



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

ingeniare@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Gámez-Albán, Harol Mauricio; Mejía-Arguet, Christopher; León Espinosa de los Montero, Ricardo Arturo

Diseño de una red de distribución a través de un modelo de optimización considerando agotados

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 25, núm. 4, diciembre, 2017, pp. 619-632

Universidad de Tarapacá

Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77254022004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Diseño de una red de distribución a través de un modelo de optimización considerando agotados

Design of a logistics network via an optimization model considering out-of-stocks

Harol Mauricio Gámez-Albán^{1*} Christopher Mejía-Argueta^{2, 3}
Ricardo Arturo León Espinosa de los Monteros³

Recibido 21 de mayo de 2016, aceptado 21 de noviembre de 2016
Received: May 21, 2016 Accepted: November 21, 2016

RESUMEN

Esta investigación presenta un modelo de programación entera mixta en múltiples períodos que minimiza los costos de la red logística de una comercializadora de insumos veterinarios en Colombia. Los productos comercializados son importados mediante un par de puertos y movilizados por conducto de cuatro centros de distribución a sus respectivos clientes localizados en todo el país. El problema considera el costo ligado al agotado del producto, el que ocurre cuando el producto está por debajo del inventario mínimo preestablecido por la compañía, así como los costos de apertura y cierre de instalaciones a lo largo del horizonte de planeación. Junto con la solución del caso base de estudio, se resuelven ocho escenarios generados a partir de instancias modificadas: cuatro escenarios aumentan el costo del agotado y cuatro escenarios lo disminuyen. Los resultados demuestran que existe una relación inversamente proporcional entre el costo de mantener inventario y el costo del agotado al modificar el valor del agotado; lo que acarrea modificaciones estratégicas importantes en la red logística definida por la organización.

Palabras clave: Red de distribución logística, agotados, localización de instalaciones, optimización, programación entera.

ABSTRACT

A multiperiod mixed integer programming is presented to minimize the total costs of the logistics network of a firm that sells veterinary products in Colombia. The products are imported through two ports and they are distributed from four distribution centers to the final customers in the country. The model considers the costs of out-of-stocks that occur when the goods are below a minimum safety stock level. Other costs such as costs to open (or to re-open) a facility during the time horizon are also considered. Eight scenarios plus the business-as-is scenario are solved: four scenarios take into account increasing the cost of out-of-stocks and four scenarios consider a decreasing cost trend. The results show that there is an inverse relationship between the cost of inventory and the cost of out-of-stocks. This fact carries strategic modifications in the logistics network of the firm under study.

Keywords: Logistics network, out-of-stock, facility location, optimization, integer programming.

¹ Laboratoire d'Optimisation des Systems Industriels (LOSI). Université de Technologie de Troyes (UTT). 12 Rue Marie Curie, BP 2060, 10010. Troyes, Francia. E-mail: hghamagal@gmail.com

² Industrial Engineering and Innovation Science Department. Eindhoven University of Technology. Den Dolech 2, Pav. N° 19, 5612 AZ. Eindhoven, Netherlands. E-mail: c.mejia.argueta@tue.nl

³ Centro Latinoamericano de Innovación en Logística, Logyca / Investigación. Avenida El Dorado #92-32. Bogotá, Colombia. E-mail: rleon@logyca.com

* Autor de correspondencia.

INTRODUCCIÓN

La logística facilita el desarrollo económico para regiones enteras, así como para los individuos y negocio; ya que los costos logísticos en promedio representan el 13.8% del Producto Interno Bruto (PIB) mundial [1]. El manejo eficiente de dichos costos depende en gran medida de la configuración estratégica de las redes de abastecimiento. En este sentido, una red logística está compuesta de un conjunto de proveedores (nacionales o internacionales), plantas de producción, almacenes intermedios, centros de distribución urbanos y puntos de venta, por medio de ellos se lleva a cabo el flujo físico de materia prima, producto en proceso y producto terminado [2]. Para el caso de redes logísticas internacionales, otros actores como aduanas, puertos, aeropuertos, entre otros son tomados en cuenta [3]. Es por ello que el diseño de una red de distribución logística involucra la toma de decisiones en los niveles estratégico, táctico y operativo.

Se sabe bien que las decisiones estratégicas se llevan a cabo para largos horizontes de planeación (años), involucran generalmente grandes inversiones en términos de cantidad, capacidad, ubicación y función de las instalaciones de la red logística. Por otro lado, las decisiones tácticas contemplan la planeación a un mediano plazo (meses) en actividades relacionadas con producción, compras, políticas de inventarios y estrategias de transporte. Finalmente, las decisiones operativas son a corto plazo (semanales o diarias), permitiendo secuenciar operaciones, generar rutas de vehículos, etc. para disminuir costos y tiempos de entrega.

Entonces el diseño de una red logística se convierte en una actividad estratégica y táctica, ya que está relacionada con la determinación del número y localización de instalaciones, así como la asignación de mercados (conjunto de puntos de venta) a cada localización para su atención costo-efectiva logrando la satisfacción de la demanda de los clientes. Para ello, el proceso de entrega debe estar alineado con la estrategia corporativa y los objetivos del sistema logístico de la organización, por lo que este tipo de decisiones a nivel práctico son cruciales [4] para garantizar el éxito de las empresas. Esto se debe a que cualquier red logística tiene como principales objetivos: i) minimizar el costo total de la red

(inversión en la configuración y el costo operativo de la red) y ii) maximizar la satisfacción del cliente por medio del cumplimiento de la demanda. Dentro de la literatura citada hay una buena cantidad de investigaciones relacionadas con diseños de cadenas logísticas, redes de distribución y localización de instalaciones. Esta investigación analiza estos temas basados en una muestra significativa de artículos, así como los métodos utilizados para encontrar soluciones óptimas al diseño de una red logística considerando agotados.

Fundamentalmente, los problemas clásicos de redes de distribución están basados en teoría de flujo en redes [3, 5-6], donde se plantea un modelo para estimar la cantidad de flujo de producto que debe atravesar ciertos nodos (e.g. localizaciones) previamente establecidos en la red. Normalmente este tipo de problemas es resuelto mediante formulaciones que aprovechan la estructura *Set Covering* y algoritmos como *Branch and Bound* y sus variantes para encontrar las soluciones óptimas al problema [5-6].

Otros autores incluyen la localización de instalaciones además del flujo en redes como parte del proceso de decisión [7]. Por otro lado, autores como [8-10] extienden el problema anterior considerando además la producción, con el objetivo de volver más real el problema en el curso de la adición de costos de transporte, almacenamiento, apertura de instalaciones y manipulación del producto en las plantas y en los almacenes, además de características propias de la producción. Para estas investigaciones, los autores citados desarrollan algoritmos genéticos y el algoritmo *Particle Swarm Optimization* para encontrar soluciones de buena calidad para el diseño de la red logística extendida desde las plantas hasta los centros de distribución.

