

Methodology for distribution centers location through multicriteria analysis and optimization

Metodología para localización de centros de distribución a través de análisis multicriterio y optimización

Diego Soto-de la Vega ^a, José Geraldo Vidal-Vieira ^b & Eli Angela Vitor-Toso ^c

^a MSc. en Ingeniería de Producción, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, die-soto@hotmail.com

^b Dr. en Ingeniería de Producción, Profesor Universidade Federal de São Carlos, Brasil, jose-vidal@ufscar.br

^c Dr. en Ingeniería de Producción, Profesora Universidade Federal de São Carlos, Brasil, eli@ufscar.br

Received: August 27th, 2013. Received in revised form: October 28th, 2013. Accepted: November 22th, 2013

Abstract

This paper presents a combined methodology based on multicriteria decision analysis and optimization for the distribution centers location problem. The initial approach consists of a set of relevant quantitative and qualitative attributes used for the decision of locating distribution centers. From quantitative criteria a multi-objective mathematical programming model to minimize costs is proposed. This model provides alternative solutions that may be compared to the other ones initially known. These solutions are assessed for a multicriteria decision model which incorporates qualitative considerations of the problem that are infeasible to represent algebraically. Therefore, the application of the multi-criteria decision analysis model evaluates a set of feasible solutions to suggest for the best alternative considering several attributes.

keywords: Distribution centers location problem, Multicriteria Methodology, Optimization.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología combinada de carácter multicriterio basada en análisis de decisión y optimización para el problema de localización de centros de distribución. La metodología consiste en definir un conjunto de atributos relevantes de carácter cuantitativo y cualitativo para la decisión de localizar centros de distribución. A partir de los criterios cuantitativos, un modelo de programación matemática multiobjetivo es propuesto para minimizar los costos asociados. Este modelo genera soluciones alternativas, que pueden ser comparadas con otras soluciones conocidas a priori. Las soluciones son evaluadas por un modelo de decisión multicriterio que incorpora consideraciones cualitativas al problema, que son inviables de representación algebraica. De esta forma, la aplicación del modelo de análisis de decisión multicriterio evalúa un conjunto de soluciones viables para escoger la mejor de las alternativas considerando diversos atributos.

Palabras Clave: Localización de centros de distribución, Metodología Multicriterio, Optimización.

1. Introducción

El problema de localización de instalaciones (Facility Location Problem - FLP) es un problema macro logístico que consiste en determinar el local adecuado para posicionar estratégicamente algunas facilidades, tales como: instalaciones industriales [1–3], centros de distribución [4], instalaciones de asistencia médica [5], instalaciones indeseables (Nimby) [6], entre otros. Para cualquier tipo de instalación a ser localizada, diferentes variables y objetivos deben ser considerados simultáneamente [7–10]. Particularmente, la localización de centros de distribución es un problema discreto que relaciona un conjunto de locales (alternativas) que deben ser evaluados contra un conjunto de criterios ponderados independientes uno del otro. La mejor alternativa para localización es aquella que obtiene mayor

valor considerando diversos criterios de acuerdo con las preferencias y prioridades de los tomadores de decisiones.

En general, la localización de Centros de Distribución (CD) es una decisión poco frecuente, pero que tiene gran impacto en el funcionamiento de toda la cadena de suministros y demanda especial atención de la alta gerencia. El carácter poco frecuente causa que muchos decisores no estén habituados a resolver este tipo de problema, que envuelve una gran complejidad y muchos factores que deben ser considerados simultáneamente en un horizonte de planeación a largo plazo [11].

Enfoques convencionales para localización incluyen heurísticas [4,12], programación entera mixta (MIP), programación dinámica, programación no lineal, programación cuadrática, proceso de análisis jerárquico (AHP) y técnicas de inteligencia artificial (AI), tales como

sistemas especialistas, redes neuronales artificiales (RNA), metaheurísticas o teoría de conjuntos *fuzzy* [13]. Esos enfoques implican un conjunto de pasos sistemáticos para resolver el problema, pero muchas veces no consideran las relaciones entre el costo y otros factores de interés. Además, algunos de esos enfoques no incorporan las preferencias y experiencia del analista (o decisor) que pueden influenciar significativamente la selección final del local.

En los trabajos actuales, la tendencia es considerar gran parte de la red de distribución logística incorporando los otros vértices del triángulo logístico (transporte e inventario), para proponer soluciones cada vez más compensatorias [14–17]. Además, nuevas preocupaciones como el nivel de servicio [11], confiabilidad y responsabilidad social [12,13] han sido incorporadas juntamente en modelos con consideraciones de naturaleza estocástica y dinámicas de la red [2,7].

Aunque diversos enfoques y métodos de solución hayan sido propuestos, existen pocos trabajos que incluyan la combinación de costos de la red logística y las preferencias del decisor que implican criterios cualitativos. Así, el objetivo de este trabajo es presentar una propuesta para tratar los problemas de localización de CD de forma amplia, que utilice la metodología multicriterio para incorporar cuestiones más extensas en la optimización y tratar factores difícilmente cuantificables.

