



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Buitrago Suescún, Oscar; Palacio León, Oscar; Britto Agudelo, Rodrigo; Adarme Jaimes, Wilson

Propuesta metodológica para la selección de la configuración de centros de distribución  
inmóticos utilizando análisis envolvente de datos

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 24, núm. 3, julio, 2016, pp. 480-492

Universidad de Tarapacá

Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77246569012>

- 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

## **Propuesta metodológica para la selección de la configuración de centros de distribución inmóticos utilizando análisis envolvente de datos**

*A proposed methodology for the selection of the inmotoc distribution centers configuration using data envelopment analysis*

Oscar Buitrago Suescún<sup>\*1, 2</sup>      Oscar Palacio León<sup>1, 2</sup>  
Rodrigo Britto Agudelo<sup>3</sup>      Wilson Adarme Jaimes<sup>4</sup>

Recibido 3 de octubre de 2014, aceptado 16 de diciembre de 2015

*Received: October 3, 2014      Accepted: December 16, 2015*

### **RESUMEN**

En este artículo se propone la incorporación del Análisis Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés), a la metodología para el emplazamiento inmótico de naves de almacenamiento sostenible ajustada (MEINASA), con el propósito de hacerla más robusta para su aplicación en el diseño de sistemas productivos destinados al bodegaje de productos no perecederos, considerando los intereses del cliente y de los eslabones comprador- proveedor en redes de suministros. Se emplea MEINASA en un caso real de diseño de un centro de distribución para una empresa productora de grifos y mediante la aplicación de DEA a las 16 propuestas generadas se les calcula un índice de eficiencia, obteniéndose cinco diseños eficientes, los que pueden ser asignados como pares de mejoramiento a los restantes. Los resultados pueden ser útiles para establecer modificaciones los diseños identificados como ineficientes.

Palabras clave: Análisis envolvente de datos (DEA), metodología general ajustada, inmótica, proyectos inmobiliarios de tipo industrial, inmótica.

### **ABSTRACT**

*This paper proposes the incorporation of data envelopment analysis (DEA) to the methodology for the construction of a sustainable adjustable inmotoc storage hall (MEINASA in spanish), in order to make it more robust for application in the design of production systems for warehousing of non-perishable products, given the interests of the client and the buyer-supplier echelon in the supply networks. MEINASA is used in a real design case of a distribution center for a manufacturer of faucets and DEA is applied to calculate the efficiency index of the 16 generated proposals, obtaining five efficient designs which can be assigned as peers for improvement of the remaining ones. The results suggest possible modifications that can be made on the designs identified as inefficient.*

*Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), adjusted general methodology, industrial real estate project, inmotoc.*

---

<sup>1</sup> Ingeniería Industrial. Universidad Militar Nueva Granada. Cra 11 N° 101-80. Bogotá, Colombia.  
E-mail: oscar.buitrago@unimilitar.edu.co

<sup>2</sup> Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. E-mail: oscar.palacio@unimilitar.edu.co

<sup>3</sup> Facultad de Administración. Universidad de Los Andes. Calle 21 N° 1-20. Bogotá, Colombia. E-mail: ro-britt@uniandes.edu.co

<sup>4</sup> Departamento de Sistemas e Industrial. Universidad Nacional de Colombia. Cra 45 N° 26-85. Bogotá, Colombia.  
E-mail: wadarme@unal.edu.co

\* Autor de correspondencia

## INTRODUCCIÓN

La complejidad actual de las redes de suministro ha llevado a que las organizaciones trabajen de forma conjunta y coordinada en la búsqueda de un alto nivel de servicio a un costo apropiado. En particular y dependiendo de la política de suministro pactada, la dupla comprador-vendedor debe recurrir a técnicas de cooperación en gestión de almacenes [1-2]. Por tanto, el diseño de los Centros de Distribución (CD) se convierte en un importante aspecto estratégico que impacta en la satisfacción de las expectativas, tanto de los dos eslabones involucrados, como del cliente. Se requiere, entonces, la aplicación de una Metodología General Ajustada (MGA) para evaluar este tipo de Proyectos Inmobiliarios de Tipo Industrial (PITI).

En este contexto, los avances tecnológicos permiten, y hacen deseable, que en el diseño de un PITI se consideren conceptos de inmótica, pues con ellos se reducen los consumos energéticos, se incrementa el nivel de conectividad, se proporciona un mayor confort y condiciones adecuadas de seguridad industrial.