Por su parte [11] extiende el diseño de la red logística hacia atrás para agregar la compra de materia prima a los proveedores y hacia adelante para distribuir a las tiendas. En este caso, los autores presentan un modelo biobjetivo enfocado en minimizar el costo total de distribución y a maximizar el cumplimiento de la demanda de los clientes, por lo que implementan el algoritmo *Multi Objective Heuristic Particle Swarm Optimization* para obtener buenas soluciones al problema planteado en un tiempo computacional razonable.

Los autores [12-16] se han concentrado en formular modelos de optimización para mejorar la configuración de redes logísticas para el envío de productos de un conjunto de bodegas a un conjunto de tiendas al menor costo logístico. Para ello los autores han adaptado algoritmos conocidos como generación de columnas para aprovechar estructuras como *Set Partition*; además de aplicar heurísticos tipo *Greedy*, relajación lagrangiana y otros más, para sugerir configuraciones logísticas adecuadas para las organizaciones en tiempos razonables.

Cuando se consideran redes extendidas, es natural enfocarse en uno de los dos extremos: proveedores o clientes, dependiendo de las características del problema a ser resuelto y de la empresa bajo estudio. Por esta razón, algunos trabajos como [17] están orientados a mejorar los tiempos de entrega de productos a los clientes finales, optimizando tiempos y costos de manipular los productos en las actividades de la red, pero primordialmente en el alistamiento considerando incluso ventanas de tiempo. Para este caso, los autores plantean un modelo de optimización del tipo dual lagrangiano logrando obtener resultados de excelente calidad para todos los escenarios analizados.

El trabajo de [18] plantea dos formulaciones para el problema de red distribución: La primera de ellas está orientada a dar solución a un problema de orden estratégico (apertura y cierre de instalaciones) y, la segunda, al problema de orden táctico (cantidades de productos a fabricar y a enviar mediante los nodos) el componente estocástico ligado a la demanda. Los autores hacen una aproximación por el método estadístico de promedios muestrales para indicar la robustez de las soluciones propuestas, con el objetivo de maximizar el cumplimiento de la demanda. Formulaciones estocásticas similares son presentadas por [19-23] utilizando relajación lagrangiana, generación de columnas y búsqueda tabú.

A partir de la revisión de la literatura anterior, se determina que han habido extensiones interesantes en el estudio de las redes de suministro; sin embargo, se ha ignorado el análisis de los agotados, de inventarios y el efecto que puede acarrear una potencial política de reapertura de instalaciones de transferencia. Por esta razón, la presente investigación propone un modelo de optimización determinístico que toma en cuenta estas brechas a

un nivel táctico-estratégico para la definición de la red logística y sus implicaciones en la gestión de los agotados e inventarios. Elementos estocásticos son dejados para investigación futura, con el objetivo de crear una línea base de comparación robusta. Para mostrar la utilidad del presente estudio, se resuelve un caso de estudio para una empresa comercializadora de productos veterinarios en Colombia y para demostrar la robustez, ocho escenarios adicionales son estudiados en detalle.

El artículo está organizado de la siguiente manera: La sección dos detalla la metodología propuesta para solucionar el problema de red logística presentando el modelo de programación entera mixta en múltiples períodos. La sección tres analiza los hallazgos más relevantes de la investigación y, finalmente, la sección cuatro presenta las conclusiones del trabajo y el trabajo futuro.

METODOLOGÍA

Regularmente los problemas de diseño de red logística consideran aspectos de localización de instalaciones, utilización de vehículos y flujo de producto por medio de los distintos nodos de la red, sujetas a respetar las restricciones de capacidad tanto de almacenamiento en las bodegas como de carga en los vehículos, compras, inventarios en las instalaciones, para la minimización de costos fijos y variables que intervienen en la red logística.

Adicionalmente, hay dos aspectos clave que se incluyen en la formulación propuesta de esta investigación:

- a) El costo ligado al agotado del producto. Un agotado se genera cuando el inventario de un producto se encuentra por debajo del inventario mínimo predefinido. En este caso se toma en cuenta tanto el valor del inventario no suministrado (agotados en punto de venta) e implícitamente, el tiempo que el sistema permanece en dicho estado.
- b) El costo ligado a la apertura y cierre de instalaciones a lo largo del horizonte de planeación. Con este componente se analiza el beneficio que puede traer para una compañía abrir o cerrar las instalaciones disponibles en diversos períodos de tiempo. Esta es una característica particular que la comercializadora bajo análisis desea estudiar

como una alternativa, debido a la variabilidad que presenta en ciertas regiones de Colombia.

Tomando en cuenta el par de contribuciones anteriores, se genera una visión holística del problema determinístico, permitiendo incorporar aspectos prácticos que regularmente no son analizados en la formulación tradicional, lo que permite evaluar alternativas de manejo de inventarios, agotados e incluso combinaciones de apertura y cierre con el objetivo de analizar los impactos en los costos logísticos de la red configurada.

Modelo de optimización

En esta parte se presenta el modelo de programación entera mixta en múltiples períodos para construir la mejor red logística considerando demanda, capacidad de almacenamiento, apertura, cierre y reapertura de instalaciones; así como todos los costos que hacen parte de la red completa para el flujo de productos entre las instalaciones, incluyendo los costos de manejo de agotados en el sistema.

La formulación propuesta abarca desde que el producto está disponible en las instalaciones y listo para ser enviado a los clientes finales. Para modelar este problema es necesario hacer un conjunto de supuestos, los que son:

- La demanda es conocida previamente (no estocástica).
- Se considera un conjunto limitado y conocido de recursos (vehículos y localizaciones).
- Los productos considerados son homogéneos (físicamente similares) y es posible mezclarlos en un mismo vehículo.
- Todos los costos asociados al proceso logístico son de tipo determinístico y han sido calculados previamente con base en información de la compañía bajo estudio, considerando su naturaleza variable o fija, así el entendimiento de qué tipo de recursos son afectados por sus cambios.

Este modelo no considera ventas perdidas, debido a que el valor de un cliente perdido para esta empresa es muy alto, por ello se manejan siempre agotados (i.e., con un nivel de inventario por arriba de cero pero por debajo de un umbral mínimo; mientras los faltantes asociados a ventas perdidas estarían por debajo de cero). Sin embargo, la formulación

propuesta puede extenderse al agregar penalizaciones por ventas perdidas y una variable que considere el inventario por debajo de cero (i.e., faltantes).

En general, el planteamiento del modelo de optimización se explica a continuación:

• Conjuntos

- $p \in P$ Productos o familias de producto.
- $(c, h) \in C$ Instalaciones.
- $i \in I$ Clientes, zonas de clientes o mercados.
- $v \in V$ Vehículos.
- $t \in T$ Horizonte de planeación (tiempo).