2. Localización de CD

En general el problema de localización de CD aparece cuando nuevas instalaciones deben ser incluidas en una red logística ya existente. Para un dado problema, las nuevas instalaciones son frecuentemente idealizadas como puntos, y pueden ser localizadas en cualquier nodo de la red. Varias restricciones pueden ser establecidas sobre el problema para definir el conjunto de locales potenciales o factibles. Para problemas con una única función objetivo, normalmente se busca minimizar la suma de los costos de transporte proporcionales a las distancias entre las instalaciones, minimizar el máximo entre distancias, minimizar un número total de instalaciones o maximizar la cobertura [18].

Los CD hacen parte de redes logísticas donde existen diversas plantas que envían materiales y varios clientes que precisan ser atendidos. En este problema, se considera la existencia de diversos modos de transporte, además de considerar transporte con flota propia o subcontratada. Estas decisiones interfieren en los costos de toda la operación y deben ser consideradas en la planeación.

Cada local candidato tiene una limitación de capacidad cuyo nivel precisa ser definido por los decisores, o sea, es necesario definir si una instalación será abierta en un nodo candidato y determinar el nivel de capacidad con que será abierta. Esta decisión debe considerar los flujos de material en cada nodo, para que los clientes sean atendidos y sus respectivas capacidades sean respetadas. Este problema envuelve costos con diferente orden de grandeza, por ejemplo, costos fijos de apertura de nuevas instalaciones y costos operacionales de distribución. Además, el problema

involucra otros objetivos como la reducción de tiempos de entrega (*lead time*) en toda la operación de distribución.

La decisión de localización de CD envuelve otras cuestiones y objetivos que no son fácilmente cuantificables: la existencia de infraestructura y posibilidad de expansión en la red; la disponibilidad de mano de obra calificada; incentivos fiscales y cargas tributarias que diferencian los nodos candidatos. El impacto ambiental de las operaciones en la red a lo largo del tiempo es también relevante. Considerando apenas una perspectiva de costo, una solución con menor número de CD de gran capacidad puede ofrecer un menor costo total, pero sin considerar que esta solución puede implicar mayor volumen y distancia de transporte, y consecuentemente mayor emisión de contaminantes.

3. Revisión de literatura

Para la solución de problemas de localización de instalaciones, se observa una tendencia al uso de enfoques pluralista de combinación de varios métodos integrados. Según un estudio realizado por Munro y Mingers [19] con respecto al uso de metodologías combinadas, las técnicas más utilizadas para tratar el problema son: *Soft System Methodology* (SSM); evaluación de escenarios; diagrama de influencia; *Delphi*; análisis de decisión; y mapeo cognitivo. El método *AHP* [20] es el más conocido, utilizado para dar pesos a los atributos del problema, así como los métodos: *Fuzzy* [2,13], *SMART* (*Simple Multiattribute Rating Technique*) [21], *ELECTRE* (*Elimination and Choice Translating Reality*) [21] y *PROMETHEE*.

Al considerar criterios para evaluar localización de instalaciones, el más común es el costo. Pero, una gran variedad de criterios puede ser encontrada en la literatura. Farahani et al. [22] revisaron algunos de estos criterios, de los cuales los de mayor interés fueron: riesgos ambientales, accesibilidad, uso de recursos, costo, acceso a servicios públicos, factores políticos, económicos y reglamentos, competencia, población, capacidad, distancia y oportunidad, entre otros. Por otro lado, objetivos ambientales y sociales con base en costo de energía, congestiónamiento, uso de la tierra, ruido, calidad de vida, polución y la crisis de los combustibles fósiles están tornándose cada vez más comunes [22]. En consecuencia, una dificultad importante para resolver esos problemas es encontrar una forma de medir esos criterios e incorporarlos en el modelo de decisión. Esto ha llamado la atención de administradores y académicos.

De las diversas metodologías existentes para solución del problema, la propuesta por Montibeller y Franco [23] es particularmente interesante. Esta metodología está basada en modelos de valor según las preferencias del decisor (Figura 1).

La Figura 1 muestra la metodología en etapas. Es posible en la etapa 4, considerar modelos matemáticos para tratar atributos cuantitativos y generar un conjunto de alternativas a ser evaluadas en relación a todos otros criterios.

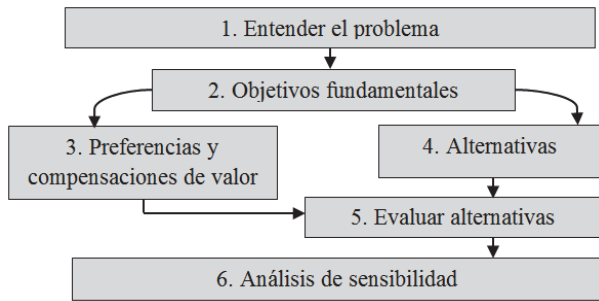


Figura 1. Estructura metodológica. Fuente: tomado de [23]

4. Enfoque propuesto

El enfoque propuesto en este trabajo consiste en la incorporación de un modelo matemático en la metodología multicriterio presentada por [23] para tratar el problema de localización de CD. El modelo matemático es formulado con varios objetivos y genera alternativas para la evaluación. Así, la metodología multicriterio para el problema tratado sigue la estructura presentada en la Figura 1 y cada una de las etapas es descrita detalladamente a continuación.

