

# Mejoramiento del cargue en el despacho de un centro de distribución utilizando superficies de respuesta\*

Rodrigo Andrés Gómez Montoya\*\*, Alexander Alberto Correa Espinal\*\*\*

## Resumen

**Introducción.** El cargue en la operación de despacho es crítico para que la entrega de los pedidos se efectúe de manera eficiente y se contribuya a la satisfacción de las necesidades de los clientes. **Objetivo.** Utilizar la técnica de optimización de diseño de experimentos denominada metodología de superficie de respuesta para reducir el tiempo de cargue en la operación de despacho, lo cual contribuye a la eficiencia del Centro de distribución (CEDI). **Materiales y métodos.** Se utiliza un enfoque metodológico de cuatro etapas, incluyendo aspectos como descripción de la empresa, el sistema logístico, el CEDI, y adaptación de la metodología de superficies de respuesta, apoyada en el uso del software estadístico Minitab 15® en la operación de despacho. **Resultados.** Se obtiene una metodología basada en la de superficie de respuesta que no solo contribuye al estado del arte del mejoramiento de la operación del despacho en el CEDI, sino que también es aplicable en entornos empresariales, ya que en el caso desarrollado en una empresa de cárnicos, la metodología permite reducir el tiempo de 10 a 6.5 minutos aproximadamente, garantizando condiciones óptimas de funcionamiento.

**Palabras clave:** cargue, despacho, metodología de superficies de respuesta, mejoramiento, centro de distribución.

## Loading improvement in the dispatch of a distribution center by the use of response surfaces

## Abstract

**Introduction.** Loading in dispatching operations is a critical process to make the deliveries efficiently and

to contribute to the satisfaction of the clients' needs. **Objective.** To use the technique of experimental design optimization called response surface methodology, in order to reduce the time required to load in the dispatching operation, thus contributing to make the Distribution Center (CEDI) more efficient. **Materials and methods.** A four stages methodology focus is used, including aspects such as description of the company, the logistics system, the CEDI and the adaptation of the response surfaces methodology, supported by the use of the Minitab 15® statistical software in the dispatching operation. **Results.** A methodology based on that of the response surface is obtained, not only contributing to the state of the art through the improvement of CEDI, but also creating a tool applicable in companies because in the case developed in a meat production company, it reduced the time from 10 to 6.5 minutes, approximately, guaranteeing optimal working conditions.

**Key words:** Loading, dispatch, response surfaces methodology, improvement, distribution center.

## Melhoramento do carregamento no despacho de um centro de distribuição utilizando superfícies de resposta

## Resumo

**Introdução.** O carregamento na operação de despacho é crítico para que a entrega dos pedidos se efetue de maneira eficiente e se contribua à satisfação das necessidades dos clientes. **Objetivo.** Utilizar a técnica de otimização de desenho de experimentos denominada metodologia de superfície de resposta para reduzir o tempo de carregamento na operação de despacho, o qual contribui à eficiência do Centro de distribuição (CEDI). **Materiais e métodos.**

\* El presente artículo es resultado de la tesis de maestría "Desarrollo de modelo para apoyar el diseño o mejoramiento de las operaciones y recursos de la gestión de almacenes basados en simulación discreta y diseño experimental".

\*\* Ingeniero Industrial. MSc Ingeniería Administrativa. Docente Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

\*\*\* Ingeniero Industrial. PhD Estadística e investigación de operaciones. Profesor Asociado Escuela de la Organización, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Correspondencia: Rodrigo Andrés Gómez Montoya, e-mail: rodrigomez1986@gmail.com

Artículo recibido: 18/05/2011; Artículo aprobado: 01/08/2012

Utiliza-se um enfoque metodológico de quatro etapas, incluindo aspectos como descrição da empresa, o sistema logístico, o CEDI, e adaptação da metodologia de superfícies de resposta, apoiada no uso do software estatístico Minitab 15® na operação de despacho. **Resultados.** Obtém-se uma metodologia baseada na de superfície de resposta que não só contribui ao estado da arte do melhoramento da operação do despacho no

CEDI, senão que também é aplicável em meios empresariais, já que no caso desenvolvido numa empresa de cárnicos, a metodologia permite reduzir o tempo de 10 a 6.5 minutos aproximadamente, garantindo condições ótimas de funcionamento.

**Palavras importantes:** carregamento, despacho, Metodologia de superfícies de resposta, melhoramento, centro de distribuição.

---

## Introducción

Los centros de distribución (CEDI) se han convertido en un proceso logístico crítico y estratégico en la cadena de suministro por su impacto en los costos y la satisfacción de las necesidades de los clientes<sup>1</sup>; de allí la importancia de su adecuado diseño y del mejoramiento de sus políticas, operaciones y recursos.

Baker y Halim<sup>2</sup> describen que un almacén tipo CEDI, a menudo, es considerado como un punto en la cadena de suministro que permite consolidar productos, agregar servicios de valor y despachar a los consumidores de una manera eficiente, buscando desarrollar una ventaja competitiva desde la estrategia de operaciones de la empresa.

La gestión y el funcionamiento de los CEDI se soportan en políticas, recursos y operaciones<sup>3</sup>. Las políticas se relacionan con estrategias y condiciones de operación como horarios de trabajo, recepción de mercancía, estrategias de productividad, entre otros.

En lo relacionado con los recursos en el CEDI, estos pueden clasificarse como: a) equipo de manejo de materiales, incluyendo montacargas, transpaletas, bandas transportadoras, entre otros; b) instalaciones y sistemas de almacenamiento, c) recursos humanos, d) Tecnologías de información y comunicaciones como el WMS (*Warehouse Management System*), YMS (*Yard Management System*), código de barras, RFID (*Radio Frequency System*), entre otros<sup>7, 8</sup>.

Por su parte, las operaciones típicas del CEDI son: recepción, acomodo, almacenamiento, preparación de pedidos, despacho, consolida-

ción, desconsolidación de carga y *crossdocking*<sup>3, 4</sup>, las cuales deben permitir la atención de los requerimientos de los clientes internos y externos.