• Parámetros

- D_{pi}^t Demanda del cliente i por el producto p en el período $t \forall p \in P, i \in I, t \in T$.
- IS_{pc}^t Inventario mínimo permisible del producto p en el centro de distribución (cedi) c en el período $t \forall p \in P, c \in C, t \in T$.
- Ini_{pc} Inventario inicial del producto p en el cedi $c \forall p \in P, c \in C$.
- Min_p^t Compra mínima del producto p para el periodo t negociada con el proveedor $\forall p \in P, t \in T$.
- Com_p^t Compra máxima del producto p para el período t establecida por políticas del comprador $\forall p \in P, t \in T$.
- Cr_v Capacidad de carga del vehículo $v \forall v \in V$.
- Ca_c Capacidad de almacenamiento del cedi $c \forall c \in C$.
- Dv_v Número de vehículos tipo v disponibles $\forall v \in V$.
- CAB_c Centros de distribución c abiertos en el periodo inicial $c \forall c \in C$.
- ε Valor muy pequeño para diferenciar el inventario mínimo.
- M Número muy grande (lo suficientemente grande para ser usado en todas las restricciones).

$$Ep_{ch} = \begin{cases} M & \text{si hay flujo de producto entre} \\ c \text{ y } h & 0 \text{ en otro caso } \forall (c, h) \in C \end{cases}$$

$$Es_c = \begin{cases} M & \text{si hay flujo de la instalación } c \text{ a} \\ \text{los clientes} & 0 \text{ en otro caso } \forall c \in C \end{cases}$$

- Cpv_{chv} Costo de transporte entre instalaciones c y h al usar el vehículo $v \forall (c, h) \in C, v \in V$.

- Csv_{civ} Costo de transporte desde la instalación c hasta el cliente i con el vehículo $v \forall c \in C, i \in I, v \in V$.
- Cm_{pc} Costo de mantener en inventario el producto p en el cedi $c \forall c \in C, p \in P$.
- Cg_{pc} Costo por tener agotados del producto p en el cedi $c \forall c \in C, p \in P$.
- Cb_c Costo de abrir el cedi $c \forall c \in C$.
- Cc_c Costo de cerrar el cedi $c \forall c \in C$.
- Co_c Costos fijos de mantener en operación el cedi $c \forall c \in C$.

• Variables

- X^t_{pchw} Cantidad de producto p que se envía desde el cedi c al cedi h en el vehículo v durante el período $t \forall (c, h) \in C, p \in P, v \in V, t \in T$.
- Y^t_{pciv} Cantidad de producto p que se envía desde el cedi c al cliente i en el tipo vehículo v durante el período $t \forall c \in C, p \in P, v \in V, i \in I, t \in T$.
- U^t_{pc} Cantidad comprada de producto p que llega al cedi c en el período $t \forall c \in C, p \in P, t \in T$.
- Q^t_{chw} Cantidad de vehículos tipo v que se envían cargados desde el cedi c al cedi h en el período $t \forall (c, h) \in C, v \in V, t \in T$.
- W^t_{cv} Cantidad de vehículos tipo v que se requieren para ir desde el cedi c a los clientes en el período $t \forall c \in C, v \in V, t \in T$.
- Iv^t_{pc} Inventario del producto p en el cedi c durante el período $t \forall c \in C, p \in P, t \in T$.
- E^t_{pc} Inventario por debajo del nivel de seguridad del producto p en el cedi c durante el período $t \forall c \in C, p \in P, t \in T$.

$$S^t_{pc} = \begin{cases} 1 & \text{si la posición en inventario de } p \\ & \text{es superior al inventario mínimo en el cedi } c \text{ en } t \\ 0 & \text{en otro caso } \forall p \in P, c \in C, t \in T \end{cases}$$

$$A^t_p = \begin{cases} 1 & \text{si se compra } p \text{ en } t \\ & \forall p \in P, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$B^t_c = \begin{cases} 1 & \text{si se abre instalación } c \text{ en } t \\ & \forall c \in C, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$R^t_c = \begin{cases} 1 & \text{si se cierra instalación } c \text{ en } t \\ & \forall c \in C, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

• Función objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min} z = & \sum_{pciv} C_{sv_{civ}} Y^t_{pciv} + \sum_{pchw} C_{pv_{chw}} X^t_{pchw} + \\ & \sum_{pct} C_{m_{pc}} I^t_{pc} + \sum_{pc \geq 1} C_{g_{pc}} (I^t_{pc} (1 - S^t_{pc}) - E^t_{pc}) + \\ & \sum_{ct} C_{o_c} (|T - t|) (B^t_c - R^t_c) + \sum_{c \geq 1} C_{b_c} B^t_c + \sum_{ct} C_{c_c} R^t_c \end{aligned} \quad (1)$$

• Restricciones

$$\sum_{cv} Y^t_{pciv} = D^t_{pi} \forall p \in P, i \in I, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{pi} Y^t_{pciv} \leq C_{rv} W^t_{cv} \forall c \in C, v \in V, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_p X^t_{pchw} \leq C_{rv} Q^t_{chw} \forall (c, h) \in C, v \in V, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_c W^t_{cv} + \sum_{ch} Q^t_{chw} \leq D_{vv} \forall v \in V, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{vt} Q^t_{chw} \leq E_{p_{ch}} \forall (c, h) \in C \quad (6)$$

$$\sum_{vt} W^t_{cv} \leq E_{s_c} \forall c \in C \quad (7)$$

$$\text{Min}_p A^t_p \leq \sum_c U^t_{pc} \forall p \in P, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_c U^t_{pc} \leq \text{Com}^t_p \forall p \in P, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{hv} X^t_{pchw} \leq U^t_{pc} \forall c \in C', C' \subseteq C, p \in P, t \in T \quad (10)$$

$$I^t_{pc} + E^t_{pc} = \text{Ini}_{pc} B^t_c \forall p \in P, c \in C, t = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I^t_{pc} + E^t_{pc} = & I^{t-1}_{pc} + E^{t-1}_{pc} + \sum_{hv} X^{t-1}_{phcv} + U^t_{pc} - \\ & \sum_{iv} Y^t_{pciv} - \sum_{hv} X^t_{phcv} \forall p \in P, c \in C, t \in T, t \neq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$I^t_{pc} S^t_{pc} \leq I^t_{pc} \leq M S^t_{pc} \forall p \in P, c \in C, t \in T, t \neq 0 \quad (13)$$

$$E_{pc}^t \leq (I_{pc}^t - \varepsilon)(1 - S_{pc}^t) \forall p \in P, \\ c \in C, t \in T, t \neq 0 \quad (14)$$

$$\sum_p (I_{pc}^t + E_{pc}^t) \leq Ca_c \sum_{j \leq t} (B_c^j - R_c^j) \\ \forall c \in C, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{piv} Y_{pciv}^t \leq M \sum_{j \leq t} (B_c^j - R_c^j) \forall c \in C, t \in T \quad (16)$$

$$R_c^t + B_c^t \leq 1 \forall c \in C, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{j \leq t} (B_c^j - R_c^j) \leq 1 \forall c \in C, t \in T \quad (18)$$

$$B_c^t = CA b_c \forall c \in C, t = 0 \quad (19)$$

$$Q_{chv}^t, W_{civ}^t \in Z^+ \forall (c, h) \\ \in C, v \in V, i \in I, t \in T \quad (20)$$

$$X_{pchv}^t, Y_{pciv}^t, I_{pc}^t, E_{pc}^t, U_{pc}^t \in R^+ \forall p \in P, \\ i \in I, (c, h) \in C, v \in V, t \in T \quad (21)$$

$$B_c^t, R_c^t, S_{pc}^t, A_p^t \in \{0, 1\} \forall p \in P, c \in C, t \in T \quad (22)$$