En el presente trabajo se utiliza la Metodología para el Emplazamiento Inmótico de Naves de Almacenamiento Sostenible Ajustada (MEINASA), propuesta por [3-4], y que considera aspectos logísticos, de diseño y de sistemas productivos y financieros, para obtener diferentes propuestas de diseño. Se toma como criterio de decisión el Beneficio Actualizado Neto Ajustado (BANA), calculado en un horizonte de diez años.

La desventaja de este enfoque es que realiza la selección del diseño final del CD, considerando solamente un factor, el BANA. Para hacer MEINASA más robusta, se propone incorporarle, a esta, una etapa de aplicación de Análisis Envolvente de Datos (DEA). El valor agregado radica en que se obtiene una medida de eficiencia relativa para cada propuesta de CD (clasificándolas en eficientes e ineficientes) y se puede medir la importancia que en cada diseño se le asigna a cada uno de los factores considerados en el mismo (no solo el BANA). Si un diseño es clasificado como ineficiente, los mismos resultados de DEA indicarán en cuanto deben disminuirse los costos de construcción del

edificio inmótico, los logísticos de operación y los asociados al WMS, para que se convierta en eficiente.

Con ello, el tomador de la decisión final incrementa su abanico de posibilidades, puesto que puede elegir dentro de los diseños calificados como eficientes o modificar alguno de los catalogados como ineficientes, puesto que tiene resultados cuantitativos para saber hasta que valores disminuir los costos, manteniendo los mismos niveles de BANA, la distancia de *picking* y precios de venta. Con la integración DEA-MEINASA se espera contribuir con una metodología robusta para el diseño de PITI, aplicable en el contexto de la logística. Para fines de ilustración se realiza una aplicación de diseño de un CD para una empresa productora de grifos en la ciudad de Bogotá.

El artículo se divide de la siguiente forma: a) las definiciones y descripciones de proyectos inmobiliarios de tipo industrial (PITI); b) La metodología general ajustada haciendo énfasis en MEINASA y análisis envolvente de datos; c) La propuesta DEA-MEINASA; d) El caso de aplicación y los resultados obtenidos para finalizar con las conclusiones.

## PROYECTOS INMOBILIARIOS DE TIPO INDUSTRIAL (PITI)

Un proyecto es la búsqueda de una solución a un problema. Está definido por un conjunto de actividades interrelacionadas, con tiempos de inicio y terminación establecidos, con recursos limitados y expuesto a factores de riesgo. En el caso de los proyectos inmobiliarios de tipo industrial, el propósito es satisfacer la necesidad de edificación de instalaciones industriales amigables con el medio ambiente, y, a su vez, cumplan con los principios inmóticos de constructibilidad [10-12].

Durante su ciclo de vida, el PITI deberá velar por cumplir los principios de la integración de conjunto, la mínima distancia recorrida, el flujo de materiales, la igualdad de condiciones del espacio cúbico y de flexibilidad [13]. Se deben, también, cumplir las regulaciones de la norma ISO 14040, en cuanto a estándares de cargas energéticas y sustentabilidad ambiental, así como las normas reglamentarias de apoyo asociadas al período de posesión y operación

de instalaciones industriales, el cual debe superar los 50 años [7, 11, 14].

### **METODOLOGÍA PARA EL EMPLAZAMIENTO INMÓTICO DE NAVES DE ALMACENAMIENTO SOSTENIBLE AJUSTADA, MEINASA**

Una metodología es un conjunto de métodos elaborados a partir de un constructo epistemológico emanado por uno o varios modelos, los que a su vez requieren de procedimientos, técnicas, herramientas y soporte documental que indique el derrotero a seguir para el desarrollo de soluciones a problemas específicos. La MGA aplicada en este estudio, MEINASA, permite obtener el diseño adecuado de almacenes, debido a los requerimientos de la red de suministros. En esta sección se presentan los métodos y herramientas necesarios para describirla y así posteriormente poder entender la descripción de la propuesta que se hace para hacerla más robusta mediante la incorporación de DEA.

La Metodología para el Emplazamiento Inmótico de Naves de Almacenamiento Sostenible Ajustada, MEINASA, tiene características y criterios científicos inherentes a la evaluación y desarrollo de PITI sostenibles y abarca los siguientes perfiles [3, 4]:

- Diseño de una Nave de Almacenamiento (NdA) nueva.
- Expansión o traslado a una NdA ya existente.
- Reordenación del layout de una NdA ya existente.
- Ajustes menores al ordenamiento espacial en NdA ya existentes.