De las diferentes operaciones, la preparación de pedidos y el despacho suelen ser consideradas como críticas en CEDI, ya que estas impactan en la satisfacción de los clientes<sup>5</sup>, y en los costos logísticos del CEDI y representan alrededor del 70% de estos<sup>4, 5</sup>.

En el CEDI pueden cobrar importancia, el adecuado diseño, gestión y mejoramiento de la operación de despacho en lo relacionado con la preparación de documentos y el tiempo de cargue de los medios de transporte, debido a su impacto en la eficiencia y eficacia de la distribución que permite entregar al cliente con la calidad, el costo y el tiempo pactados<sup>4, 6</sup>.

Para el diseño y mejoramiento de la operación de despacho pueden emplearse diferentes herramientas cuantitativas tales como simulación discreta, control estadístico de calidad y diseño de experimentos.

Este planteamiento puede justificarse a través de los resultados obtenidos de una revisión al estado del arte respecto al uso de técnicas cuantitativas en la operación de despacho. De la revisión, se identifican tres enfoques: el primero considera el diseño o mejoramiento del despacho dentro de proyectos integrales en la gestión de almacenes o CEDI; el segundo propone artículos con uso de técnicas aplicadas en el despacho directamente, y el tercero es la utilización de diseño de experimentos en las operaciones del CEDI; se debe considerar que en este enfoque no se identificaron propuestas específicas que incluyan la operación

de despacho. Estos enfoques se presentan a continuación.

En el primer enfoque, se encuentran autores como: a) Gagliardi<sup>9</sup>, quien propone un modelo de simulación discreta desarrollado en el software Arena® para el mejoramiento de las operaciones de la gestión de almacenes de una gran empresa de *snacks* en los Estados Unidos, incluyendo el despacho de los productos a los clientes, b) Buil y Piera<sup>10</sup> desarrollan una metodología y un modelo de simulación discreta en Arena® para rediseñar las operaciones de la gestión de almacenes, consideran la preparación de pedidos y el despacho, y buscan gestionar adecuadamente restricciones de costos, calidad, tiempo de respuesta, entre otros, c) Chiang, Zepeda, Xu y Rusell<sup>11</sup> plantean un modelo combinado de simulación discreta y metaheurísticos para resolver el problema de integración de la producción y distribución en la administración de la cadena de suministro de un empresa de periódicos.

En el segundo enfoque, se consideran autores como: a) Potter, Yang, Lalwani<sup>12</sup> describen la necesidad de mejorar la productividad del despacho como operación crítica de la cadena de suministro, debido a que es un vínculo entre el CEDI y transporte. Como estrategia desarrollan un caso de estudio de mejora de esta operación, utilizando simulación discreta que permite reducir tiempo y asegurar la operación, b) Wang y Tang<sup>13</sup> desarrollan un modelo de optimización para maximizar la rentabilidad y el despacho de contendedores, y mejorar la eficiencia de la operación utilizando programación entera, c) Potter y Lalwani<sup>13</sup> desarrollan una metodología para mejorar la operación de despacho utilizando técnicas de manufactura esbelta como el *VSM (ValueStreamMap)* y estadística descriptiva para analizar los datos de funcionamiento e identificar oportunidades de mejora, y posteriormente desarrollar un modelo de simulación discreta que permita aumentar la productividad de la operación de despacho. En el tercer enfoque, se identifican las propuestas de autores como: a) Ekren, Heragu, Krishnamurthy y Malmborg<sup>15</sup> quienes utilizan un modelo  $2^k$  para apoyar el diseño y medir el desempeño del sistema de almacenamiento automático, el cual tiene impacto en el adecuado funcionamiento del despacho; b) Gómez y

Correa<sup>16</sup>, emplean un modelo factorial completo de cuatro factores para mejorar la operación de recepción en un CEDI buscando mejorar la eficiencia respecto a la reducción del tiempo y la utilización de los recursos. Se debe resaltar que no se identificaron artículos con el uso de técnicas de diseño experimental como superficies de respuesta para mejorar la operación de despacho, ya que esta permite identificar y establecer las condiciones de funcionamiento óptimo del despacho, lo cual puede convertirse en una estrategia que aporte a la eficiencia y productividad del CEDI, y la operación en estudio<sup>17</sup>.

A partir de los tres enfoques revisados, se identifica la oportunidad de investigar para desarrollar una metodología que permita mejorar la operación de despacho utilizando técnicas cuantitativas como simulación y el diseño de experimentos con modelos como superficies de respuesta que permiten encontrar las condiciones óptimas de la operación<sup>17, 18</sup>. Además, la oportunidad descrita puede aportar a la agenda de investigación del tema, ya que la mayoría de los artículos revisados consideran el mejoramiento del despacho de manera general, sin detallar una metodología que sea replicable. Aunque Potter *et al.*<sup>12, 14</sup> establecen una propuesta para mejorar el despacho, en ella emplean simulación y estadística básica, pero no garantizan soluciones óptimas; por lo tanto, estas propuestas pueden mejorarse con el uso de modelos de diseño de experimentos como superficies, lo cual, no solo impacta en la eficiencia de la operación sino que permite adoptar técnicas de modelamiento estadístico, por lo que se puede considerar como una innovación científica en el CEDI.

Por los motivos expuestos, el artículo tiene como objetivo utilizar la técnica de diseño de experimentos denominada metodología de superficie de respuesta para reducir el tiempo de cargue en la operación de despacho, lo cual contribuye a la eficiencia del CEDI. Además, se busca apropiarse de la estadística industrial buscando generar estrategias de innovación basadas en la investigación del CEDI.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se desarrolla una metodología que se basa en la utilización de información secundaria y primaria.