La ecuación (1) define la función objetivo como la minimización de costos de la red logística configurada (incluyendo los costos de agotados). La restricción (2) garantiza la satisfacción de la demanda de los clientes, mientras las restricciones (3), (4) y (5) permiten asignar el número de vehículos adecuados tanto para el transporte primario (entre centros de distribución) como secundario (de los centros de distribución a los clientes) sin sobrepasar el número de vehículos disponibles ni su capacidad. Las restricciones (6) y (7) permiten el correcto flujo de productos entre instalaciones, así como de las instalaciones a los clientes. Las restricciones (8) y (9) asocian las compras mínimas acordadas con el proveedor y las compras máximas definidas por políticas de la distribuidora, respectivamente por cada tipo de producto y período de tiempo. Por otro lado, la restricción (10) garantiza que el flujo de producto entre instalaciones (e.g. puertos y centros

de distribución) se realice siempre que haya compras de producto. Las restricciones (11) y (12) permiten el balance de inventarios en el sistema; mientras que las restricciones (13) y (14) estiman las unidades en inventario y los agotados para todos los períodos.

La restricción (15) asegura no rebasar la capacidad de almacenamiento de las instalaciones y la restricción (16) garantiza que si hay flujo de productos a los clientes, este se hace siempre y cuando la instalación esté disponible. Las restricciones (17) y (18) definen la apertura y cierre de instalaciones cerrando a lo más las instalaciones abiertas, así como manteniendo una sola apertura o cierre a la vez por instalación. Por su parte, la restricción (19) garantiza que instalaciones están activas desde el período inicial, teniendo disponible su capacidad asociada. Por último, las restricciones (20), (21) y (22) relacionan la naturaleza de las variables.

Caso de estudio y descripción de escenarios adicionales

Para validar la utilidad y la robustez (i.e., el uso de diferentes valores en parámetros y, escenarios para determinar la habilidad del modelo propuesto de proponer soluciones útiles y operar adecuadamente) del modelo propuesto, se utiliza un caso de estudio y ocho escenarios adicionales. Dichos escenarios adicionales son creados a partir de la modificación del costo del agotado del escenario base; sin embargo, cada escenario cuenta con características específicas que permiten entender la dinámica de la red logística bajo diferentes circunstancias. El objetivo principal de estos análisis es entender profundamente las implicaciones de las variaciones en los costos de inventarios, costos de distribución y de agotados.

Los datos utilizados fueron suministrados por una compañía extranjera con operaciones en Colombia, la que distribuye productos veterinarios y para el cuidado de animales. Por razones de confidencialidad el nombre de la empresa no es compartido. Los escenarios planteados se construyeron en conjunto con la organización y de la mano de los principales retos del mercado considerando las características del modelo, a fin de brindar a la compañía estrategias logísticas eficientes.

Caso de estudio (Escenario base)

Este escenario representa la red logística actual de la compañía, que consta de cuatro bodegas

para almacenamiento y envío de productos a las zonas geográficas más cercanas a cada centro de distribución, los que están ubicados en las principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Cali y Bucaramanga). Por otro lado, hay dos puertos para la entrada de producto (Cartagena y Buenaventura), que en el modelo son manejados como nodos de compras.

Para la alimentación del modelo de optimización propuesto se consideran los siguientes parámetros:

- Demanda de los clientes respecto de diversos productos en las localizaciones disponibles. Esta demanda se brinda a nivel de cliente, producto y período de tiempo. Es de resaltar que los clientes se distribuyen territorialmente de acuerdo con la zona a la que pertenecen. Históricamente para la compañía el 50% de sus ventas que han estado en Bogotá, 20% en Medellín, 15% en Cali y 15% en otras cinco ciudades intermedias, entre las que se encuentra Bucaramanga.
- Capacidades de carga de los vehículos van de 750 unidades a 15 mil unidades de producto y capacidades de almacenamiento de las localizaciones que oscilan entre 14 mil y 230 mil unidades de producto.
- Se cuenta con diferentes tipos de vehículos que varían por su tarifa por unidad transportada. Dichos costos de transporte se construyeron con base en cotizaciones con transportistas, por lo que los costos están entre \$ 90/unidad y \$ 550/unidad.
- Los costos de almacenamiento se encuentran en el rango [0, 3] \$ /unidad-mes, mientras los costos de apertura y cierre de instalaciones oscilan entre \$ 4 millones/instalación y \$ 100 millones/instalación, respectivamente. Todos estos valores se generan considerando el valor histórico de arrendamiento de las instalaciones utilizadas por la comercializadora.
- Por último, los costos de agotados se calculan mediante una función que incorpora el valor de la venta perdida asociada al riesgo de desabastecimiento. Dicha función utiliza elementos conocidos por la empresa: demanda potencial durante el período de desabastecimiento, valor de la mercancía desabastecida y un factor de comportamiento del consumidor que evalúa qué porcentaje de la demanda no atendida se convierte en venta

perdida. Estos costos abarcan valores que van de \$ 50 mil/unidad a \$ 280 mil/unidad.

Escenarios adicionales

A diferencia del caso de estudio, en estos ocho escenarios adicionales se varía el costo del agotado tanto por encima como por debajo de su valor actual. Los ocho escenarios planteados a partir de la modificación del costo del agotado, muestran cuatro escenarios donde se aumenta (y cuatro donde se disminuye) el valor original con un tamaño de paso de 20% hasta llegar al 80%.

La idea con estos escenarios es profundizar cómo impactan las modificaciones en el costo del agotado en la solución del modelo en términos de flujo de productos circulando a lo largo de la red logística, cambiando los montos de compra, las unidades en inventario, unidades en agotados, así como sus efectos en los costos de inventarios y de agotados. La siguiente sección muestra un análisis conciso de dichos efectos tanto en el caso de estudio como en los escenarios de prueba adicionales.

RESULTADOS

El modelo de programación entera mixta fue modelado y tanto el caso de estudio como los escenarios fueron resueltos en GAMS 23.9.5, vía el solver Cplex 12.4.0.1 en un computador Intel Core i5 con memoria RAM de 6 GB. Los resultados obtenidos para cada una de las instancias analizadas son mostrados en esta sección.