4.1. Descripción del problema

La etapa 1 consiste en definir el problema de localización de centros de distribución de acuerdo con los decisores. Los criterios para evaluación del problema son establecidos, las restricciones e suposiciones son establecidas. Esta etapa es realizada por medio de entrevistas con los decisores.

4.2. Determinación de los objetivos fundamentales

Los objetivos fundamentales (etapa 2) son definidos de acuerdo con la preferencia de los decisores. Estos objetivos representan los atributos o criterios del decisor que cuando agrupados de forma estructurada representan el árbol de decisión del problema.

Cada objetivo es una afirmación de lo que se desea alcanzar en el contexto de la decisión. Para hacer explícito el objetivo, es necesario describir sus tres componentes: contexto de la decisión, el objeto y la dirección de preferencia [24]. Así, los decisores aportan un conjunto preliminar de atributos de acuerdo con el valor (preferencia) y el objetivo de la decisión. Luego, la decisión debe ser basada en el “Pensamiento de Valor” y no en el “Pensamiento de las Alternativas” [25].

La recomendación a ser efectuada se basa en la función de valor global, representada en la ecuación (1) de [25]. La alternativa que presente mayor valor en esta función debe ser la recomendada.

$$V(a) = \sum_{i=1}^m k_i v_i(x_i(a_i)) \quad (1)$$

Donde, a representa la alternativa en evaluación, $V(a)$ es el valor global de la función de utilidad del decisor de la alternativa a ; i representa los atributos de medición de los

criterios del problema; $x_i(a_i)$ es el desempeño de la alternativa a en relación al atributo i ; $v_i(\cdot)$ es la función de valor parcial de la alternativa a en relación al atributo i ; k_i es el peso del atributo i , que se refiere a la medición del grado de importancia de cada objetivo [23].

La ejecución de esta etapa envuelve entrevistas con los decisores o bien puede ser construida de forma generalizada por medio de cuestionarios a un grupo de decisores [26]. El resultado sugiere un árbol de valor con los respectivos atributos.

4.3. Preferencia y compensaciones de valor

Para el conjunto de atributos definidos es necesario hacer una valoración (etapa 3), o sea, definir la unidad de medida y límites para cada atributo. Cada atributo debe obedecer cinco propiedades [27]: no ser ambiguo; ser exhaustivo; ser operacional; tener aplicación directa y ser de fácil comprensión. Ellos también deben ser organizados de forma jerárquica.

Los atributos pueden ser clasificados en cualitativos o cuantitativos. Los atributos cualitativos son aquellos que poseen cierto grado de subjetividad, como: imagen de la empresa, entre otros. Estos atributos pueden ser cuantificados a través de un esfuerzo por encontrar indicadores relacionados o utilizando la percepción de los decisores. Así, pueden ser definidos en una escala de cero (0) a cien (100) dando mayor calificación a las alternativas más deseadas. Los atributos cuantitativos suponen la utilización de indicadores objetivos y que pueden ser objeto de una medición directa. Estos atributos pueden ser de comportamiento lineal y no lineal. Para la determinación de la curva de valor de los atributos puede ser utilizado el método de la bisección [21].

4.3.1. Jerarquización de los criterios

Implica atribuir ponderaciones (pesos) para indicar las preferencias de los decisores en relación al conjunto de atributos (etapa 3.1). Los pesos pueden ser atribuidos entre niveles superiores y luego para los niveles inferiores, hasta completar cada atributo. El método *AHP* es una herramienta atractiva para ponderación cuando existen conflictos entre varios objetivos, pues la comparación pareada de los criterios permite obtener una valoración generalizada cuando el análisis se concentra solamente en dos factores.

4.4. Formulación del modelo matemático

Aquellos criterios fácilmente cuantificables pueden hacer parte de un modelo matemático (etapa 4). Algunas restricciones pueden ser utilizadas para incluir el nivel de expansión deseado, garantía de capacidad, entre otros. No todos los criterios podrán ser incluidos en el modelo matemático, pues existen algunos difícilmente cuantificables como: condiciones sindicales, fuerza competitiva, entre otros, que serán parte de la metodología multicriterio. La idea en esta fase es ofrecer un conjunto de soluciones factibles que permitan mejorar las funciones objetivo definidas. Los diferentes objetivos dependerán del problema tratado y de las preferencias del decisor.

4.4.1. Determinación de alternativas

Una empresa generalmente tiene en mente locales potenciales para instalación de sus CD. Estos locales candidatos son representados como nodos en la red de distribución. Luego el modelo matemático multiobjetivo a partir de la red especificada, define un conjunto de soluciones factibles. Es importante agregar información relevante de las alternativas que no hayan sido considerados en análisis previos. Esta fase puede ser realizada de paralelamente a las dos primeras fases.