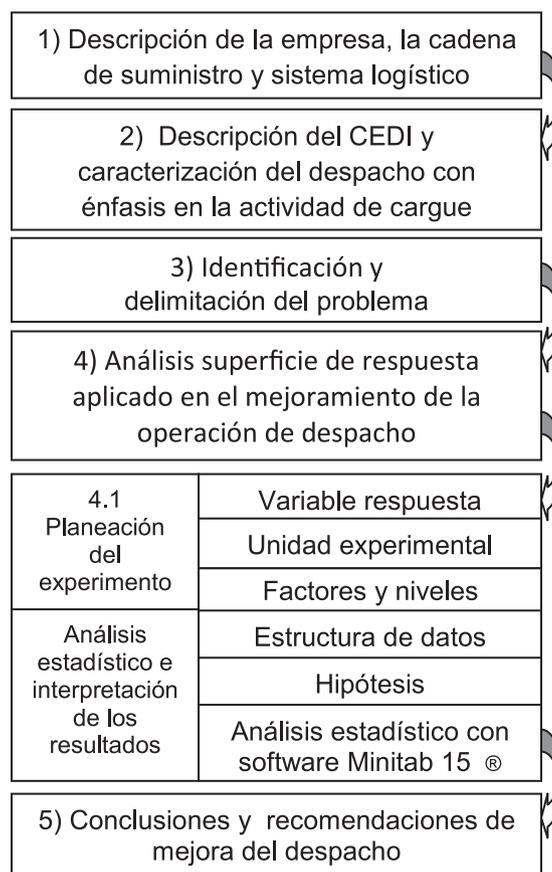
La secundaria proviene de libros y artículos científicos relacionados con el CEDI, recepción, técnicas cualitativas y cuantitativas como la metodología de superficie de respuesta. La información primaria se utiliza para desarrollar un caso de aplicación de superficie de respuesta, que mejore la operación de cargue en el despacho, incluyendo descripción de la empresa, formulación del modelo estadístico, el análisis de resultados y conclusiones que orienten su utilización. Como soporte al análisis estadístico, se usa el software Minitab 15®. El artículo se estructura en tres partes. La primera describe el método utilizado. En la segunda, se desarrolla la metodología de superficie de respuesta para mejorar el cargue en el despacho del CEDI, tomando como caso de

estudio una empresa de cárnicos. Finalmente, se presenta los resultados, la discusión y las conclusiones.

## Materiales y métodos

Para alcanzar el objetivo de desarrollar un enfoque metodológico, se utiliza como base la metodología de superficie de respuesta, propuesta por Gutiérrez y De La Vara<sup>17</sup>, y Montgomery<sup>18</sup>, Wang y Wan<sup>19</sup>, la cual es adaptada para mejorar la operación de despacho del CEDI.

A continuación, se presenta un esquema de la metodología de mejora (figura 1).



**Figura 1. Metodología de mejora del despacho con superficie de respuesta.**

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una descripción general de cada uno de los componentes de la metodología expuesta:

1. *Descripción de la empresa, la cadena de suministro y el sistema logístico.* Se deben describir las características de la empresa considerando el tamaño, el sector empresarial y el tipo de clientes. En la cadena de suministro, se establecen las relaciones con proveedores, la empresa y los clientes. De otra parte, el sistema logístico debe considerar procesos desarrollados por la empresa, como compras, gestión de almacenes, producción, CEDI, transporte, distribución y logística inversa, entre otros.

2. *Descripción del CEDI y caracterización de la operación de despacho con énfasis en el cargue.* Posteriormente, se propone la utilización de la herramienta de caracterización de operaciones de gestión por procesos SIPOC (*suppliers* o proveedor, *input* o entrada, *process* o proceso, *output* o salida, *customer* o consumidor) para detallar las características de la operación de despacho, lo cual, no solo permite establecer su estado actual, sino identificar posibles oportunidades de mejora que aumenten la eficiencia<sup>20, 21</sup>.

3. *Identificación y delimitación del problema.* Se identifica, describe y establece el alcance del problema, el cual debe orientarse a mejorar la eficiencia del cargue en la operación de despacho buscando la reducción de tiempo y costos, y el aumento en la satisfacción del cliente<sup>2, 17</sup>.

4. *Análisis superficie de respuesta, aplicado en el mejoramiento de la operación de despacho.* Se adapta la metodología para la planeación y análisis de este diseño de experimentos a la operación de despacho, la cual se basa en la definición de la variable respuesta, factores y niveles relacionados con el despacho. Posteriormente, se formula la superficie de respuesta que puede aplicar a) la técnica ascendente-descendente que se usa cuando se requiere maximizar la eficiencia o minimizar los desperdicios en la operación de despacho<sup>17</sup>, b) análisis canónico que es un diseño de segundo orden que se utiliza cuando se quiere explorar con más amplitud una región experimental cuando se tienen indicios de que se está cerca

del punto óptimo, el cual permite disminuir el tiempo de cargue de los medios de transporte o maximizar la eficiencia en el despacho<sup>18</sup>, y c) análisis de cordillera que es una técnica que permite determinar el mejor punto en la región experimental para mejorar la operación de despacho. El análisis estadístico de la superficie de respuesta se hace con software Minitab 15®. En esta etapa, se valida del cumplimiento de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia, fundamentales para garantizar la validez del modelo<sup>17, 18</sup>.

5. *Conclusiones y recomendaciones de la mejora de la operación de cargue en la operación de despacho.* A partir de los resultados obtenidos del análisis estadístico, se establecen conclusiones del estado actual del cargue de la operación de despacho, y se establecen recomendaciones que permitan mejorar la eficiencia en sus actividades, uso de recursos y orientación al cliente.

## Resultados

A continuación, se desarrolla cada una de las etapas de la metodología de mejora del cargue en la operación de despacho, basada en el uso de la metodología de superficie de respuesta.

1. *Descripción de la empresa, la cadena de suministro y el sistema logístico.* Se selecciona una empresa mediana ubicada en la ciudad de Medellín dedicada a la producción y comercialización de 15 familias de productos cárnicos. La cadena de suministro de esta empresa se conforma por proveedores de materias primas, insumos y servicios, los cuales, son transformados por la empresa en productos cárnicos que se comercializan en tres puntos de venta de la empresa y clientes minoristas, tales como: supermercados y distribuidores ubicados en el área metropolitana.

