

# OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN UNA CADENA DE SUMINISTRO

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION MODEL  
FOR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO NUMACORRENTE DE FORNECIMENTO

Recibido: 16/06/14

Aprobado: 7/07/14

## **Adel Alfonso Mendoza Mendoza**

Profesor de la Universidad del Atlántico. Programa de Ingeniería Industrial.  
Barranquilla, Colombia. M.Sc en Ingeniería Industrial.  
Correo electrónico: [adelmendoza@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:adelmendoza@mail.uniatlantico.edu.co)

## **Tomás José Fontalvo Herrera**

Jefe de Departamento de organización industrial, Profesor de tiempo completo,  
Universidad de Cartagena. Programa de Administración Industrial. Cartagena,  
Colombia. PhD. en Administración de Empresas.  
Correo electrónico: [tfontalvoh@unicartagena.edu.co](mailto:tfontalvoh@unicartagena.edu.co)

## **Delimiro Alberto Visbal Cadavid**

Profesor de la Universidad del Magdalena. Programa de Ingeniería Industrial. Santa  
Marta, Colombia. M.Sc en Ingeniería Industrial.  
Correo electrónico: [dvisbal@unimagdalena.edu.co](mailto:dvisbal@unimagdalena.edu.co)

## OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN UNA CADENA DE SUMINISTRO

### Palabras clave

Cadena de suministro, optimización multiobjetivo,  
tiempo de entrega.

### Resumen

En este artículo se presenta un modelo matemático de optimización multiobjetivo de una cadena de suministro global. En el modelo propuesto se consideran las capacidades de abastecimiento de los proveedores, de producción y de distribución. Para el análisis se incluyen en las diferentes funciones objetivo, los costos de inversión, los costos de materia prima, los costos de producción, así como también el *Lead Time* en toda la cadena. Se muestra un caso de aplicación del modelo con tres proveedores, tres plantas de producción, tres centros de distribución, tres mercados de consumo, dos tipos de materia prima y dos clases de transporte. La solución del modelo emplea un algoritmo evolutivo y para evaluar su eficiencia se compara con resultados obtenidos de optimización individual de cada una de las funciones objetivo.

Clasificación JEL: C02, C44, C61

## MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION MODEL FOR SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

### Key words

Supply chain, multi-objective optimization,  
lead time.

### Abstract

This paper presents a mathematical model of multi-objective optimization for a global supply chain network. The proposed model considers the capabilities of the suppliers supply, production and distribution. The different objective functions' analysis includes investment costs, raw material costs, production costs as well as the *Lead time* in the entire chain. The application of the mathematical model takes into consideration three suppliers, three production plants, three distribution centers, three consumer markets, two types of raw materials and two types of transportation. The solution uses an evolutionary algorithm and, its efficiency is assessed when comparing results obtained for the individual optimization of each objective functions.

## OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO NUMACORRENTE DE FORNECIMENTO

### Palavras chave

Corrente de fornecimento, otimização  
multiobjetivo, tempo de entrega

### Resumo

Neste artigo se apresenta um modelo matemático de otimização multiobjetivo de uma corrente de fornecimento global. No modelo proposto se consideram as capacidades de abastecimento dos fornecedores, de produção e de distribuição. Para a análise se incluem nas diferentes funções objetivos os custos de investimento, custos de matéria prima, custos de produção bem como também o lead time em toda a corrente. Mostra-se um caso de aplicação do modelo com três fornecedores, três plantas de produção, três centros de distribuição, três mercados de consumo, dois tipos de matéria prima e duas classes de transporte. A solução do modelo emprega um algoritmo evolutivo e para avaliar sua eficiência se compara com resultados obtidos de otimização individual de cada uma das funções objetivos.

## Introducción

El concepto de la cadena de suministro surge para proporcionar soluciones al problema de la duplicación de esfuerzos y la capacidad de respuesta de las compañías (Larsen *et al.*, 2007), por lo cual la gestión de la cadena de suministro ha generado mucho interés en los últimos años.

Factores como la globalización han marcado una pauta importante en el desarrollo, la evolución de los estudios y la aplicación de la cadena de suministro, pues cada día se exige más a las empresas crear relaciones estrechas entre estas y sus proveedores, sobre todo si se tiene en cuenta que los costos derivados de una mala coordinación pueden ser extremadamente altos. Como resultado de esta globalización del comercio internacional, los factores de producción de abastecimiento y de consumo de los destinos de todo el mundo está aumentando la interdependencia entre productores y mayoristas de cadenas de suministro internacionales (Janvier, 2012). Por lo que esta naturaleza dinámica requiere que los gerentes de las compañías deban adaptar sus estrategias de la cadena de suministro con el fin de seguir siendo competitivas (Purí, 2009).

En una cadena de suministro los proveedores de bienes y servicios influyen de manera significativa en las operaciones y costos, como también los operadores logísticos así mismo los centros de distribución intervienen para hacer de la cadena de suministro un proceso que cumpla a cabalidad con las exigencias del mercado, por lo cual la creación de modelos de cadena de suministro que permitan una minimización tanto de los costos de producción y como de los tiempos entre el inicio del proceso hasta su entrega final, representa la solución para las empresas que buscan sacarle el máximo provecho a las alianzas entre los actores de la cadena. Es importante mencionar también que el tiempo entre la generación de las órdenes de pedido y la entrega final de los productos puede ser una gran razón de pérdida de clientes. Las ventajas que ofrece esta disminución de los

tiempos de la cadena de suministro son enormes si se tiene en cuenta que la oportunidad en la entrega de los pedidos representa ventajas frente a la competencia.