4.5. Evaluación de alternativas

Las soluciones generadas por el modelo matemático representan datos de entrada (alternativas) para el modelo multicriterio (etapa 4.5). Así, por medio de funciones de valor y de los pesos definidos por los decisores para cada atributo es posible evaluar un valor global para cada solución.

4.6. Análisis de sensibilidad (etapa 6)

Tiene como objetivo verificar la robustez de la solución.

El software V.I.S.A. Interactive Sensitivity Analysis. será utilizado para seleccionar la mejor alternativa de acuerdo con las preferencias de los decisores. Esta herramienta permite modificar los pesos de los criterios y observar cómo esas variaciones afectan el resultado.

5. Validación

La validación de esta propuesta referente a la combinación de metodología multicriterio con modelación matemática para el problema de localización de CD, está fundamentada en la realización de las etapas descritas en la sesión 4 con valoraciones reales en un contexto teórico. La descripción y clasificación del problema (etapa 1), definición de objetivos fundamentales (etapa 2) y sus medidas de desempeño, así como las preferencias y la evaluación de las compensaciones de valor fueron realizadas por medio de entrevistas con gerentes de centros de distribución que participaron activamente de la implantación de nuevas instalaciones. La sesión 2 presenta el resultado de las etapas 1 (descripción del problema) y 2 (definición de los objetivos fundamentales). Además, la Tabla 1 presenta el árbol de decisión para el problema, con los respectivos indicadores, unidades de medida y valoración de los atributos.

Tabla 1.
Criterios para localización de CD

ATRIBUTOS	INDICADOR	Unid.	Valor
1. COSTO			66,67%
1.1. Inversión	Valor presente líquido (VPL)	\$	75%
1.2. Costo operacional			25%
1.2.1. Costo de operación	Costo variable	\$/mes	75%
1.2.2. Costo de la mano de obra	Costo variable	\$ x mil	25%
2. BENEFICIO			33,33%
2.1. Características del trabajo			4,3%
2.1.1. Disponibilidad de mano de obra calificada	Cualitativo	Escala	100%
2.2. Infraestructura			34,9%
2.2.1. Existencia de modos de transporte	Cualitativo	Escala	12%
2.2.2. Posibilidad de expansión	Área total	m ²	52,8%
2.2.3. Sistemas de telecomunicación	Cualitativo	Escala	33,2%
2.3. Ambiente macro			12,4%
2.3.1. Tasas e impuestos	Costo	\$	33,33%
2.3.2. Impacto ambiental	Emisión de CO2	t/mes	33,33%
2.3.3. Incentivos fiscales	VPL	\$	33,33%
2.4. Mercado			24,2
2.4.1. Proximidad con el cliente	Sumatoria de distancias	Km	66,7%
2.4.2. Proximidad con el proveedor	Sumatoria de distancias	Km	33,3%
2.5. Lead time de la red	Tiempo de entrega	días	24,2%

En la modelación de preferencias (etapa 3), fueron diseñadas curvas de valor para cada uno de los criterios a partir de la percepción de los evaluadores. Estas curvas miden la fuerza relativa de las preferencias de los decisores con respecto a cada atributo para las alternativas de localización establecidas.

Las comparaciones entre los diferentes criterios del mismo nivel jerárquico (etapa 3.1) fueron realizadas utilizando el método *AHP*. El software *EXPERT CHOICE* fue utilizado para los cálculos y transformar las comparaciones en pesos normalizados (última columna de la Tabla 1), así como para verificar la consistencia de las comparaciones. El trabajo de [20] ejemplifica el uso de *AHP* y del aplicativo *EXPERT*

CHOICE como soporte para un problema de selección de vehículos en un astillero colombiano.

Observe en la Tabla 1 que el árbol involucra los siguientes criterios cuantitativos: costos de inversión; costos de operación y *lead time* de la red de suministros. Estos criterios permiten la proposición de un modelo matemático multicriterio descrito por programación multiobjetivo para generar alternativas de solución factibles (etapa 4). El modelo es presentado a continuación:

Índices y parámetros

- j Índice de las plantas.
- k Índice de potenciales CD.
- l Índice de los clientes (Minoristas).
- m Índice de los modales de transporte.

- v Índice de la flota propia.
- r Índice de los posibles niveles de capacidad de los CD.
- C_{jkm} Costo unitario de transporte desde la planta j para el CD k en el modal m .
- C'_{klv} Costo unitario de distribución desde el CD k para el cliente l en el tipo de vehículo v .
- CS_{kl} Costo unitario de distribución desde el CD potencial k para el cliente l con transporte subcontratado.
- t_{jkm} Tiempo de transporte desde la planta j hasta el CD potencial k en el modal m .
- t'_{klv} Tiempo de distribución desde el CD potencial k hasta el cliente l en el vehículo propio v .
- tS_{kl} Tiempo de distribución desde el CD potencial k hasta el cliente l de forma subcontratada.
- f_k^r Capital necesario para abrir el CD potencial k con nivel de capacidad r .
- a_k Costo de operación unitario en el CD potencial k .
- b_k^r Capacidad del CD potencial k cuando es abierto con nivel de capacidad r .
- D_l Demanda mensual estimada para el cliente l .
- e_j Capacidad de producción de la fábrica j .
- Cap_v Capacidad de transporte del vehículo propio v .
- RM_{mjk} 1 si el modal m está disponible para el transporte desde la planta j para el CD potencial k , 0 caso contrario.
- RV_{vl} 1 si el vehículo tipo v tiene acceso al cliente l , 0 caso contrario.
- θ Mínimo porcentaje de utilización aceptado para los CD abiertos.
- \mathcal{M} Número muy grande.