El sistema logístico se conforma por procesos tales como: compras, producción, gestión de almacenes de materias primas y productos terminados que cumple la función de CEDI; en este último se tienen 3 cavas con estanterías de 115 m<sup>3</sup> en las cuales se mantiene el inventario de los productos cárnicos. La empresa desarrolla el proceso de transporte y distribución

con dos camiones de 2 toneladas con refrigeración, para garantizar la calidad del producto.

**2. Descripción del CEDI y la operación de despacho.** El CEDI tiene un área de 1200 m<sup>2</sup> y está ubicado contiguo a las instalaciones de producción; tiene como objetivo atender los pedidos de los clientes en el tiempo y las condiciones negociadas. En el CEDI se desarrollan las operaciones de recepción, almacenamiento, preparación de pedidos, despacho y *crossdocking*. Los recursos que este posee son: personal, equipo de manejo de materiales (dos transpaleta y una montacarga) y tecnología de información y comunicaciones (TIC) con captura de datos con código de barras.

La operación de despacho consiste en verificar las referencias de los productos cárnicos a enviar, preparación de la documentación, facturas y cargue de los camiones. A continuación, se presenta la caracterización de la operación despacho, utilizando un formato *SIPOC* (figura 2).

**3. Identificación y delimitación del problema.** A partir de la caracterización y análisis de la operación de despacho, y una entrevista al coordinador de logística, se identifica que en la actualidad la empresa presenta ineficiencia en el tiempo de cargue de los camiones, debido a demoras en el registro del producto a despachar y el traslado de las estibas con canastillas con los diferentes productos cárnicos. Por los motivos expuestos, se busca mejorar la eficiencia del despacho a través de la reducción del tiempo de cargue que en la actualidad se realiza en 10 minutos aproximadamente,

mientras el tiempo promedio del despacho es de alrededor de 35 minutos.

**4. Análisis con la metodología de Superficie de Respuesta aplicada en el mejoramiento de la operación de despacho.** Para aplicar la metodología, inicialmente se desarrolla la planeación del experimento y posteriormente se realiza su formulación y análisis estadístico.

#### 4.1. Planeación del experimento

Este incluye:

- Variable respuesta: tiempo promedio de cargue de camiones de 2 toneladas.
- Unidad experimental: pedidos en estibas para cargar en los camiones. Para las mediciones, se garantizan las mismas condiciones de experimentación.
- Factor de interés y niveles: los factores seleccionados son: velocidad (A), configuración (B) y experiencia y competencias del operario del montacarga (D), los cuales se consideran críticos para mejorar el tiempo de cargue. Además, se considera el factor de sistema de identificación y captura de datos de productos cárnicos a despachar (C) (tabla 1).

Los factores descritos fueron seleccionados con base en las características del cargue en la operación de despacho de la empresa en estudio, y la recomendación de autores expertos en el tema como Gu *et al.*<sup>1</sup>, Frazelle<sup>4</sup> y Potter *et al.*<sup>12, 14</sup>. Debe resaltarse que el (+) refleja un nivel alto y el (-) un nivel bajo del factor.

**Tabla 1. Factores y niveles seleccionados**

Factor	Niveles	
	+	-
Velocidad del montacargas km/hora	2	2.5
Configuración montacarga	Horquilla	Trilateral
Código de barras	Por lotes	Unidad
Experiencia operario	3	5

Fuente: Elaboración propia

<b>DESPACHO</b>																														
<b>Objetivo</b>	Realizar el despacho de pedidos cumpliendo los procedimientos de la organización y requerimiento de los clientes, con el fin de satisfacer sus necesidades																													
<b>Alcance</b>	Cubre desde que el producto está en el guaje de despacho hasta el cargue, e inicio de la distribución																													
<b>Proveedor (Proceso) (I) o Producto (P)</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: center;">Actividades</th> <th colspan="4" style="text-align: center;">Diagrama de procesos</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">Salida (información o producto)</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">Cliente (proceso)</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">Responsable</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">Operación</th> <th style="text-align: center;">Transporte</th> <th style="text-align: center;">Espera</th> <th style="text-align: center;">Inspección</th> <th style="text-align: center;">Almacenamiento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Una vez los pedidos de los clientes están completos en el guaje de despacho, se procede a adjuntar su factura y verificar que estos contengan las referencias y cantidades correctas. En caso, de existir problemas se realizan los ajustes necesarios.</td> <td style="text-align: center;">X</td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">X</td> <td></td> <td style="text-align: center;">Pedidos cargados en los camiones (P)</td> <td style="text-align: center;">Operario de preparación de pedidos</td> </tr> <tr> <td>Los diferentes pedidos son trasladados del guaje de despacho a la zona de cargue del camión utilizando una el montacargas</td> <td></td> <td style="text-align: center;">X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Actividades	Diagrama de procesos				Salida (información o producto)	Cliente (proceso)	Responsable	Operación	Transporte	Espera	Inspección	Almacenamiento	Una vez los pedidos de los clientes están completos en el guaje de despacho, se procede a adjuntar su factura y verificar que estos contengan las referencias y cantidades correctas. En caso, de existir problemas se realizan los ajustes necesarios.	X			X		Pedidos cargados en los camiones (P)	Operario de preparación de pedidos	Los diferentes pedidos son trasladados del guaje de despacho a la zona de cargue del camión utilizando una el montacargas		X					
Actividades	Diagrama de procesos				Salida (información o producto)	Cliente (proceso)				Responsable																				
	Operación	Transporte	Espera	Inspección			Almacenamiento																							
Una vez los pedidos de los clientes están completos en el guaje de despacho, se procede a adjuntar su factura y verificar que estos contengan las referencias y cantidades correctas. En caso, de existir problemas se realizan los ajustes necesarios.	X			X		Pedidos cargados en los camiones (P)	Operario de preparación de pedidos																							
Los diferentes pedidos son trasladados del guaje de despacho a la zona de cargue del camión utilizando una el montacargas		X																												
<b>Preparación de pedidos</b>	<p>Durante el traslado de los pedidos estos son pasados por el portal de antenas de RFID, I o cual, permite actualizar los niveles de inventarios, controlar que los colchones a despachar sean los preparados, entre otros aspectos</p> <p>Se realiza el cargue de los vehículos por parte de los auxiliares de cada uno de los camiones. Se debe indicar, que previo al cargue, se verifica que el camión cumpla con las condiciones de limpieza y técnicas para la distribución</p> <p>Una vez pedidos están cargados en los vehículos, el despachador registra en un formato electrónico la cantidad de productos a enviados, los clientes y los datos de los camiones.</p>																													
<b>Plan de despacho (I)</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Actualización de inventario de producto terminado y registro de transacciones (I)</th> <th style="text-align: center;">Clientes</th> <th style="text-align: center;">Auxiliares de cada camión</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">X</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Actualización de inventario de producto terminado y registro de transacciones (I)	Clientes	Auxiliares de cada camión	X																									
Actualización de inventario de producto terminado y registro de transacciones (I)	Clientes	Auxiliares de cada camión																												
X																														