Las diferentes situaciones que se presentan en las compañías, generalmente son del tipo multiobjetivo, una decisión muchas veces se toma teniendo en cuenta múltiples criterios, razón por la que es de gran interés el desarrollo de herramientas que reflejen las necesidades industriales y que puedan entregar soluciones en un tiempo prudente (Baesler *et al.*, 2008).

Por lo anterior, en esta investigación se analiza la interacción eficiente entre los diferentes actores de la cadena de suministro para desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo, que permita visionar los diferentes eslabones de la cadena, como una herramienta para garantizar la disminución del tiempo y los costos en la compañía.

## Marco teórico

### Gestión de la cadena de suministro

El concepto de trabajar con proveedores y clientes es tan antiguo como el comercio mismo, pero la idea moderna de una "cadena de suministro" es bastante reciente. En algún momento de principios de los años 80, los conceptos de transporte, distribución y gestión de materiales comenzaron a unirse en un solo término: la gestión de la cadena de suministro. El término apareció por primera vez, aparentemente en forma impresa en 1982, y se atribuye a Keith Oliver (Blanchard, 2010). Hoy en día no solo la efectividad de las plantas de producción acarrea ventaja competitiva para la empresa, sino también la unión de todos los actores que influyen en el proceso hasta la entrega final del producto, porque una cadena de suministro comienza con los proveedores y finaliza con el consumo del producto por parte del cliente.

Según Janvier (2012), la noción de gestión de la cadena de suministro tal como se utiliza en la investigación de varios autores está relacionada con la globalización de la producción y la inclinación por los fabricantes para abastecerse de insumos alrededor del mundo, lo que requiere la gestión de forma eficiente de la regulación de los flujos globales de las entradas o salidas. Capó Vicedo *et al.*, (2007) consideran que la gestión de la cadena de suministro no es otra cosa que el sistema de gestión que establece y controla como tal toda la cadena de suministro de una compañía. Este sistema no debe ser el tradicional y autoritario, sino que debe ser un sistema que contemple a todos los componentes de la cadena en toda su magnitud y gestione la misma en todo su conjunto, consiguiendo así la integración de todos los componentes de la misma. Así mismo, Alfalla y Médina (2009) mencionan que una eficiente gestión de la cadena de suministro es un factor clave para que las compañías logren alcanzar altos niveles de competitividad mediante la integración de todos los actores de la cadena de suministro.

Las cadenas de suministro suelen ser de alta complejidad, debido a la gran cantidad de datos, variables de decisión, interrelaciones complejas entre las variables y las limitaciones del sistema pueden llegar a presentar muchos desafíos para la gestión de tomar decisiones empresariales sólidas. (Manuj y Sahin, 2009) razón por la cual en este artículo se desarrolla un modelo matemático de optimización multiobjetivo que responda a la solución de este tipo de problemas como una herramienta de gestión de cadena de suministro.

## Optimización multiobjetivo

Para el análisis de las variables asociadas a la cadena de suministro se utiliza en este trabajo la optimización multiobjetivo. Para la solución de un problema mediante esta técnica se requiere emplear simultáneamente un número de objetivos que presentan diferentes soluciones óptimas individuales, donde un objetivo no puede ser mejorado sin la degradación de otro.

Los problemas de optimización multiobjetivo son problemas que presentan dos o más funciones objetivo. A diferencia con los problemas mono-objetivo, que pueden alcanzar la solución óptima, los multiobjetivo no tienen solución óptima, debido que no existe una solución que sea la mejor respecto a todos los objetivos e incluso pueden existir conflictos entre los objetivos. Una solución puede ser mejor en un objetivo, pero peor en otros. (Pradenas y Matamala, 2012).

Los problemas de optimización multiobjetivo, a diferencia de los de optimización mono-objetivo, son problemas que presentan dos o más funciones objetivo, incluyen un conjunto de  $k$  funciones objetivo, un conjunto de  $m$  restricciones y un conjunto de  $n$  variables de decisión (Marler y Arora, 2004). Las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las variables de decisión. Mientras que en los problemas de optimización mono-objetivo se busca encontrar un vector de decisión  $n$  dimensional que optimice una función, en la optimización multiobjetivo se intenta encontrar un vector que optimice una función vectorial, cuyos elementos representan las distintas funciones objetivo (Vargas y Montoya, 2008).

## Modelo de cadena de suministro para minimización de costos y reducción del *lead time*

En este trabajo de investigación se diseñó un modelo matemático que permite estudiar las cadenas de suministro para minimizar los costos de producción y del *lead time* (LT), que se define como la variabilidad del tiempo que toma una orden desde se expide hasta que se recibe (Gutiérrez y Julio, 2008). De acuerdo con Nagar y Jain (2008), la planificación de una cadena de suministro se ocupa de la coordinación y la integración de todas las actividades clave del negocio llevadas a cabo por una empresa, desde la adquisición de materias primas hasta la distribución de los productos finales para el cliente. Por lo anterior, se propone un modelo

de cadena de suministro el cual se encuentra compuesto por varios tipos de materia prima, las cuales pueden ser suministradas por varios tipos de proveedores diferentes, y estos pueden o no encontrarse en el país de producción. Así mismo, el modelo planteado consta de varias plantas de procesamiento de producto, varios centros de distribución y finalmente varios mercados, los cuales, al igual que los proveedores, pueden encontrarse en el mismo o en diferentes países, como se muestra en la Figura 1. Para el transporte de materia prima y de productos desde los diferentes eslabones de la cadena, se establecen varios tipos de transporte.