Variables

- X_{jkm} Cantidad de producto transportado desde la planta j para el CD potencial k en el modal m .
- Y_{klv} Cantidad de producto distribuido desde el CD k para el cliente l en el tipo de vehículo v .
- Z_{kl} Cantidad de producto distribuido de forma subcontratada desde el CD k hasta el cliente l .
- χ_{jkm} 1 si el modal m es utilizado en el transporte de productos desde la planta j para el CD potencial k , 0 caso contrario.
- ψ_{klv} 1 si el vehículo propio v es utilizado en la distribución desde el CD k para el cliente l , 0 caso contrario.
- ω_{kl} 1 si el transporte subcontratado es utilizado en la distribución desde el CD para el cliente l , 0 caso contrario.
- U_k^r 1 si el CD k es abierto con nivel de capacidad r , 0 caso contrario.
- IV_{klv} 1 si el vehículo v es usado para distribuir desde el CD potencial k para el cliente l , 0 caso contrario.
- NV_v Número de vehículos v utilizados.

5.1 Ecuaciones

La función objetivo (2) minimiza los costos de transporte relacionados al suministro de los CD, costos para distribución a partir de los CD, considerando flota propia y subcontratada, y costos operacionales de cada CD. La función objetivo (3) minimiza los *lead times* de la cadena de suministros (tiempos desde las fabricas hasta los CD y después hasta los clientes). La función objetivo (4) minimiza la inversión por abrir los CD de diversas capacidades.

$$\begin{aligned} \min F1 = & \sum_j \sum_k \sum_m C_{jkm} X_{jkm} \\ & + \sum_k \sum_l \sum_v C'_{klv} Y_{klv} \\ & + \sum_k \sum_l CS_{kl} Z_{kl} + \sum_j \sum_k \sum_m a_k X_{jkm} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \min F2 = & \sum_j \sum_k \sum_m t_{jkm} \chi_{jkm} + \sum_k \sum_l \sum_v t_{klv} \psi_{klv} \\ & + \sum_k \sum_l tS_{kl} * \omega_{kl} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\min F3 = \sum_k \sum_r f_k^r * U_k^r \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_k \sum_v Y_{klv} + \sum_k Z_{kl} \geq D_l \quad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_j \sum_m X_{jkm} * RM_{jkm} \geq \sum_l \sum_v Y_{klv} + \sum_l Z_{kl} \quad \forall k \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_m X_{jkm} \sum_r b_k^r * U_k^r \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_v Y_{klv} + \sum_l Z_{kl} \geq \theta * U_k^r \quad \forall k, r \quad (8)$$

$$\sum_r U_k^r \leq 1 \quad \forall k \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_k X_{jkm} \leq e_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$Y_{klv} \leq Cap_v * RV_{vl} * IV_{klv} \quad \forall k, l, v \quad (11)$$

$$NV_v = \sum_k \sum_l IV_{klv} \quad \forall v \quad (12)$$

$$X_{jkm} \leq \chi_{jkm} * \mathcal{M} \quad \forall j, k, m \quad (13)$$

$$Y_{klv} \leq \psi_{klv} * \mathcal{M} \quad \forall k, l, v \quad (14)$$

$$Z_{kl} \leq \omega_{kl} * \mathcal{M} \quad \forall k, l \quad (15)$$

$$\chi_{jkm} \leq X_{jkm} \quad \forall j, k, m \quad (16)$$

$$\psi_{klv} \leq Y_{klv} \quad \forall k, l, v \quad (17)$$

$$\omega_{kl} \leq Z_{kl} \quad \forall k, l \quad (18)$$

$$X_{jkm}, Y_{klv}, Z_{kl} \in \mathbb{R}^+, \chi_{jkm}, \psi_{klv}, \omega_{kl}, U_k^r \in \{0,1\} \quad (19)$$

$$e \in NV_v \in \mathbb{Z}^+$$

La restricción (5) garantiza la satisfacción de la demanda, la restricción (6) garantiza el flujo entre entradas y salidas en los CD, obedeciendo las restricciones de acceso por modal. Las ecuaciones (7) y (8) garantizan las capacidades máximas y mínimas de los CD, mientras la restricción (9) garantiza que los CD sean abiertos con una única capacidad. La ecuación (10) restringe las capacidades de las plantas y la ecuación (11) a las capacidades de los vehículos propios utilizados, mientras la restricción (12) calcula el número total usado. El conjunto de restricciones (13-18) garantiza la atribución de 1 a las variables binarias cuando existen cantidades transportadas. Finalmente la restricción (19) define el dominio de las variables.