**DESPACHO**

Objetivo	Realizar el despacho de pedidos cumpliendo los procedimientos de la organización y requerimiento de los clientes, con el fin de satisfacer sus necesidades	Responsable de la Operación	Jefe de despacho
Alcance	Cubre desde que el producto está en el guaje de despacho hasta el cargue, e inicio de la distribución		
	<b>Recursos utilizados</b>	<b>Indicadores</b>	
	Montacarga	Cantidad de pedidos despachados	
	Aplicativo de administración de almacenes	% de capacidad de utilizada de los camiones	
	Lectora de código de barras	% y cantidad de pedidos sin despachar por no tener disponibilidad de camiones	
	Guajes de despacho	Tiempo promedio de cargue de los medios de transporte	
	Camiones	% Utilización de operarios y montacarga	
	Operarios de preparación de pedidos y auxiliares de camiones	% de devoluciones y errores en el despacho	

**Figura 2. Caracterización de la operación de despacho en empresa de cárnicos**

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. Análisis estadístico de la metodología de superficie de respuesta en el despacho

A continuación, se utiliza la metodología de superficie de respuesta para determinar la combinación de los niveles de los factores que optimizan el tiempo promedio de cargue de camiones en los puertos de despacho del centro de distribución de productos cárnicos. Esta metodología incluye: plantear la estructura de los datos del diseño, determinar factores que tienen efecto significativo sobre la variable respuesta a través del diseño factorial  $2^k$ , determinar el modelo de regresión ajustado, obtención de trayectoria a través de la longitud de paso

con unidades codificadas y reales, y punto candidato al óptimo para minimizar el tiempo de cargue en el despacho.

- La estructura de datos: Inicialmente se busca determinar por medio de un diseño  $2^4$  con dos réplicas cuales de los 4 factores de interés en el análisis de la operación de cargue con montacarga tiene un efecto en su tiempo promedio (tabla 2). La recolección de los tiempos, se realizó a través de un estudio a la operación de cargue, realizado al azar en diferentes cargues ejecutados en el despacho de la empresa.

**Tabla 2. Estructura del diseño  $2^4$  base para aplicar la metodología de superficie de respuesta y datos obtenidos**

Tratamiento	A	B	C	D	Tiempo promedio de cargue (min)	
					1	2
(1)	-	-	-	-	6.8	6.3
A	+	-	-	-	6.9	6.6
b	-	+	-	-	6.4	5.8
ab	+	+	-	-	6.6	6.6
c	-	-	+	-	6.8	6.5
ac	+	-	+	-	8.7	7.3
bc	-	+	+	-	6.7	6.4
abc	+	+	+	-	7.8	7.1
d	-	-	-	+	5.5	5.3
ad	+	-	-	+	5.8	5.4
bd	-	+	-	+	5.8	5.3
abd	+	+	-	+	5.5	5.4
cd	-	-	+	+	6.1	6.0
acd	+	-	+	+	6.6	6.2
bcd	-	+	+	+	6.6	5.6
abcd	+	+	+	+	6.7	6.3

Fuente: Elaboración propia

- Hipótesis de interés a probar: se busca probar si los efectos de los factores velocidad del montacarga (A), configuración de montacargas (B), código de barras (C) y calificación del operario (D)

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$$

$$\alpha_i \neq 0 \text{ para algún } i$$

- Efectos de los factores principales y la tabla de ANOVA del diseño 2<sup>k</sup>. Esta ANOVA fue obtenida usando el software estadístico Minitab 15® que permite probar cuáles de los factores tienen efecto significativo sobre el tiempo promedio de cargue. Como criterio de aceptación o rechazo de la hipótesis se utiliza un valor p que se compara con una significancia de  $\alpha=0.05$  (tabla 3). De otra parte, se validaron los supuestos de normalidad a través de Shapiro Wilks, varianza constante con Barlett e independencia de las

corridas con Minitab 15®, los cuales se cumplen.

A partir de la estimación de efectos de los factores y la ANOVA (tabla 3), se identifica que los factores procedimiento, equipo de código de barras y experiencia del operario tienen efecto significativo sobre el tiempo promedio de cargue.

El modelo de regresión ajustado considera solo los factores significativos, que en este caso son la velocidad del montacargas (A) y calificación de la experiencia del operario (D), que equivalen a X<sub>1</sub> y X<sub>4</sub> en el modelo.

$$\hat{y} = 6.35 + 0.475X_1 - 0.2375X_4$$

Aquí, A es X<sub>1</sub> y D es X<sub>4</sub>. El R<sup>2</sup> ajustado hallado es de 71.69%; indica que se tiene un modelo que explica de manera satisfactoria la variación en  $\hat{y}$ .