## Desarrollo del modelo matemático

Se propone el siguiente modelo matemático para darle solución al problema de la cadena de suministro multiobjetivo que permite minimizar los costos y reducir la variabilidad del tiempo que toma una orden (*lead time*)

### NOTACIÓN DEL MODELO

Subíndices

**a:** Proveedores

**b:** Plantas de producción

**c:** Centros de distribución

**d:** Mercados

**e:** Productos

**f:** Materias primas

**g:** Tipo de transporte

### Variables Binarias

$Y_{be}$ : Se define 1 si se abre una planta **b** para producir el producto **e**

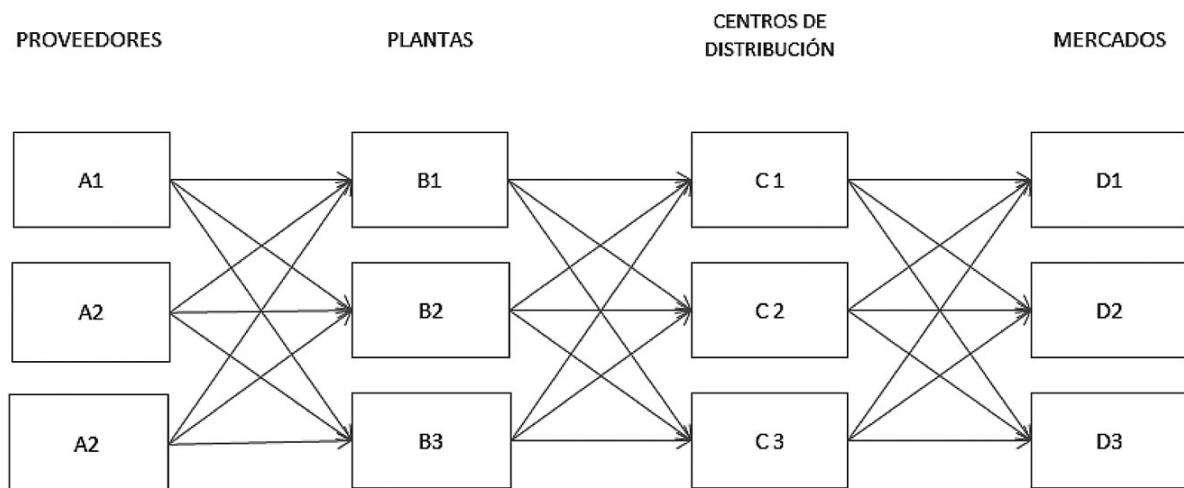
$Y_{ce}$ : Se define 1 si se abre un centro de distribución **c** para almacenar el producto **e**

$Z^1_{fabg}$ : Se define 1 si utiliza el transporte **g** desde proveedor **a** hasta la planta **b**

$Z^2_{ebcg}$ : Se define 1 si se utiliza el transporte **g** desde la planta **b** hasta centro de distribución **c**

$Z^3_{ecdg}$ : Se define 1 si se utiliza el transporte **g** desde el centro de distribución **c** hasta el mercado **d**

**Figura 1.** Diagrama de la cadena de suministro.



Fuente: Elaboración propia

### Variables

- $X_{abfe}$ : Es la cantidad de materia prima  $f$  abastecida para producir  $e$  desde el proveedor  $a$  hasta la planta  $b$
- $X_{af}^T$ : Cantidad total de materia prima  $f$  del proveedor  $a$
- $W_{fe}$ : Cantidad de materia prima  $f$  necesaria para producir el producto  $e$
- $O_{be}^T$ : Es la cantidad total de producto  $e$  producido en la planta  $b$
- $O_{bce}$ : Es la cantidad de producto  $e$  producido en la planta  $b$  para el centro de distribución  $c$
- $S_{ce}$ : Cantidad de producto  $e$  almacenado en centro de distribución  $c$
- $S_{cde}$ : Cantidad de producto  $e$  despachado de centro distribución  $c$  al mercado  $d$
- $S_{ce}^T$ : Cantidad total de producto  $e$  despachado desde el centro de distribución  $c$
- $N_b$ : Número de plantas a instalar
- $N_c$ : Número de centros de distribución a instalar
- $N_d$ : Número de mercados atendidos
- $LT_b$ : *Lead Time* de planta  $b$
- $LT_c$ : *Lead Time* de centro de distribución  $c$
- $LT_d$ : *Lead Time* de mercado  $d$