En general, todos los escenarios manejan 100 clientes, 6 instalaciones, 23 tipos de productos, 16 tipos de vehículos y 12 períodos de tiempo. Estas características dan como resultado una formulación con más de 45 mil restricciones y más de tres millones de variables. Todas las instancias son resueltas a optimalidad en un tiempo computacional de 3 a 6 minutos.

Para el caso de estudio los resultados muestran que el costo del agotado representa el 36% del costo total. La Tabla 1 también resalta el costo de mantener inventario, que junto al costo del agotado superan el 90% del costo total de la red. También se observa que para los escenarios donde aumenta el costo del agotado, la participación de los costos de apertura y cierre de instalaciones suma 0% para todos los

Tabla 1. Variación porcentual de los costos en la situación base ante incrementos en el costo del agotado.

Variación	Actual	+20%	+40%	+60%	+80%
Costo total	100%	7,2%	13,6%	18,9%	24,2%
Tpte. sec.	1,4%	-0,2%	-0,2%	-0,1%	-0,1%
Tpte. prim.	0,7%	-0,4%	-0,4%	0,00%	-0,2%
Mantener inventario	56,2%	0,0%	14,7%	23,5%	23,4%
Agotado	36,1%	20%	14,7%	15,9%	30,5%
Operación del cedi	5,6%	0%	0%	0%	0%
Abrir locación	0%	0%	0%	0%	0%
Cerrar locación	0%	0%	0%	0%	0%

escenarios; lo que indica que el modelo no utiliza cierres y aperturas de las cuatro locaciones para atender la demanda en los períodos intermedios.

También se puede apreciar en la Tabla 1 que las variaciones porcentuales de cada costo al incrementarse el costo del agotado en la escala preestablecida no presentan cambios significativos, excepto por los costos de mantener inventario y de agotados. En los costos totales entre escenarios se observa un aumento, del 6,36% para el caso del 20% al 40%, un 5,34% del 40% al 60% y un 5,24% del 60% al 80%, mostrando una tendencia decreciente cada que vez el costo del agotado aumenta.

Se observa que para el escenario de +20% no se presenta ningún incremento en otros costos más que en el agotado, mientras los costos de transporte disminuyen debido a la falta de movimiento de producto. Para el escenario de +40% el costo del agotado no se incrementa proporcionalmente sino que lo hace en un 15%; al igual que el costo de mantener inventarios, mientras hay una disminución de los costos de transporte similares al escenario de +20%. En este escenario es posible concluir que el modelo genera equilibrio al aumento en el costo del agotado generando un inventario de seguridad ligeramente por encima del inventario mínimo. Para los escenarios de +60% y +80%, la proporción del costo de mantener inventario aumenta para contrarrestar los agotados como se observa en la Figura 1. Esta figura muestra que a medida que la proporción de los costos de inventario aumentan, el costo de agotados disminuye; generando un tradeoff evidente entre ambas estrategias para generar equilibrio en todo el sistema.

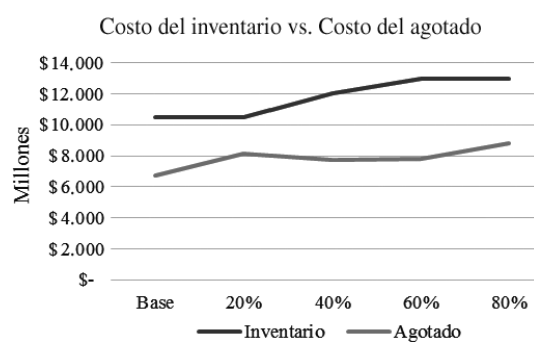


Figura 1. Comparación entre el costo de mantener inventario y el costo del agotado.

Por otro lado, debido a que los costos por reapertura son cero para todos los escenarios, es posible concluir que el modelo que prefiere mantener en operación las cuatro locaciones para atender la demanda de los mercados y disminuir el costo total de operación de la red. Este hecho corrobora que el costo de operación por instalación es un valor crítico que de ser mayor que la suma de los costos de abrir y cerrar la instalación, hace que sea más viable abrir y cerrar continuamente las instalaciones.

Para respaldar la conclusión anterior, la Tabla 2 muestra que en todos los casos la participación de las instalaciones en el manejo de la demanda se mantienen constante (salvo ligeras modificaciones que no van más allá del 3%). Esta participación poco variable también demuestra que la estrategia de reapertura sería poca efectiva, debido a que generaría sobrecostos para atender clientes desde una instalación diferente a la previamente definida por cercanía.

Tabla 2. Porcentaje de participación de cada instalación en el envío de productos a los distintos clientes.

Variación	Actual	+20%	+40%	+60%	+80%
CD_1	26,8%	26,5%	24,4%	24,8%	25,7%
CD_2	17,1%	18%	18,9%	20,3%	18,8%
CD_3	28%	30,5%	30,9%	28,6%	29,3%
CD_4	28,1%	25%	25,8%	26,3%	26,3%

Al incrementar linealmente el costo del agotado en cada centro de distribución (ver Figura 2), se puede apreciar que a medida que se efectúa el incremento, la mayoría de instalaciones presentan cambios significativos en el número de unidades en inventario, a excepción del cedi 3. Para el caso de los CD_2 y CD_4, se observa un comportamiento totalmente opuesto; por ejemplo, mientras el CD_2 disminuye durante el rango de 20% a 40% el CD_4 aumenta. Después del incremento del 40% en el costo del agotado, el CD_2 presenta un ascenso y el CD_4 una disminución considerable en las unidades en agotado, algo que permite concluir que estas dos locaciones siguen comportamientos diferentes (posiblemente complementarios), ya que mientras a una tienda a disminuir sus unidades en agotados, la otra los aumenta. Por otro lado, el CD_1 tiene un comportamiento especial, pues presenta un descenso en el primer rango de incremento del costo del agotado pero luego presenta un ascenso considerable en las unidades en inventario, por lo que esta locación presenta mayores ahorros en los costos de mantener inventario ante aumentos en el costo del agotado. Finalmente, el CD_3 es una locación insensible ante incrementos en el costo del agotado durante el período de análisis.

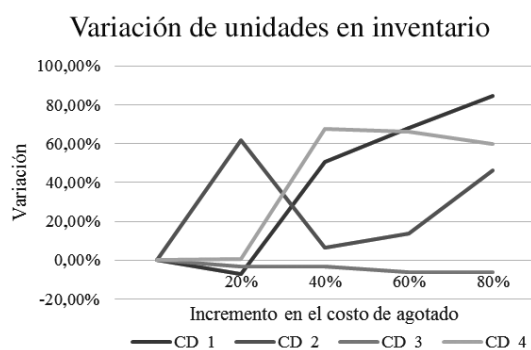


Figura 2. Variación porcentual de unidades por arriba del inventario mínimo ante incrementos en el costo del agotado.