Dos propuestas para incorporar las diferentes funciones objetivo en un mismo modelo, son:

$$\min D = w_1 \left(\frac{F1}{F1^*} \right) + w_2 \left(\frac{F2}{F2^*} \right) + w_3 \left(\frac{F3}{F3^*} \right) \quad (22)$$

$$\min MD = \max \left\{ w_1 \left(\frac{F1}{F1^*} \right), w_2 \left(\frac{F2}{F2^*} \right), w_3 \left(\frac{F3}{F3^*} \right) \right\} \quad (23)$$

Donde w_1, w_2 y w_3 son los pesos relativos de cada función objetivo que pueden ser definidos como valores entre 1 (máxima prioridad) y 0 (sin prioridad) a criterio del analista. Aquí $F1^*, F2^*$ y $F3^*$ son los valores óptimos de cada función, también llamados de *valores metas*. La ecuación (22) minimiza la suma ponderada de los desvíos porcentuales de los objetivos del problema, mientras la ecuación (23) minimiza el máximo de los desvíos porcentuales.

De esta forma, fueron propuestos los siguientes modelos enteros mixtos: *A*, correspondiente al modelo (2)(5-19); *B*, que corresponde a (3)(5-19); *y*, *C* al (4-19), y los modelos de programación multiobjetivo: *D*, que incluye las ecuaciones (22)(5-19); *y*, *E* (23)(5-19). Estos modelos fueron codificados en el lenguaje de modelación *GAMS* y resueltos en un computador con procesador Intel Core i5-2430M con 2.4GHz de RAM con el *solver CPLEX* versión 12.3. Para eso, inicialmente se resolvieron los tres primeros modelos, para obtener los valores metas $F1^*, F2^*$ e $F3^*$.

Después del desarrollo del modelo matemático, es posible determinar las alternativas (etapa 6). Cada uno de los cinco modelos propuestos genera una alternativa de solución de acuerdo con la función objetivo. Además, pueden ser incorporadas soluciones alternativas definidas

por los decisores que tengan buen impacto en relación a los criterios cualitativos. Vale resaltar que estas soluciones alternativas deben ser factibles para las restricciones (5-19).

Para las soluciones creadas por el modelo matemático, fueron asignados valores aleatorios para los atributos cualitativos basados en los límites y proporcionalidades de los datos provistos por los gerentes. Las soluciones del problema multiobjetivo son presentadas en las Tablas 2 y 3. Los nombres de los atributos están descritos en la Tabla 1.

Note en la tabla 2 que la solución óptima del modelo A (que minimiza costo de operación) es abrir el CD 3 en el nivel de capacidad medio (2) y en CD 5 en el nivel de capacidad bajo (1). Para el modelo C (que minimiza la inversión) la solución óptima es abrir un único centro de distribución, CD 1, con la máxima capacidad (3). Nótese también que los modelos multiobjetivos D y E ofrecen más de una solución (D_1, D_2, E_1, E_2, E_3). Estas soluciones son llamadas en programación multiobjetivo como “soluciones no dominadas” y pueden ser obtenidas variando los pesos de las metas ($w_1 - w_2 - w_3$) a criterio del analista. Para el caso, dos y tres variaciones fueron realizadas para los modelos D y E respetivamente. Para el modelo D, por ejemplo, los pesos usados fueron (1-0-1) y (0-1-1). Para mayores detalles de este método el lector puede consultar a [28].

Tabla 2. Alternativas: valores definidos con el modelo matemático

Modelo	CD Abierto (Nivel Capacidad)	Inversión - \$	Costo Operación - \$/mes	Lead Time - días
<i>A</i>	3(2) 5(1)	166.620.000	41.980.000	29,57
<i>B</i>	2(2) 3(1) 4(1)	240.420.000	50.916.000	16,98
<i>C</i>	1(3)	93.145.000	66.690.000	29,04
<i>D</i> ₁	7(3)	95.018.571	45.091.959	25,66
<i>D</i> ₂	2(3)	95.715.851	59.021.395	20,98
<i>E</i> ₁	3(2) 8(1)	173.599.425	42.909.823	29,42
<i>E</i> ₂	3(1) 4(1) 7(2)	229.449.504	44.953.188	18,53
<i>E</i> ₃	1(2) 3(1)	150.646.514	59.455.773	19,09

Posteriormente, la evaluación de las alternativas (etapa 5) compara las diferentes propuestas de localización resultantes en relación a cada criterio y meta propuesta. En esta etapa, las soluciones fueron incorporadas a la estructura decisoria construida en V.I.S.A. Los resultados indicaron como alternativa recomendada, la generada por el modelo *D*₁ (abrir CD7). La clasificación general en orden de preferencia es presentada a seguir: $D_1 > D_2 > E_3 > B > A > E_1 > E_2 > C$.

