, 1(1), 45-52.
- Renaud, J., & Ruiz, A. (2007). Improving product location and order picking activities in a distribution centre. *Journal of the Operational Research Society*, 59(12), 1603–1613.
- Roodbergen, K. J., & Koster, R. (2001). Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. *International Journal of Production Research*, 39(9), 1865-1883.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2006). A model for warehouse layout. *IIE - Transactions*, 38(10), 799.
- Rubrico, J., Ota, J., Higashi, T., & Tamura, H. (2008). Metaheuristic scheduling of multiple picking agents for warehouse management. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(1), 58–68.
- Rubrico, J. I. U., Higashi, T., Tamura, H., & Ota, J. (2011). Online rescheduling of multiple picking agents for warehouse management. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1), 62–71.
- Subramanian, A., Penna, P. H. V., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2012). A hybrid algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 221(2), 285–295.

- Takahama, H., Nishi, T., Konishi, M., & Imai, J. (2002). A determination method of product allocation schedule for warehouse management. En *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference* (Vol. 2, pp. 1004-1007 vol.2).
- Theys, C., Bräysy, O., Dullaert, W., & Raa, B. (2010). Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200, 755-763.
- Tsai, C.-Y., Liou, J. J. H., & Huang, T.-M. (2008). Using a multiple-GA - method to solve the batch picking problem: considering travel distance and order due time. *International Journal of Production Research*, 46(22), 6533.
- Xing, B., Gao, W. J., Nelwamondo, F. V., Battle, K., & Marwala, T. (2010). Ant colony optimization for automated storage and retrieval system. En *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on* (pp. 1–7).