**Tabla 3. ANOVA para probar factores de interés**

Termino	Efecto	Coeficiente	Coef de EE	T	P
<b>Constante</b>		6.3563	0.07071	89.89	0.000
<b>A</b>	0.4750	0.2375	0.07071	3.36	0.004
<b>B</b>	-0.1375	-0.00687	0.07071	-0.97	0.345
<b>C</b>	0.7125	0.3563	0.07071	5.04	0.000
<b>D</b>	-0.9500	-0.4750	0.07071	-6.72	0.000

Fuente	GL	SC sec	SC ajust.	MC Ajust.	F
Efectos principales	4	13.2375	13.2375	3.30937	20.68
2-Interacciones de (No.) Factores	6	1.4425	1.4425	0.24042	1.50
3-Interacciones de (No.) Factores	4	0.1275	0.1275	0.03187	0.20
4-Interacciones de (No.) Factores	1	0.1513	0.1513	0.15125	0.95
Error	16	2.5600	2.5600	0.16000	
Total	31	17.5187			
S=0.4		PRESS= 10.24			
Rcuad=85.39%		R-cuad (pred.)=41.55%	Rcuad. (ajustado)=71.69%		

Fuente: Elaboración propia, Minitab 15®

Con este modelo ajustado y con los factores significativos se procede a definir la dirección óptima del movimiento del diseño a partir de su centro. En este caso, los factores que se identificaron que no tenían efecto sobre el tiempo promedio de cargue se fijan en su nivel de menor costo. Adicionalmente, se debe considerar que los signos de los coeficientes del modelo indican si se debe incrementar o disminuir para llevar a un mejor valor la respuesta.

Se utilizan pasos unitarios que permiten moverse en el factor en estudio a intervalos a un medio de su rango en unidades originales. Es decir, por un incremento de unidades de 0.475 en el factor  $X_1$ , se produce un decremento de 0.237 del factor  $X_4$ .

Por estos motivos, una unidad codificada del factor  $X_1$  es:

$(2.5-2)/2=0.25$ , es decir  $\Delta X_1=1$  y en unidades originales  $\Delta Z_1=0.25$

De otra parte, el paso codificado para el factor  $X_1$  se calcula como su coeficiente, dividido el factor base  $X_4$  y su incremento  $\Delta X_4$ , es decir, su valor es:

$\Delta X_4=(-0.2375)/(0.475)=-0.5$  en unidades codificadas, y  $\Delta Z_4=0.25$  calificación

A partir de las unidades codificadas y reales, se construye la tabla de escalamiento ascendente (tabla 4).

**Tabla 4. Escalamiento ascendente tiempo promedio de cargue de camiones**

Centro de longitud de paso	Códigos		Niveles reales		Tiempo promedio de cargue (Y) (min)
	$X_1$	$X_4$	$Z_1$	$Z_4$	
	0	0	2.25	4	
	1	-0.25	0.25	-0.25	
Paso 1	1	-0.50	2.50	3.75	6.8
Paso 2	2	-0.75	2.75	20	6.7
Paso 3	3	-1.0	3.00	3.25	6.5
Paso 4	4	-1.25	3.25	3.00	6.8

Fuente: Elaboración propia

Con los códigos y niveles reales obtenidos (tabla 4), se hacen las corridas con las cuales se obtienen los tiempos promedios de cargue de los camiones. Adicionalmente, a partir de las corridas, se identifica que el tiempo mínimo identificado de carga de los camiones es de 6.5 minutos, con una velocidad (A) de 3.00 km/hora y un operario calificado (D) en 3.25. Inclusive, este punto puede ser considerado el nuevo centro de experimentación, ya que has-

ta este el tiempo promedio deja de descender. Con los datos obtenidos se ajusta el modelo de primer orden alrededor del punto velocidad de montacargas de 3.00 km/hora y calificación del operario de 3.25, con una región de exploración de 2.75 y 3.25 para la velocidad del montacargas y 3.00 y 20 la calificación del operario. A continuación, se presentan los datos del modelo de segundo orden (tabla 5)

**Tabla 5. Datos para el segundo modelo de primer orden**

Variables naturales		Variables codificadas		Tiempo promedio de cargue (Y) en min
Vel. Mont. (A)	Calif. operario (B)	X <sub>1</sub>	X <sub>4</sub>	
2.75	3.00	-1	-1	6.58
3.25	3.00	1	-1	6.70
2.75	20	-1	1	6.55
3.25	20	1	1	6.60
3.00	3.25	0	0	6.50
3.00	3.25	0	0	6.48
3.00	3.25	0	0	6.45
3.00	3.25	0	0	6.51
3.00	3.25	0	0	6.50

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos del experimento de 2 factores, se desarrolla su ANOVA apoyándose en el paquete estadístico Minitab 15 (tabla 6).

A partir de la ANOVA (tabla 6) del segundo modelo, se identifica que el valor p de la curvatura es de 0.001, que es menor a la significancia del 5%, por lo cual se puede concluir estadísticamente que existe curvatura y un modelo de primer

orden no es una buena aproximación, por lo cual, puede ser apropiado utilizar un modelo de segundo orden.

Como se tiene un modelo de segundo orden con curvatura, a continuación, se presenta un análisis canónico para encontrar el punto estacionario que minimice el tiempo promedio de cargue de los camiones en el centro de distribución de productos cárnicos.

**Tabla 6. Anova con factores velocidad (B) y Operario (D) del montacarga**

Fuente	GL	SC sec	SC ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	2	0.011450	0.011450	0.057250	8.17	0.027
Curvatura	1	0.031734	0.031734	0.0317339	45.27	0.001
Error Residual	5	0.003505	0.03505	0.0007010		
Falta de Ajuste	1	0.001225	0.001225	0.0012250	2.15	0.217
Error Puro	4	0.002280	0.002280	0.0005700		
Total	8	0.046689				

Fuente: Elaboración propia

Un modelo de segundo orden se ajusta mediante mínimos cuadrados usando los datos codificados:

$$\hat{Y} = 23.29 - 6.14X_1 - 4.73X_4 + 1.22X_1^2 + 0.82X_4^2 - 4.73X_1X_4$$

A continuación, se presenta el análisis de varianza para este modelo de segundo orden (tabla 7)

De la ANOVA (tabla 7), se identifica que los coeficientes de la regresión lineal y cuadrada son significativos, ya que su valor p es menor a la significancia de 0.05. Además, se observa