### Costos

- $C_{abfe}$ : Costo unitario de materia prima  $f$  abastecida para producir  $e$  desde el proveedor  $a$  hasta la planta  $b$
- $T_{abfe}$ : Costo transporte unitario de materia prima  $f$  abastecida para producir  $e$  desde el proveedor  $a$  hasta la planta  $b$
- $T_{bce}^1$ : Costo transporte unitario de producto  $e$  desde la planta  $b$  hasta centro de distribución  $c$
- $P_{be}$ : Costo de producción del producto  $e$  en la planta  $b$
- $I_{be}$ : Costos de inversión o apertura para planta  $b$  para producir el producto  $e$
- $F_{be}$ : Costos fijos de la planta  $b$  para producir el producto  $e$
- $A_{ce}$ : Costo de almacenamiento del producto  $e$  en centro de distribución  $c$
- $I_{ce}^1$ : Costos de inversión o apertura para centro de distribución  $c$  para almacenar el producto  $e$

- $F_{ce}^1$ : Costos fijos del centro de distribución  $c$  para almacenar el producto  $e$
- $T_{cde}^2$ : Costo transporte unitario de producto  $e$  desde centro de distribución  $c$  hasta el mercado  $d$

### Parámetros

- $K_{fa}^1$ : Es la capacidad del proveedor  $a$  para abastecer la materia prima  $f$
- $K_{be}^2$ : Es la capacidad de la planta  $b$  para producir el producto  $e$
- $K_{ce}^3$ : Es la capacidad de almacenar en el centro de distribución del producto  $e$
- $U_{de}$ : Cantidad de producto  $e$  necesaria para abastecer el mercado  $d$
- $R_{fa}^1$ : Tiempo de procesamiento de la materia prima  $f$  en el proveedor  $a$
- $R_{be}^2$ : Tiempo de procesamiento del producto  $e$  en la planta  $b$
- $R_{ce}^3$ : Tiempo de alistamiento del producto  $e$  en el centro de distribución  $c$
- $E_{fabg}^1$ : Tiempo de transportar la materia prima  $f$  desde el proveedor  $a$  hasta la planta  $b$  utilizando el tipo de transporte  $g$
- $E_{ebcg}^2$ : Tiempo de transportar el producto  $e$  desde la planta  $b$  hasta el centro de distribución  $c$  utilizando el tipo de transporte  $g$
- $E_{ecdg}^3$ : Tiempo de transportar el producto  $e$  desde el centro de distribución  $c$  hasta el mercado  $d$  utilizando el tipo de transporte  $g$

El modelo matemático propuesto en este trabajo considera varias funciones objetivo: función objetivo de los costos de instalación y operación de la cadena de suministro, funciones objetivos de los diferentes *Lead Time* de la cadena y funciones objetivo de la varianza de los *Lead Time*. El modelo descrito en forma general está dado por:

$$\text{Min } Z = \{F.O_1, F.O_2, F.O_3, F.O_4, F.O_5, F.O_6, F.O_7\}$$

s.a Restricciones técnicas

### Función objetivo de costos (F.O)

Esta función objetivo involucra los diferentes costos descritos así: el primer término los costos de materia prima, el segundo costos de producción, el tercero costos de transporte de materia prima, el cuarto los costos fijos y de inversión para operar la planta de producción, el quinto los costos de transporte del producto desde la planta al centro de distribución, el sexto el costo de almacenamiento del producto en el centro de distribución, el séptimo los costos fijos y de inversión para operar el centro de distribución y el último los costos de transporte del producto desde el centro de distribución hasta el mercado:

$$F.O_1 = \sum_a \sum_b \sum_f \sum_e X_{abfe} \times C_{abfe} + \sum_b \sum_e P_{bc} \times O_{be}^I + \sum_a \sum_b \sum_f \sum_e X_{abfe} \times T_{abfe} + \sum_b (I_{be} + F_{bc}) Y_{be}, \forall_e + \sum_b \sum_c \sum_e O_{bce} \times T_{bce}^I + \sum_c \sum_e A_{ce} \times S_{ce} + \sum_c (I_{ce}^1 + F_{ce}^1) Y_{ce}, \forall_e + \sum_c \sum_d \sum_e T_{cde}^2 \times S_{cde}$$

### Funciones objetivo de los Lead time (F.O<sub>2</sub>, F.O<sub>3</sub>, F.O<sub>4</sub>)

Estas funciones representan los diferentes Lead time de la cadena de suministro: Lead Time de Plantas (F.O<sub>2</sub>); Lead Time de Centros de Distribución (F.O<sub>3</sub>); Lead Time de los mercados (F.O<sub>4</sub>).

$$F.O_2 = \sum_b \sum_a \left[ \frac{X_{abfe}}{R_{af}^1} + \max(E_{afbg}^1 \times Z_{abg}^1) \right]; \forall_{b,e}$$

$$F.O_3 = \sum_c \sum_a \left[ \frac{O_{bce}}{R_{bc}^2} + \max(E_{bceg}^2 \times Z_{bce}^2) \right]; \forall_{c,e}$$

$$F.O_4 = \sum_d \sum_c \left[ \frac{S_{cde}}{R_{ce}^3} + \max(E_{cdeg}^3 \times Z_{cdg}^3) \right]; \forall_{d,e}$$

### Funciones objetivo de varianza de los Lead Time (F.O<sub>5</sub>, F.O<sub>6</sub>, F.O<sub>7</sub>)

Estas funciones representan la varianza, que es el cuadrado de la desviación estándar, de los diferentes Lead Time de la cadena de suministro: Varianza Lead Time de Plantas (F.O<sub>5</sub>); Varianza Lead Time de Centros de Distribución (F.O<sub>6</sub>); Varianza Lead Time de los mercados (F.O<sub>7</sub>).