Por otra parte, la Figura 3 muestra las variaciones de las unidades en agotados con respecto para cada escenario de aumento del costo del agotado respecto el caso de estudio. Como conclusión general, se observa que se llega a un punto de equilibrio (que oscila entre -31 y -36%) con respecto a las unidades en agotados en todas las locaciones. Se destaca también que hay disminuciones considerables casi en todas las locaciones excepto por el CD_2, que no sufre modificación alguna en ningún caso, dado que es la instalación que menos participación tienen en la entrega de productos. En conclusión, el CD_2 utiliza diferentes niveles de inventarios para compensar los agotados y al ser la instalación central que atiende el mercado más grande, el modelo mantendrá a toda la población atendida sin agotados (con un nivel de servicio alto).

Resumiendo el resto de los resultados, a medida que el costo del agotado aumenta las unidades en agotados disminuyen considerablemente. Además se detalla que después del aumento del 40% en el costo, las unidades en agotados se mantienen constantes para los CD_1 y CD_4, mientras que el CD_3 lo hace a partir del 60%. Este comportamiento podría deberse a que el CD_1 abastece un mercado fidelizado, por lo que no prefiere un alto nivel de inventarios como se muestra en la Figura 2; mientras que el CD_4 abastece a un mercado en crecimiento (similar al atendido por el CD_1), por lo tanto se requiere menos inventario para estabilizar sus agotados. Mientras que el CD_3 abastece a un mercado pequeño y como se demostró previamente, con poca necesidad de compensación entre inventarios y agotados.

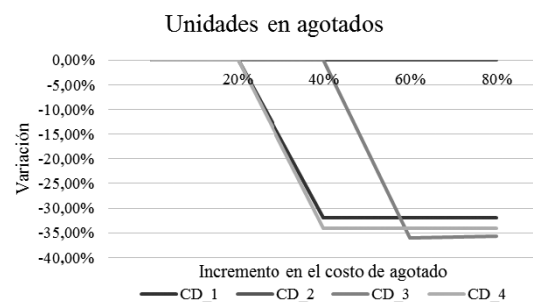


Figura 3. Variación porcentual de unidades en agotados ante incrementos en el costo del agotado.

Asimismo, la Figura 4 muestra las variaciones en las unidades en inventario con respecto al caso base

cuando se disminuye el costo del agotado. Se destaca que la variación de unidades en inventario disminuye a medida que el costo del agotado disminuye, lo que muestra que a menor costo del agotado, hay menos inventario. Es de resaltar que el CD_2 es la locación que presenta la mayor disminución, alcanzando valores por debajo del -80% en variación con respecto al caso base (generando grandes ahorros al ser el mercado más grande). Además el CD_4 (mercado en crecimiento) cuenta con al menos -40% en variación, con un ligero aumento después del rango de -40%. El caso del CD_3 logra una estabilización alrededor del -30% de variación y finalmente el CD_1, con un comportamiento más lineal (por ser un mercado fidelizado), logra una variación cercana al -30% al alcanzar una disminución de 80% en el valor del agotado.

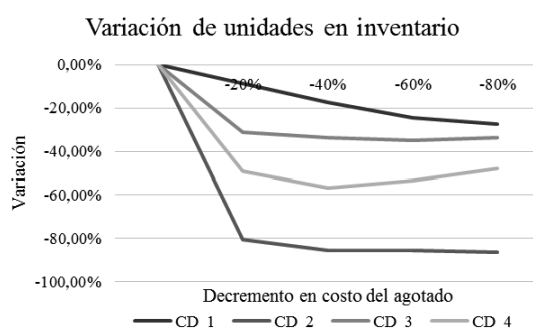


Figura 4. Variación porcentual de unidades en inventarios ante decrementos en el costo del agotado.

La Figura 5 muestra la variación de unidades en agotado. Es posible observar que las variaciones van en aumento, en especial la del CD_2 que presenta aumentos superiores al 60%, además se analiza que

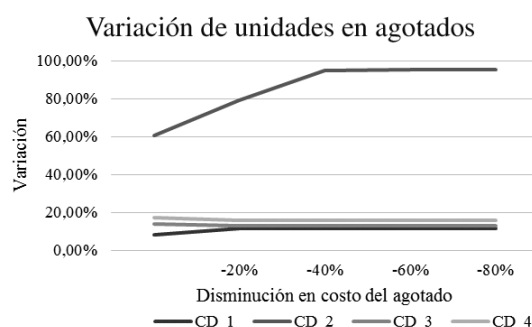


Figura 5. Variación porcentual de unidades en agotados ante decrementos en el costo del agotado.

al disminuir el costo del agotado, las unidades a tenerse en agotados tiendan aumentar. Con esto se puede concluir que a medida que disminuya el costo del agotado, el modelo tendrá más agotados con respecto al caso base. El resultado del CD_2 también demuestra que es la locación con los mejores costos de agotado; por lo que la estrategia es utilizar esta ventaja para disminuir los costos logísticos totales.

Retomando los costos para los escenarios donde se disminuye el costo del agotado (Tabla 3), cuando disminuye el costo del agotado, en los cuatro escenarios ocurren disminuciones en los costos llegando hasta un 70% por debajo del costo total. En síntesis, los costos totales entre escenarios van disminuyendo, pero sin guardar proporcionalidad respecto del decremento en el costo del agotado ni tampoco se encuentra que hay un comportamiento lineal en la disminución del costo total, ya que éste oscila alrededor del 19%.

Así, el costo de mantener inventario se reduce considerablemente en cada uno de los casos hasta

Tabla 3. Variación porcentual de los costos junto con la disminución del costo del agotado.

Variación	Actual	-20%	-40%	-60%	-80%
Costo total	100%	-14%	-33%	-52%	-70,9%
Transporte secundario	1,4%	0,2%	-0,0%	-0,1%	0,03%
Transporte primario	0,7%	-2,3%	-4,2%	-3,9%	-3,95%
Mantener inventario	56,2%	-88%	-95%	-96%	-95,5%
Agotado	36,1%	97,8%	57,5%	5,22%	-47,4%
Operación del cedi	5,6%	0%	0%	0%	0%
Abrir locación	0%	0%	0%	0%	0%

estabilizarse en un valor alrededor del 95-96% por debajo del valor original; mientras que el costo del agotado aumenta con respecto al caso base al disminuir el costo del agotado en el escenario de -20%, para después empezar a reducirse 57% en -40%, a 5% en el escenario -60% y alcanzando un valor final de -47% respecto del valor original en el escenario de -80%. Otro costo importante de resaltar es el costo de transporte primario, ya que presenta disminuciones cercanas al 4% en todos los casos; por lo que el modelo disminuye el número de viajes entre locaciones y, por ende, las unidades para mantener. A diferencia del costo del transporte primario que es similar a las variaciones observadas al aumentar el costo del agotado (constante, bajo y negativo).

Lo anterior demuestra que hay una relación inversamente proporcional entre las unidades en inventario y los agotados, ya que mientras unos aumentan los otros disminuyen o viceversa.