Tabla 3. Alternativas: otros valores además de los costos

Modelo	1.2.2	2.1.1	2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.3.1	2.3.2	2.4.3	2.4.1	2.4.2
<i>A</i>	1.019	Poca	Pobre	265000	Bueno	225.000	1.1	1.094	4100	4850
<i>B</i>	1.700	Moderada	Regular	450000	Bueno	214.000	2.3	1.300	4483	4983
<i>C</i>	3.143	Poca	Regular	1000000	Pobre	160.000	4.8	2.062	4500	4850
<i>D</i> ₁	2.141	Suficiente	Excelente	310000	Regular	240.000	3.8	1.423	6000	4500
<i>D</i> ₂	2.276	Moderada	Regular	700000	Bueno	200.000	5.0	1.475	4500	6000
<i>E</i> ₁	2.949	Moderada	Pobre	525000	Regular	205.000	1.3	2.382	4850	4500
<i>E</i> ₂	3.582	Moderada	Regular	320000	Regular	227333	2.0	1.282	4983	4483
<i>E</i> ₃	3.427	Escasa	Pobre	650000	Pobre	190.000	2.7	1.350	4850	4100

Después de evaluar las alternativas, el análisis de sensibilidad (etapa 6) permite al decisor verificar que tan robusta es su decisión provisional en relación a posibles alteraciones en las preferencias de los criterios definidos. De esta forma, fueron realizadas variaciones importantes en los pesos relativos de los criterios más importantes: *beneficio e inversión*.

La Figura 2 presenta las soluciones sugeridas cuando variaciones en la relación costo-beneficio son realizadas. Se observa que cuando la prioridad del beneficio alcanza 44%, la alternativa sugerida es la generada por el modelo *B*. Cuando el peso aumenta más allá del 70%, la alternativa sugerida es la creada por el modelo *E₂*. El intervalo porcentual en el cual la solución provisional, generada por el modelo *D₁*, se mantiene como la más preferida es el que presenta el beneficio evaluado entre 20-44%.

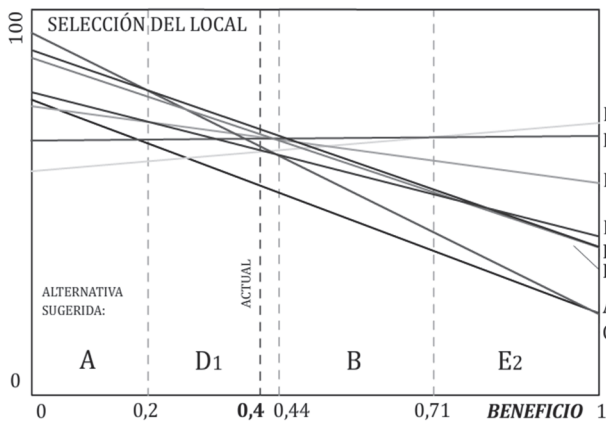


Figura 2. Variación en la prioridad del Beneficio

La Figura 3, por otra parte, presenta los resultados de las variaciones en el peso del criterio *Inversión*. Note pesos superiores a 80% sugiere la alternativa generada por el modelo *E₃* como la más adecuada. Contrariamente, si el peso del criterio disminuye hasta 67%, la solución generada por el modelo *B* sería la elección más recomendable.

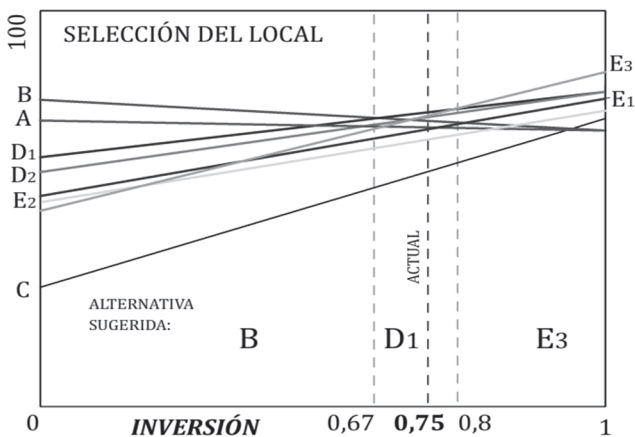


Figura 3. Variación en la prioridad de Inversión

Después de la realización de análisis de sensibilidad, la solución generada por el modelo *D₁* se muestra como la más

recomendable. Note que esta elección no representa la mejor alternativa en relación a la minimización de costos de inversión, costo operacional o *lead time*, pero ciertamente parece ser la que ofrece las disposiciones y compensaciones más adecuadas para el decisor y aquella con mejor compromiso en relación a los funciones objetivo y los posibles escenarios estudiados.

6. Conclusión

Este trabajo propone una metodología combinada para el problema de localización de instalaciones considerando los diversos criterios estratégicos cualitativos y cuantitativos relacionados a la decisión. Un conjunto de factores relevantes a la toma de decisiones para la localización de centros de distribución tanto propuestos en la literatura como por decisores en situaciones reales fueron usados para resolver un problema teórico. Un modelo matemático multiobjetivo fue propuesto para considerar el conjunto de costos y restricciones de una red de distribución. Las alternativas fueron evaluadas considerando la combinación de dos enfoques. El modelo matemático filtra las soluciones no factibles y optimiza los criterios de evaluación propuestos en diferentes funciones objetivo. La metodología propuesta permite la consideración de las preferencias reales de los decisores a través del análisis multicriterio y agrega cierto grado de objetividad y optimización al considerar el modelo matemático implícito.