$$F.O_5 = \text{var}(LT_b)$$

$$F.O_6 = \text{var}(LT_c)$$

$$F.O_7 = \text{var}(LT_d)$$

### Restricciones

Capacidad de los proveedores

$$\sum_b X_{abfe} = X_{af}^T; \forall_{a,f}$$

$$X_{af}^T \leq K_{fa}^1; \forall_{a,f}$$

Capacidad de las plantas

$$\sum_c O_{bce} = O_{be}^T; \forall_{b,e}$$

$$O_{be}^T \leq K_{be}^2; \forall_{b,e}$$

Capacidad de los Centros de Distribución

$$\sum_d S_{ced} = S_{ce}^T; \forall_{c,e}$$

$$S_{ce}^T \leq K_{ce}^3; \forall_{c,e}$$

Balance de Plantas

$$\sum_b X_{abfe} = \sum_c O_{bce} * W_{fe}; \forall_{b,e}$$

Balance de Centros de Distribución

$$\sum_c O_{bce} = \sum_d S_{ced}; \forall_{c,e}$$

Número de plantas a instalar

$$N_b = \sum_e Y_{be}$$

Número de Centros de Distribución a instalar

$$N_c = \sum_e Y_{ce}$$

Lead Time promedio de Plantas

$$\overline{LT}_b = \frac{\sum_b LT_b}{N_b}$$

Lead Time promedio de Centros de Distribución

$$\overline{LT}_c = \frac{\sum_c LT_c}{N_c}$$

Lead Time promedio de Mercados

$$\overline{LT}_d = \frac{\sum_d LT_d}{N_d}$$

$$\sum_b Y_{be} \leq 1$$

$$\sum_c Y_{ce} \leq 1$$

$$\sum Z_{afbg}^1 \leq 1$$

$$\sum Z_{bcg}^2 \leq 1$$

$$\sum Z_{cdeg}^3 \leq 1$$

Donde,

$$Y_{be}; Y_{ce}; Z_{afbg}^1; Z_{bcg}^2; Z_{cdeg}^3 \in \{1,0\}$$

$$X_{abfc}; O_{bce}; S_{ced}; D_{cde}; LT_b; LT_c; LT_d \geq 0$$

## Metodología propuesta

Dentro de la concepción epistemológica utilizada en esta investigación, la organización se concibió como un sistema abierto que interactúa con el entorno, lo que le permite evolucionar. Dentro de esta concepción los sistemas de manufactura se transforman y mejoran. El personal que

hace parte del sistema se entiende como un ser social que hace parte de la estructura productiva en donde toma decisiones que contribuyen con la optimización del sistema estudiado. El origen de la ciencia se genera como resultado del estudio de la cadena de suministro por medio de la experiencia, de la información y de un análisis racional de los investigadores para optimizar esta cadena utilizando la optimización multiobjetivo.

La esencia de la ciencia en esta investigación es combinada, toda vez que es producto de la relación entre el objeto estudiado y el sujeto; y también es integral considerando que la verdad y el conocimiento constituyen una relación dinámica entre 1) el sujeto, es decir la concepción de modelos propuestos y 2) el objeto entendido como el entorno y la estructura, las capacidades de abastecimiento de los proveedores, de producción y de distribución, donde se configura el modelo multiobjetivo.

La concepción de verdad en esta investigación, se entiende como una combinación entre el reflejo de la realidad, pues analiza la experiencia, pero además propone una construcción y configuración de la cadena de suministro como resultado de un análisis racional de la proyección deseada de expectativas para la organización, soportada en un algoritmo evolutivo (AE). Como criterio de verdad, este trabajo científico considera un enfoque empirista, pues considera importante la observación, toma de datos y verificación previa del contexto, y propone un racionalismo cuantitativo para configurar y proponer el tipo de modelo requerido por el sistema manufacturero de la organización a través de una argumentación cuantitativa y cualitativa. La lógica del método es combinada debido a que este requirió realizar un análisis: 1) empírico, 2) racional y 3) deductivo para configurar la cadena de suministro.

## Técnica de solución multiobjetivo

La solución empleada para resolver el problema multiobjetivo es un algoritmo evolutivo (AE) que es una técnica



de resolución de problemas que utiliza los conceptos de evolución y herencia para producir buenas soluciones a problemas complejos que suelen tener enormes espacios de búsqueda y que por lo tanto son difíciles de resolver (Velásquez *et al.*, 2007). Estos son métodos metaheurísticos de optimización estocástica inspirados en la evolución natural de las especies y propuestos por Holland, estableciendo una relación entre el conjunto de soluciones del problema y el conjunto de individuos de una población natural (Médina *et al.*, 2011). Básicamente, un algoritmo genético tiene por lo menos los siguientes elementos en común: las poblaciones de los cromosomas, el método de selección de acuerdo al *Fitness*, y los operadores de cruce y de mutación al azar (Rodríguez *et al.*, 2009)

De acuerdo con Martínez *et al.*, (2011) para una correcta aplicación de los algoritmos evolutivos genéticos, es preciso tener en cuenta varias cuestiones: la codificación de los individuos, es decir, cómo se van a codificar los individuos de una población de modo que esta codificación permita recoger el conjunto de soluciones posibles al problema; la selección de la función de fitness, de modo que represente la bondad de las soluciones según el problema planteado; la selección de los valores de los parámetros (tamaño de la población, número de iteraciones, probabilidades, etc.).