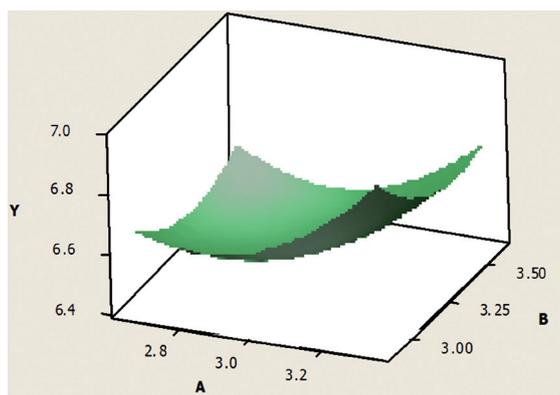
que existe falta de ajuste, por lo cual, alguno o ambos términos cuadráticos puros influyen sobre el tiempo promedio de cargue de camiones. De otra parte, se halla que el valor del R<sup>2</sup> ajustado es de 82.18%, lo cual, lleva a concluir que el modelo es adecuado.

A continuación, se caracteriza la superficie de respuesta (figura 2) y gráfica de contorno (figura 3), las cuales permiten establecer dónde se encuentra el punto óptimo.

**Tabla 7. Análisis ANOVA para el modelo de segundo orden**

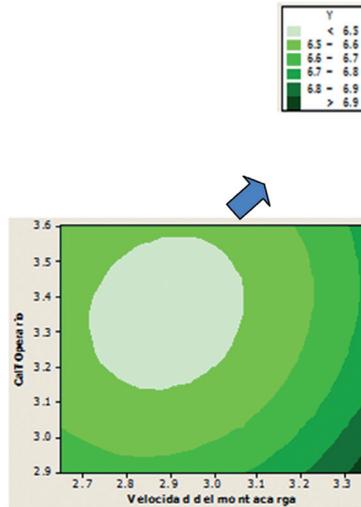
Fuente	GL	SC sec	SC ajust.	MC Ajust.	F	P
Regresión	5	0.119783	0.119783	0.023957	12.07	0.002
Lineal	2	0.065449	0.065449	0.032724	16.49	0.002
Cuadrado	2	0.053109	0.053109	0.026555	13.38	0.004
Interacción	1	0.001225	0.001225	0.001225	0.62	0.458
Error residual	7	0.013894	0.013894	0.001985		
Falta de Ajuste	3	0.11614	0.11614	0.003871	6.79	0.048
Error Puro	4	0.002280	0.002280	0.000570		
Total	12	0.133677				

Fuente: Elaboración propia, Minitab 15®



**Figura 3. Superficie de respuesta para el tiempo promedio de cargue de camiones**

Fuente: Elaboración propia, Minitab 15®



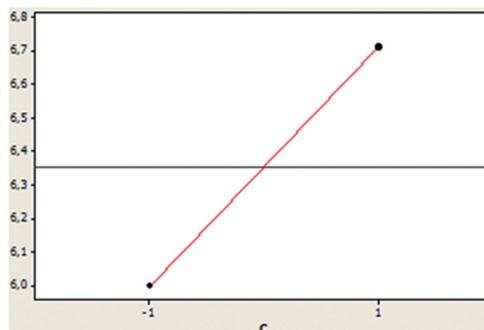
**Figura 4. Contorno del tiempo promedio de cargue frente a velocidad de montacarga y calificación del operario**

Fuente: Elaboración propia, Minitab 15®

A partir de la representación de la superficie de respuesta (figura 2) y el contorno (figura 3), se identifica que el punto que minimiza el tiempo promedio de cargue de camiones es una velocidad del montacargas de 2.9 km/hora y una experiencia del operario calificada en aproximadamente 3.4.

Finalmente, se debe analizar en qué nivel se debe fijar el factor tipo de equipo de código de barras (C), ya que su efecto principal es el único significativo sobre el tiempo promedio de cargue. Se debe resaltar que este factor no se

incluyó en la metodología de optimización por superficie de respuesta ya que sus niveles no son variables cuantitativas sino cualitativas. A partir del análisis del gráfico de efectos principales correspondiente al factor en análisis (figura 4), se sugiere que la empresa establezca una estrategia de lectura de código de barras de cada una de las estibas a despachar (figura 5), asociada a los pedidos (-1), en vez de leer el total del lote a despachar en el medio de transporte (+1), ya que la primera estrategia permite reducir el tiempo promedio del cargue a 6 minutos, aproximadamente.



**Figura 5. Efecto principal equipo de código de barras medido en el tiempo promedio de carga**

Fuente: Elaboración propia, Minitab 15®

## Discusión

Una vez realizado el análisis estadístico de la actividad del cargue en la operación de despacho en el CEDI de la empresa de cárnicos, se puede indicar que los factores, la velocidad del montacarga (A), tipo de lectura código de barras para identificar y capturar los productos a despachar (C) y calificación del operario (D) tienen un efecto significativo en el tiempo promedio del cargue medido en minutos como se demostró estadísticamente. En cuanto al tipo de configuración o accesorios del montacarga (B) se identifica que este no tiene efecto significativo sobre el tiempo promedio, por lo cual, la empresa debe seleccionar el más económico para contribuir a la eficiencia desde la perspectiva de los costos de operación en el CEDI.

En cuanto al punto óptimo de operación de despacho para minimizar el tiempo promedio de cargue a aproximadamente 6.5 minutos (figuras 2 y 3) se debe garantizar que los montacargas operen a una velocidad de 2.9 Km/hora, y el operario que lo maneje tenga una calificación de experiencia y competencias de 3, la cual garantiza un perfil adecuado e intermedio entre un novato y un experto. Además, se debe garantizar un continuo monitoreo al desempeño al operario y un plan de formación basado en competencias que garantice que este contribuya a la eficiencia del cargue de los camiones.