La solución sugerida por la metodología puede representar un resultado más compensatorio, pues es capaz de emular las preocupaciones reales del tomador de decisiones, las cuales muchos otros modelos no examinan, además de considerar los beneficios y los costos palpables de la red al utilizar un conjunto de soluciones eficientes del modelo matemático.

Referencias

- [1] Amiri, A., Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure, *European Journal of Operational Research*, vol. 171(2), pp. 567–576, 2006.
- [2] Kanani Nezhad, A.A., Roghanian, E. and Azadi, Z., A fuzzy goal programming approach to solve multi-objective supply chain network design problems *International Journal of Engineering Computations*, vol. 4(3), pp. 315–324, 2013.
- [3] Duarte, A. E., Sarache, W. A. and Cardona, C. A., Cost analysis of the location of colombian biofuels plants, *Dyna*, vol. 79(176), pp. 71–80, 2012.
- [4] Barahona, F. and Jensen, D., Plant location with minimum inventory, *Mathematical Programming*, vol. 83, pp. 101–111, 1998.
- [5] Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M. and Goh, M., Covering problems in facility location: A review, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62 (1), pp. 368–407, Feb. 2012.
- [6] Crespo, F. A. and Paredes, R. D., Un mecanismo para localización eficiente y equitativa de nimby, *Dyna*, vol. 76(160), pp. 293–303, 2009.
- [7] Awasthi, A., Chauhan, S. S. and Goyal, S. K., A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty, *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 53(1–2), pp. 98–109, Jan. 2011.

- [8] Bu, L., Van Duin, J. H. R., Wiegmans, B., Luo, Z. and Yin, C., Selection of City Distribution Locations in Urbanized Areas, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 556–567, Jan. 2012.
- [9] Datta, S., Multi-criteria multi-facility location in Niwai block, Rajasthan, *IIMB Management Review*, vol. 24(1), pp. 16–27, Mar. 2012.
- [10] Partovi, F., An analytic model for locating facilities strategically, *Omega*, vol. 34(1), pp. 41–55, 2006.
- [11] Ballou, R. H., *Logística empresarial: Gerenciamento da cadeia de suprimentos*, Bookman. Porto alegre, 2006.
- [12] Sun, H., Gao, Z. and Wu, J., A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32(4), pp. 610–616, Apr. 2008.
- [13] Kahraman, C., Ruan, D. and Doğan, I., Fuzzy group decision-making for facility location selection, *Information Sciences*, vol. 157, pp. 135–153, Dec. 2003.
- [14] Klose, A. and Drexl, A., Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research*, vol. 162(1), pp. 4–29, 2005.
- [15] Ambrosino, D. and Grazia Scutellà, M., Distribution network design: New problems and related models, *European Journal of Operational Research*, vol. 165(3), pp. 610–624, Sep. 2005.
- [16] JabalAmeli, M. S. and Mortezaei, M., A hybrid model for multi-objective capacitated facility location network design problem, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 2(3), pp. 509–522, 2011.
- [17] Arabani, A. and Farahani, R., Facility location dynamics: An overview of classifications and applications, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62(1), pp. 408–420, Feb. 2012.
- [18] Tansel, B. C., Francis, R. L. and Lowe, T. J., Location on networks: A survey. Part I: The p-center and p-median problems, *Management Science*, vol. 29(4), pp. 482–497, 1983.
- [19] Munro, I. and Mingers, J., The use of multimethodology in practice results of a survey of practitioners, *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 53(4), pp. 369–378, 2012.
- [20] Patricia, S. and Martínez, M., Expertchoice © Decision Support System Implementation For Vehicle Selection In A Colombian Shipyard, *Dyna*, vol. 79(173), pp. 53–60, 2012.
- [21] Goodwin, P. and Wright, G., *Decision Analysis for Management Judgment*, 3rd ed. England, 2005.
- [22] Farahani, R., SteadieSeifi, Z. M. and Asgari, N., Multiple criteria facility location problems: A survey, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34(7), pp. 1689–1709, 2010.
- [23] Montibeller, L. A. and Franco, G., Decision and risk analysis for the evaluation of strategic options. In: O'BRIEN, F.A.; DYSON, R.G. (eds). *Supporting Strategy: Frameworks, Methods and Models*. Chichester: Wiley, 2007, pp. 251–284.
- [24] Barker, T. J. and Zabinsky, Z. B., A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process, *Omega*, vol. 39(5), pp. 558–573, Oct. 2011.
- [25] Keeney, R. L., Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives., *European Journal of Operational Research*, vol. 92, pp. 537–549, 1996.
- [26] Loken, E., Botterud, A. and Holen, A. T., Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems., *European Journal of Operational Research*, vol. 197, pp. 1075–1083, 2009.
- [27] Keeney, R. L. and Gregory, R. S., Selecting attributes to measure the achievement of objective, *Operations Research*, vol. 53, pp. 1–11, 2005.
- [28] Munhoz, J. R. and Morabito, R., Modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de suco concentrado congelado de laranja, *Gestão & Produção*, vol. 8(2), pp. 139–159, 2001.