Para nuestro problema, la solución de optimización se desarrolló bajo el entorno JAVA, configurando el cromosoma como un objeto que contiene matrices de transporte entre nodos. A continuación se explica cada procedimiento del algoritmo de optimización.

**Población inicial:** se partió de una población inicial que es generada a partir de asignaciones aleatorias de unidades de materia prima o productos en los enlaces que comunican los nodos de la cadena de suministros, cada asignación está asociada con la restricción de capacidad del nodo. Para ello se realizó un análisis de flujo inverso; en cada mercado se suple la demanda total, lo que implica que entre todos los centros de distribución deben tener una cantidad de

producto suficiente para satisfacer la demanda y que a la vez no se supere la capacidad de almacenamiento de cada centro de distribución. De igual forma sucede de las plantas a los centros de distribución y de los proveedores a las plantas, con esto se aseguró que todas las soluciones generadas en la población inicial cumplan las restricciones de demanda de los mercados y de capacidad de almacenamiento de los demás nodos.

**Selección de NO-DOMINADOS:** en este procedimiento se definió una solución base que es la solución comparada contra todas las demás soluciones prueba; si la solución base pierde en todos los objetivos contra una solución prueba, la solución base se define dominada, si la solución base no pierde, o pierde en número menor de objetivos que el total, se denomina dominada débil y se crea una copia en un conjunto nuevo llamado archivo. Cuando todas las soluciones han sido en su momento soluciones base, se pasa a retirar de la población inicial los elementos que se encuentran en el conjunto archivo.

**Fitness:** según Quintero *et al.*, (2011) a cada individuo se le asigna un valor que mide la calidad de esa solución, lo que en la terminología de los Algoritmos Genéticos se denota como grado de adaptación (*fitness*). En este procedimiento se le asignó un valor a cada elemento del conjunto archivo el cual se calcula de la siguiente manera: Cada solución del conjunto archivo es comparada contra todas las soluciones que quedaron en la población inicial, en cada comparación se calcula el porcentaje de objetivos en los que la solución del conjunto archivo es mejor, y así para todas las otras soluciones en la población inicial, al final se obtiene el acumulado de los porcentajes que indica que entre más alto, la solución tiene mejores resultados en los objetivos

**Reducción:** dada la definición del *Fitness*, en este proceso se reduce el conjunto archivo hasta el número de soluciones definido y las soluciones excluidas pasan de nuevo a la población inicial.

Cruzamiento: los operadores de cruzamiento son la manera en que los algoritmos evolutivos permiten buena combinación de genes que se pasa entre los diferentes miembros de la población (Cheong *et al.*, 2009). Dado el archivo de selección y la probabilidad de cruzamiento se enfrentan uno a uno todas las soluciones; si hay cruzamiento entonces se genera una nueva solución de la siguiente forma:

- De la solución 1 se toma la asignación de proveedores a planta
- De la solución 2 se toma la asignación de planta a centros de de distribución
- De nuevo, de la solución 1 se toma la asignación de centros de distribución a mercados.

La nueva solución luego es almacenada en la población inicial.

Mutación: sin algún tipo de estrategia de mutación, el conjunto de solución se convierte rápidamente en una solución bastante homogénea. Esta falta de diversidad se complica en cada generación subsiguiente. Una estrategia de mutación va a cambiar una pequeña parte de la solución, a menudo un único bit en un algoritmo genético, generando como resultado un nuevo conjunto de solución (Rothberg, 2007). Dado el conjunto de soluciones de la población inicial, se analiza cada solución y si la probabilidad de mutación es adecuada entonces la solución se transforma combinando el número de unidades transportadas por un medio de transporte a otro.

## Resultados y discusión

Para este trabajo de investigación se analizó un modelo de cadena de suministro el cual se encuentra compuesto de dos tipos de materia prima, las cuales pueden ser suministradas por tres tipos de proveedores diferentes, el modelo planteado consta de hasta tres plantas de procesamiento de producto, tres centros de distribución y finalmente tres mercados, como se observa en la Figura 1. Para los transportes de materia prima, y de los productos desde los diferentes eslabones de la cadena se establecen dos tipos de transporte.

Para efectos de resumir, se ha denotado los eslabones de la cadena y todos sus involucrados como se muestra en la Tabla 1.

Para la elaboración del producto, se requieren dos unidades de la materia prima F1 y tres unidades de la materia prima F2, lo que se relaciona en la Tabla 2.

Los costos asociados a los diferentes eslabones de la Cadena de Suministro del modelo, así como las diferentes capacidades, se muestran desde la Tabla 3 hasta a Tabla 13.

Los diferentes tiempos de procesamiento se muestran en la Tabla 14, Tabla 15 y Tabla 16.