Por otro lado, la Tabla 4 muestra la tasa de flujo de productos por cada instalación en todos los escenarios planteados, donde se observa una estabilidad participativa en todos los casos con pequeñas fluctuaciones. Para el caso del CD_1, el valor oscila entre 21,8% hasta 26,5%, para el CD_2 se observa una variación entre el 12,1% hasta el 22,7%, mientras que para el CD_3 oscila entre el 28,4% y el 31,8% para, finalmente, en el CD_4 presentar un rango entre el 25% y el 30,9%.

De esta manera se puede concluir que la modificación del costo del agotado tiene mayor significancia en el CD_2 donde el rango es de más de 10%, seguido

del 5,9% del CD_4, 5% del CD_2 y el 3,4% del CD_3. Esto implica que el costo del agotado tiene un impacto fuerte en el modelo y debe ser considerado en contextos donde sea común su utilización; a pesar de que los valores promedio de participación no muestren demasiados cambios.

Por último, una de las partes claves de esta investigación es responder a la pregunta de investigación sobre en qué momento conviene abrir y/o cerrar instalaciones, dada la estructura de costos que tiene la compañía bajo estudio. Por ello, la Figura 6 muestra la participación de los costos ante incrementos en el costo de mantener en operación las locaciones, a fin de analizar cómo cambiarían los resultados si la suma de los costos de abrir y cerrar fueran menores que el costo de operación actual.

Los escenarios hasta ahora investigados, muestran que en la situación base no se decide abrir ni cerrar instalaciones, por lo que es necesario encontrar un umbral en el que la formulación propuesta se vea obligada a abrir y/o cerrar alguna locación. Por esta razón, se decide aumentar en diversos múltiplos, el costo de operación de las instalaciones como se puede apreciar en la Figura 6. En conclusión, se determina que es necesario aumentar más de 11 veces el costo de operación de las locaciones, a fin de que la estrategia de cierre y reapertura se ponga en marcha para los escenarios, a fin de evitar el costo alto de operación.

De igual manera en la Figura 6, es posible observar los efectos que provoca el aumento del costo de operación en otros parámetros. Una de las consecuencias es

Tabla 4. Flujo de productos por instalación cuando aumenta o disminuye el costo del agotado.

Instal.	Actual	+20%	+40%	+60%	+80%
CD_1	26,8%	26,5%	24,4%	24,8%	25,7%
CD_2	17,1%	18,0%	18,9%	20,2%	18,8%
CD_3	28,0%	30,5%	30,9%	28,6%	29,2%
CD_4	28,1%	25,0%	25,8%	26,3%	26,3%
Instal.	Actual	-20%	-40%	-60%	-80%
CD_1	26,8%	25,2%	24,4%	21,8%	25,5%
CD_2	17,1%	12,1%	21,0%	22,7%	19,3%
CD_3	28,0%	31,8%	28,4%	29,4%	29,4%
CD_4	28,1%	30,9%	26,2%	26,2%	25,8%

la disminución del costo de mantener inventario a medida que se aumenta el costo de operación en las locaciones y un aumento significativo en los costos de los agotados, hasta que se alcanza un punto de convergencia. Esto se debe principalmente a que existe un número limitado de instalaciones disponibles por ciertos períodos de tiempo, lo que hace que la cantidad de unidades a almacenar en cada una de ellas no supere el inventario mínimo predefinido para cubrir la demanda; por lo que al disminuir inventarios es necesario generar un equilibrio aumentando los agotados. Igualmente se observa que los costos de transporte primario y secundario resultan triviales para este análisis particular, comparando los costos de otras actividades logísticas consideradas bajo los incrementos de los costos operativos de las instalaciones.

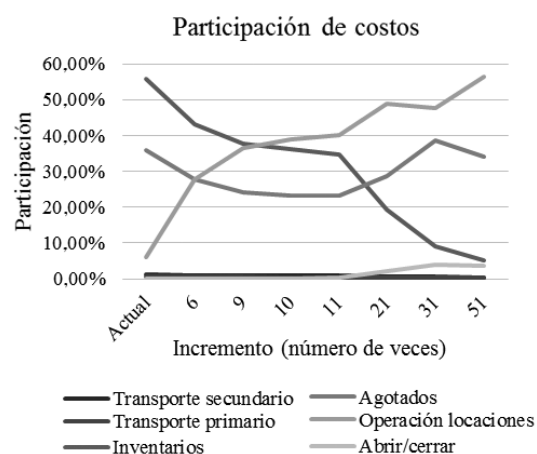


Figura 6. Participación de los costos ante incrementos en el costo de operación de las instalaciones.

También en la Figura 6 se puede observar que para el caso actual, los costos de los agotados y los inventarios son los que mayor participación tienen dentro de la estructura de los costos totales. En general el costo de operación de las instalaciones alcanza al costo de agotados hasta que el primero incrementa en seis veces y alcanza al costo de mantener inventarios cuando se incrementa en nueve veces; demostrando que los costos de los agotados y los inventarios son superiores al resto de los costos de operación de la red. Este hecho podría obligar a la empresa a usar estrategias para disminuir dichos costos y disminuir el impacto de los mismos en el costo logístico total.

Finalmente, también se puede apreciar que después del incremento en 11 veces del costo de operación, el costo de mantener inventarios desciende considerablemente, dado que a partir de ese punto la formulación busca reducir los costos totales empezando a cerrar y abrir locaciones por ciertos períodos de tiempo. Por esta razón, no se presentan costos de inventarios sino de apertura y cierre de locaciones como medida para disminuir el costo de operación en toda la red logística. Como conclusión, cuando el costo de operación rebasa el de los agotados, hay mayor incertidumbre al mantener las instalaciones abiertas, por lo que es más atractivo mantener un nivel adecuado de agotados y no conservar niveles altos de inventarios, dado que no hay instalaciones fijas.

Incluso cuando se ha aumentado más de 51 veces el costo de operación, el costo de inventarios y el de apertura/cierre de instalaciones son similares en magnitud. Por último, otros datos interesantes muestran que el máximo costo de agotados se alcanza en el valor 31, donde hay un punto de inflexión que permite cambiar el incremento a una disminución de dichos costos, dado que los costos de inventarios y de operación también cambian su pendiente. De igual forma cuando aumenta el costo de operación (en más de 11 veces) hay un decremento súbito en el mantenimiento de inventarios, por lo que vuelven a preferirse los agotados.

CONCLUSIONES

La formulación propuesta en esta investigación logra configurar un modelo de red logística considerando el costo ligado al agotado del producto, así como la apertura y cierre de instalaciones a lo largo del horizonte de planeación definido por una empresa. Para ello, se diseña un modelo de programación entera mixta multiperíodo que minimiza los costos de la red logística de una empresa comercializadora de insumos veterinarios con operación nacional en Colombia, cuyos productos son importados mediante un par de puertos colombianos y que cuenta actualmente con cuatro centros de distribución y con una gran cantidad de clientes localizados al interior del país. El modelo considera decisiones de tipo estratégico (apertura y cierre de instalaciones) y de tipo táctico (manejo de agotados e inventarios) en la formulación determinística.