De otra parte, se determina por medio de un análisis de la gráfica del efecto principal del factor equipo de código de barras (C) (figura 4), que el nivel que debe ser elegido es la lectura e identificación de productos a cargar por lote, ya que este contribuye a reducir el tiempo promedio de cargue de camiones en el centro de distribución. Adicionalmente, se debe considerar que esta decisión es complementaria a la decisión de optimización tomada con anterioridad.

Finalmente, con las mejoras planteadas se reduce el tiempo promedio de carga de los camiones de 2 toneladas en un 45%, que en tiempo es pasar de 10 minutos a 6.5 minutos aproximadamente garantizando un enfoque de eficiencia en el uso de los recursos bajo un enfoque estadístico que garantiza la validez de los resultados.

## Conclusiones

A partir de la revisión del estado del arte y la contextualización teórica que soporta el artículo, se puede indicar que la operación de despacho es crítica para que el CEDI funcione con eficacia y eficiencia, y contribuya adecuadamente al desarrollo del proceso logístico de transporte y distribución. Además, se puede concluir que para contribuir al adecuado diseño y mejoramiento de la operación de despacho se pueden utilizar diferentes técnicas cuantitativas como la simulación discreta y el diseño de experimentos.

La metodología desarrollada para apoyar el mejoramiento del cargue en el despacho basado en la técnica estadística de optimización con el uso de superficies de respuesta no solo permitió disminuir el tiempo promedio de cargue de 10 a 6.5 minutos aproximadamente, sino también mejorar la estrategia de utilización del sistema de código barras y el montacargas respecto a condiciones de manejo y calificación del operario que lo manipula. Por estos motivos, la metodología desarrollada se enfoca en la reducción de tiempo del cargue en la operación de despacho, contribución a la agilidad del proceso de transporte y orientación a la satisfacción de las necesidades de los clientes.

Finalmente, como trabajo futuro se puede mejorar la metodología propuesta desarrollando una estrategia que permita su uso conjunto con la simulación discreta que permita estudiar y analizar diferentes escenarios del cargue en el despacho sin necesidad de experimentación con la operación real sino con un modelo computacional válido, que inclusive permita desarrollar animaciones en 3D, lo cual se puede convertir en un enfoque innovador que contribuya a la eficiencia de la operación y la satisfacción de las necesidades de los clientes.

## Referencias bibliográficas

1. GU, Jinxiang; GOETSCHALCKX, Marc, y MCGINNIS, Leon. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. *En: European Journal of Operational Research*. July 2010. Vol. 203, N° 3, p. 539-549.

2. BAKER, Peter y HALIM, Zaheed. An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues. En: Supply Chain Management: An International Journal. January 2007. Vol.12, N° 2, p. 129-138.
3. BAKER, Peter. Aligning Distribution Center Operations to Supply Chain Strategy. En: The International Journal of Logistics Management. July 2006. Vol. 15, N° 1, p. 111-123.
4. FRAZELLE, Edward. Supply chain strategy: the logistics of supply chain management. The United States: McGraw-Hill Professional, 2002. 10 p.
5. MIN, Hokey. Application of a decision support system to strategic warehousing decisions. En: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. March 2009. Vol.39, N° 4, p. 270-281.
6. RUSHTON, Alan; CROUCHER, Phil y BAKER, Peter. The Handbook of Logistics and Distribution Management. The United Kingdom: Kogan Page Publishers, 2010. 325 p.
7. CORREA, Alexander y GÓMEZ, Rodrigo. Gestión de almacenes y tecnologías de información y comunicaciones (TIC). En: Estudios Gerenciales. Oct-Dic 2009. Vol. 26, N° 117, p. 145-171.
8. VAN DEN BERG, Jeroen y ZIJM, W. H. Models for warehouse management: Classification and examples. En: International Journal of Production Economics. December 1999. Vol. 59, N° 1, p. 519-528.
9. GAGLIARDI, Jean; RENAUD, Jacques y RUIZ, Ángel. A simulation model to improve warehouse operations. En: Simulation Conference 2007 winter, p. 2012-2018.
10. BUIL, Roman y PIERA, Miguel Angel. Warehouse redesign to satisfy tight supply chain management constraints. En: WSEAS Trans. Info. Sci. and App. 2008, Vol. 5, N° 3, p. 286-291.
11. CHIANG, Wen-Chyuan; *et al.* A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems. En: International Journal of Production Economics, 2009, Vol.121, N° 2, p. 752-767.
12. POTTER, Andrew; YANG, Biao y LALWANI, Chandra. A simulation study of despatch bay performance in the steel processing industry. En: European Journal of Operational Research. Jun 2007. Vol.179, N° 2, p. 567-578.
13. WANG, Bin y TANG, Guochun. Stochastic Optimization Model for Container Shipping of Sea Carriage. En: Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. Jun 2010. Vol. 10, N° 3, p. 58-63.
14. POTTER, Andrew y LALWANI, Chandra. Developing a methodology to analyse despatch bay performance. En: International Journal of Production Economics. Mar 2007. Vol.106, N° 1, p. 82-91.
15. EKREN, Banu; HERAGU, Sunderesh; KRISHNAMURTHY, Ananth y MALMBORG, Charles. Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS. En: Computers & Industrial Engineering, 2010, Vol. 58, N° 1, p. 175-185.
16. GÓMEZ, Rodrigo y CORREA, Alexander. En: Revista Lasallista de Investigación. July 2011. Vol. 8, N° 1, p. 68-81.
17. GUTIÉRREZ Humberto y DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. México: McGraw-Hill, 2008. 384 p.
18. MONTGOMERY, Douglas. Design and analysis of experiments. 7 ed. The United States: Wiley, 2008. 680 p.
19. WANG, Jianlong y WAN, Wei. Optimization of fermentative hydrogen production process by response surface methodology. En: International Journal of Hydrogen Energy. Dic 2008, Vol. 33, N° 23, p. 6976-6984.
20. PÉREZ, José. Gestión por procesos. España: ESIC. 2009. 32 p.
21. HACKMAN, Steven; *et al.* Benchmarking Warehousing and Distribution Operations: An Input-Output Approach. En: Journal of Productivity Analysis. 2001. Vol. 16, N°1, p. 79-100.