**Tabla 1.** Eslabones de la Cadena de Suministro

Cadena de suministro					
Materia prima	Proveedores	Plantas	CD	Mercados	Tipos de transp
F1	A1	B1	C1	D1	G1
F2	A2	B2	C2	D2	G2
	A3	B3	C3	D3	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Unidades de Materia Prima por Producto

Producto	Unidades de Materia Prima	
	F1	F2
E1	2	3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.** Costo de Adquisición de Materia Prima F1

Proveedor	Plantas			Capacidad
	B1	B2	B3	
A1	50	50	50	1.200.000
A2	55	55	55	2.000.000
A3	45	45	45	1.450.000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Costo de Adquisición de Materia Prima F2

Proveedor	Plantas			Capacidad
	B1	B2	B3	
A1	65	65	65	2.500.000
A2	72	72	72	2.300.000
A3	49	49	49	2.200.000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.** Costo de Producción del Producto E1

Producto	Plantas		
	B1	B2	B3
E1	80	90	85
Capacidad	650	750	900
Costo Apertura	150.000.000	160.000.000	180.000.000
Costos Fijos	10	8	9

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.** Costo de transporte de la Materia Prima F1 utilizando el tipo de transporte G1

Proveedor	Plantas		
	B1	B2	B3
A1	5	10	4
A2	4	9	5
A3	4	8	3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 7.** Costo de transporte de la Materia Prima F1 utilizando el tipo de transporte G2

Proveedor	Plantas		
	B1	B2	B3
A1	3	7	3
A1	2	6	4
A3	2	6	1

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8.** Costo de transporte de la Materia Prima F2 utilizando el tipo de transporte G1

Proveedor	Plantas		
	B1	B2	B3
A1	6	11	5
A2	5	10	4
A3	5	10	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9.** Costo de transporte de la Materia Prima F2 utilizando el tipo de transporte G2

Proveedor	Plantas		
	B1	B2	B3
A1	5	8	4
A1	3	7	4
A3	4	8	2

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10.** Costo de Transporte del Producto E1 desde las plantas a los centros de distribución utilizando el tipo de transporte G1

Planta	Centro de Distribución		
	C1	C2	C3
B1	4	7	6
B2	7	8	7
B3	6	9	6

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 11.** Costo de Transporte del Producto E1 desde las plantas a los centros de distribución utilizando el tipo de transporte G2

Planta	Centro de Distribución		
	C1	C2	C3
B1	2	5	4
B2	5	6	5
B3	4	7	4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 12.** Costo de Transporte del Producto E1 desde los centros de distribución a los diferentes mercados utilizando el tipo de transporte G1

Centro de Distribución	Mercados			Capacidad del CD
	D1	D2	D3	
C1	4	9	6	600
C2	9	8	5	850
C3	10	9	8	700
Demanda	600	450	320	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 13.** Costo de Transporte del Producto E1 desde los centros de distribución a los diferentes mercados utilizando el tipo de transporte G2

Centro de Distribución	Mercados			Capacidad del CD
	D1	D2	D3	
C1	2	7	4	600
C2	7	6	3	850
C3	8	7	6	700
Demanda	600	450	320	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14.** Tiempo de Procesamiento de Materia Prima (Hr/Und)

Materia Prima	Proveedor		
	A1	A2	A3
F1	0,0006	0,00036	0,00049655
F2	0,000288	0,00031304	0,00032727

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 15.** Tiempo de Procesamiento del Producto (Hr/Und)

Producto	Planta		
	B1	B2	B3
E1	0,00111111	0,00095238	0,0008

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16.** Tiempo de Embalaje del Producto (Hr/Und)

Producto	Centro de Distribución		
	C1	C2	C3
E1	0,00117647	0,00083333	0,001

Fuente: Elaboración propia

Al emplear la metodología propuesta de Algoritmo Evolutivo para dar respuesta al problema de optimización multiobjetivo, los parámetros del algoritmo que presentan el mejor comportamiento se determinaron con pruebas de tanteo y como criterio de parada se establecieron un total de 1000 iteraciones o 50 generaciones sin evolución. En la Tabla 17 se resaltan 5 soluciones seleccionadas.

La comparación de diferentes técnicas de optimización implica siempre la noción de rendimiento. En el caso de la optimización multiobjetivo, la definición de calidad es mucho más compleja que para los problemas de optimización de mono-objetivo (Zitzler et al, 2000). Para comprobar la eficacia de las soluciones obtenidas, se realizó la comparación de los valores obtenidos con los resultados de optimización mono-objetivo de cada una de las funciones objetivos.

Al comparar los resultados obtenidos de optimización mono-objetivo con los resultados arrojados por el algoritmo evolutivo multiobjetivo, se puede observar que las soluciones emanadas de las diferentes generaciones del evolutivo son más completas ya que tienen en cuenta la mayoría de las variables existentes en la cadena de suministro estudiada. Ver Tabla 17.

**Tabla 17.** Soluciones del modelo con Algoritmo Evolutivo

<b>Función Objetivo</b>	<b>Solución Optimización Mono-objetivo</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>E5</b>
Costos	995.767.000	1042968992	1039191288	1033488259	1045152099	1043004568
L.T. Plantas	1.297,56	1391,88	1421,69	1432,4	1409,48	1442,62
L.T.CentrosDist	1.395,22	1436,53	1468,06	1462,32	1409,76	1469,2
L.T. Mercados	1.483,00	1483,5	1506,43	1518,59	1519,16	1519,25
Var.L.T.Plantas	9.152,00	16687,01	2790,4	18504,1	26637,15	3628,58
Var.L.T. C.Dist	17.660,00	22122,94	26943,36	8776,2	4801,01	2356,49
Var.L.T. Mercad.	5.641,00	6524,03	11555,53	4716,79	11876,05	8573,63

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en todas las soluciones de la optimización multiobjetivo, para las funciones de costos y *Lead Time* la solución encontrada está muy cercana a los valores de la solución multiobjetivo con diferencias del menos del 10%. En el caso de las funciones de varianza de *Lead Time* la solución E5 arroja disminuciones del 60% y 85% para las Varianzas de *Lead Time* de las Plantas y los centros de distribución respectivamente.