El modelo es resuelto no solo para el caso de estudio planteado con el objetivo de mostrar su utilidad, sino para un conjunto de escenarios adicionales que son generados a partir de la variación en el costo del agotado, con niveles superiores e inferiores al inventario mínimo a partir de la información real del caso base, con el objetivo de analizar el cambio en el nivel de inventario y de agotados, así como en los costos de otras variables. Este análisis de escenarios permite también analizar la robustez del modelo planteado.

Debido a que se realizan variaciones en el costo del agotado para analizar su efecto en agotados, inventarios y otros aspectos logísticos, los resultados muestran cambios significativos en la estructura de los costos totales y en la estrategia logística general. Se demuestra claramente que hay una relación inversamente proporcional entre el costo del agotado y el costo clásico de mantener inventario entre los límites permitidos. Además de que se demuestra que al aumentar en demasía el costo de operación de las instalaciones, es necesario generar estrategias de apertura y cierre de instalaciones, junto con el análisis detallado de combinaciones de inventarios y agotados para la optimización general de los costos logísticos de la red.

Para el caso de apertura de instalaciones se concluye que hay un punto límite donde conviene empezar a cerrar y abrir locaciones, dicho umbral se encuentra cuando el costo de operación de las locaciones alcanza el 40% del costo total de la red analizada. A partir de ese punto, por más ahorros que se presenten en los costos de mantener inventarios, se demuestra que es mejor cerrar instalaciones por ciertos períodos de tiempo, tratando de minimizar el costo de operación y en consecuencia, el costo total.

Se deja como trabajo futuro la formulación de un modelo con un enfoque estocástico, a fin de validar la robustez del modelo al considerar diferentes políticas de inventarios con demanda estocástica. Otra posible extensión es el desarrollo o adaptación de algoritmos tanto exactos como heurísticos para dar solución al modelo bajo estudio con la generación de un mayor número de instancias de prueba.

REFERENCIAS

[1] G.C. Tomassian, G. Pérez-Salas y R.J. Sánchez. "La logística al servicio del desarrollo

económico". En: Políticas integradas de infraestructura, transporte y logística. Comisión Económica para América Latina (CEPAL), pp. 19. Santiago: Chile. 2010.

- [2] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky and E. Simchi-Levi. "Introduction to Supply Chain Management". In *Designing and Managing the Supply Chain*. Irwin McGraw-Hill, pp. 8. New Delhi: India. 2000.
- [3] C. Mejia-Argueta, J. Gaytan-Iniestra y M.P.E. Arroyo-López. "Un enfoque multicriterio para el diseño de una red para el transporte de embarques internacionales". *Contaduría y Administración*, Vol. 59 N° 4, pp. 193-221. 2014.
- [4] D. Hollmann. "Supply Chain network design under uncertainty and risk". PhD dissertation, Department of Mathematics at Brunel University. Uxbridge, Hillingdon. 2011.
- [5] J.V.R. Tony. "Multi-level production and distribution planning with transportation fleet optimization". *Management Science*. Vol. 35. N° 12, pp. 1443-1453. 1989.
- [6] M. Zuo-Jun. "A profit-maximizing supply chain network design model with demand choice flexibility". *Operations Research Letters*. Vol. 34, pp. 673-682. 2006.
- [7] S. Melkote and S.M. Daskin. "Capacitated facility location/network design problems". *European Journal of Operations Research*. Vol. 129, pp. 481-495. 2001.
- [8] V. Gupta, E. Peters and T. Miller. "Implementing a distribution-network decision-support system at Pfizer/Warner-Lambert". *Interfaces*. Vol. 32 N° 4, pp. 28-45. 2002.
- [9] F.T.S. Chan and S.H. Chung. "Multi-criteria genetic optimization for distribution network problems". *International Journal in Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 24, pp. 517-532. 2004.
- [10] B.L. Shankar, S. Basavarajappa and S.R. Kadadevaramath. "Bi-objective optimization of distribution scheduling using MOPSO optimizer". *Journal of Modelling in Management*. Vol. 7 N° 3, pp. 304-327. 2012.
- [11] B.L. Shankar, S. Basavarajappa, S.R. Kadadevaramath and C.H.J. Chen. "A bi-objective optimization of supply chain design and distribution operations using non-dominated sorting algorithm: A case study". *Expert Systems with Applications*. Vol. 40, pp. 5730-5739. 2013.

- [12] C.P. Teo and S. Jia. "Warehouse-retailer network design problem". *Operation Research*. Vol. 52 N° 3, pp. 396-408. 2004.
- [13] J. Shu, C.P. Teo and M.Z.J. Shen. "Stochastic transportation-inventory network design problem". *Operation Research*. Vol. 53 N° 1, pp. 48-60. 2005.
- [14] J. Shu. "An efficient greedy heuristic for warehouse-retailer network design optimization". *Transportation Science*. Vol. 44 N° 2, pp. 183-192. 2010.
- [15] L. Hajibabai and Y. Ouyang. "Integrated planning of supply chain networks and multimodal transportation infrastructure expansion: model development and application to the biofuel industry". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Vol. 28, pp. 247-259. 2013.
- [16] Y. Li, J. Shu, X. Wang, N. Xiu, D. Xu and J. Zhang. "Approximation algorithms for integrated distribution network design problems". *INFORMS Journal on Computing*. Vol. 25 N° 3, pp. 572-584. 2013.
- [17] H. Song, N.V. Hsu and K.R. Cheung. "Distribution coordination between suppliers and customers with a consolidation center". *Operations Research*. Vol. 56 N° 5, pp. 1264-1277. 2008.
- [18] J.W. Escobar, J.J. Bravo and C.J. Vidal. "Supply chain optimization with stochastic parameters by using the sample average approximation method". *Ingeniería y Desarrollo*. Vol. 31 N° 1, pp. 135-160. 2013.
- [19] J.R. Nasiri, R. Zolfaghari and H. Davoudpour. "An integrated supply chain production distribution planning with stochastic demands". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 77, pp. 35-45. 2014.
- [20] M. Bieniek. "A note on the facility location problem with stochastic demands". *Omega: The International Journal of Management Science*. Vol. 55, pp. 53-60. 2015.
- [21] P.A. Miranda and R.A. Garrido. "Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand". *Transportation Research*. Vol. 40, pp. 183-207. 2004.
- [22] W. Klibi, F. Lasalle, A. Martel and S. Ichoua. "The stochastic multiperiod location transportation problem". *Transportation Science*. Vol. 44 N° 2, pp. 221-237. 2010.
- [23] J. Shu, C.P. Teo and Z.J.M. Shen. "Stochastic transportation inventory network design problem". *Operations Research*. Vol. 53 N° 1, pp. 48-60. 2005.