## Conclusiones

La investigación desarrolla la aplicación de técnicas de optimización multiobjetivo basados en modelos matemáticos determinísticos que sirve de apoyo al proceso de toma de decisiones estratégicas en lo referente a costos de inversión, de materia prima, de producción y de los diferentes tiempos en una cadena de suministro.

El modelo matemático desarrollado satisface las expectativas de ser una herramienta de toma de decisión debido a la alta complejidad por la gran cantidad de datos, variables de decisión y las interrelaciones múltiples entre las variables que existen en la planificación de una cadena de suministro y brinda información confiable para la gestión de tomar decisiones empresariales sólidas. El modelo de optimización multiobjetivo de cadenas de suministro desarrollado en esta

investigación permite lograr estructuras más balanceadas logrando una mejor interacción entre cada uno de los miembros de la cadena.

El modelo desarrollado se puede correr con una configuración preestablecida, es decir previamente definir cuántas plantas de producción y centros de distribución se van a abrir, para ser adaptado a cualquier caso donde una compañía quiera lograr una eficiente interacción entre los diferentes actores de la cadena de suministro y de esta forma ser una herramienta para garantizar la disminución del tiempo y contribuir con las máximas utilidades.

Las soluciones alcanzadas con el modelo propuesto son bastante eficientes al compararlas con las soluciones de optimización mono-objetivo teniendo en cuenta que en esta última existe un óptimo global, mientras que en el contexto multiobjetivo no existe una solución claramente definida.

## Referencias

- Alfalla-Luque R, Medina-López, C. (2009). Supply Chain Management: Unheard of in the 1970s, core to today's company. *Business History*, 51(2), pp 201–220.
- Baessler F, Moraga R, Cornejo O. (2008). Introducción de elementos de memoria en el método simulated annealing

- para resolver problemas de programación multiobjetivo de máquinas paralelas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 16(3), pp 428-437
- Blanchard, David. (2010). *Supply Chain Management Best Practices*. 2nd ed. John Wiley & Son, New Jersey, p.303.
- Capó-Vicedo J, Tomás-Miquel J, Expósito M. (2007). La Gestión del Conocimiento en la Cadena de Suministro. Análisis de la Influencia del Contexto Organizativo. *Información Tecnológica*, 18(2), pp 127-135
- Cheong C, Tan K, Veeravalli, B. (2009). A multi-objective evolutionary algorithm for examination timetabling. *Journal of Scheduling*, 12 (2), pp 121-146.
- Janvier Assey. (2012). A New Introduction to Supply Chains and Supply Chain Management: Definitions and Theories Perspective. *International Business Research*, 5(1), pp 194-207.
- Larsen T, Shary P, Mikkola J, Kotzab H. (2007). *Managing the Global Supply Chain*. Copenhagen, Dinamarca. Copenhagen Business School Press, p 459.
- Manuj I, Sahin F. (2011). A model of supply chain and supply chain decision-making complexity. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(5): 511-549.
- Marler R, Arora J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct Multidisc Optim*, 26, pp 369-395.
- Martínez M, Palacios B, Toral S, Barrero F. (2011). Aplicación de algoritmos genéticos a la identificación de la estructura de enlaces en portales web. *Revista Española de Documentación Científica*. 34(2), pp 232-252.
- Medina R, Pradenas L, Parada V. (2011). Un algoritmo genético para el problema de Job Shop Flexible. *Ingeniare Revista chilena de ingeniería*, 19(1), pp 53-61.
- Nagar L, Jain K. (2008). Supply chain planning using multi-stage stochastic programming. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(3), pp 251-256.
- Pradenas L, Matamala E. (2012). Una formulación matemática y de solución para programar cirugías con restricciones de recursos humanos en el hospital público. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 20(2), pp 230-241
- Puri Mohitkumar. (2009). *European Supply Chain Study*. Tesis de Maestría. Massachusetts Institute Technology
- Quintero M, Jerez M, Ablan M. (2011). Evaluación de tres técnicas heurísticas para resolver un modelo de planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales. *Interciencia*, 36(5), pp 348-355.
- Rodriguez J, Henrique C, Hernández H. (2009). Algoritmos evolutivos multiobjetivo aplicados a los proyectos de antenas Microstrip. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 17(3), pp 288-298.
- Rothberg Edward. (2007). An Evolutionary Algorithm for Polishing Mixed Integer programming Solutions. *INFORMS Journal on Computing*, 19(4), pp 534-541.
- Vargas F, Montoya J. (2008). Implementación de un procedimiento basado en algoritmos evolutivos para programar la producción de marquillas estampadas por transferencia térmica. *Ingeniería y Universidad*, 12(2), pp 269-299.
- Velásquez G, Bellini G, Paternina C. (2007). A multi-objective approach based on soft computing techniques for production scheduling in Corrugator manufacturing plants. *Ingeniería y Desarrollo*, 21(1), pp 73-92.
- Zitzler E, Deb K, Thiele L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms. Empirical result. *Evolutionary Computation*, 8(2), pp 173-195