En esta MGA se consideran los efectos asociados a la localización del muelle de carga y descarga de material, la distribución (*layout*) adoptada por las bahías de almacenamiento, el nivel máximo proyectado de inventario y la estrategia de almacenamiento adoptada. El inventario almacenado por los eslabones comprador-vendedor es conocido y el tiempo de respuesta es pactado al inicio de la negociación, la administración del pedido es conjunta, siguiendo una de las diecinueve estrategias puras de coordinación de inventarios o una combinación de ellas, ya sea para mono o multiproductos [15].

MEINASA es una MGA dura (orientada al proceso) a la que se le incorporó la técnica de chequeo

diagnóstica conocida como SCAMPER (siglas en inglés de Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put on other uses, Eliminate, Rearrange), que se emplea en procesos de mejora continua para bienes o servicios.

Para comparar el desempeño sostenible de las alternativas de diseño propuestas para el PITI, se emplea el BANA (contrastado con la tasa verdadera de rentabilidad, TVR), debido a que contempla en forma directa el componente riesgo dentro de la evaluación financiera del proyecto y el flujo de caja totalmente neto, FCTN, del proyecto, el que debe ajustarse por un factor que represente un punto de indiferencia entre uno que se tenga certeza y el valor esperado de uno sujeto a riesgo [3], valuadas en un horizonte de diez años con un valor de mercado de los activos no capitalizado al final del último período de evaluación *ex-ante*, considerando que:

- El PITI se localizó con antelación, incluyendo una evaluación dinámica (modelado matemático a nivel macro, meso y micro localización) y una evaluación estática (Plan de Ordenamiento Territorial) y con un horizonte de mínimo cincuenta años.
- La NdA es de altura comercial de entre ocho y doce metros (a partir de caída de aguas), construida por módulos bajo principios inmóticos, con planimetría de planta y media con una cubierta a dos aguas.
- El área del terreno proyectado está relacionada con el área del edificio (área de bodega más patio de maniobras) [15].
- La planificación estratégica del sistema productivo se sustenta en la regla del 85% para el diseño de edificios industriales, debido a que no hay reglas prácticas de diseño universales para la construcción de instalaciones industriales, en especial las que están destinadas al bodegaje de productos no perecederos.
- Las etapas del modelo metodológico general ajustado para el diseño de sistemas productivos destinados al bodegaje de productos no perecederos, se describen a continuación.

### **Cuantificación del inventario máximo conjunto proyectado**

Cada agente logístico cuantifica el inventario máximo de forma independiente, pero los consumos del comprador siguen un comportamiento

estocástico y son monitoreados por el vendedor mediante sistemas de eventos virtuales de trabajo colaborativo sincrónicos. La dupla comprador-vendedor emplea la misma estrategia de almacenamiento y unidad básica de almacenamiento (SKU por sus siglas en inglés). La proyección del cubo de almacenamiento (índice de volumen interior de almacenamiento), sigue el mismo comportamiento para los dos, se emplea la clasificación ABC más D del inventario en unidades monetarias por familia de productos, se establece el mismo nivel de servicio deseado por familia de productos, se costea en forma independiente el sistema de almacenamiento por parte de cada agente logístico y los dos establecen la política de coordinación del inventario que minimice el costo total conjunto de la operación.

### **Cubicaje del SKU de almacenamiento**

Con este proceso se dimensiona la SKU en función de las características del producto a almacenar, el flujo de materiales en  $t/m^3/SKU$ , el uso del cubo, la política de coordinación del inventario negociada entre vendedor-comprador y el cumplimiento de la normativa vigente, entre otros aspectos.

### **Cálculo del área de bodegaje y auxiliares**

En esta etapa se determina la altura a partir de caída de aguas, en función de la inversión requerida en terrenos, construcción del edificio industrial y equipo de mantenimiento y almacenamiento del inventario [16]. Este parámetro se contrasta con la operatividad del WMS diseñado para el CD: en términos de la localización del muelle de carga y descarga de mercancías, de la orientación de las bahías de almacenamiento, del margen de error en el diseño y proyección del edificio a partir de índices de bodegaje [14, 17-19].

### **Cálculo del terreno proyectado para el CD y acondicionamiento inmótico**

Consiste en el diseño de los muelles para carga y descarga de mercancías y el patio de maniobras en función del medio de transporte seleccionado para la operación de distribución. Esta área se adiciona a la calculada, en el numeral 2.3, para configurar el área de edificios y así proyectar el terreno requerido de acuerdo a los aspectos legales (Plan de Ordenamiento Territorial), técnicos, inmóticos y ambientales [3, 16].

### **Aplicación de SCAMPER al diseño del CD**

Para una propuesta de diseño dada, se busca establecer que elementos se pueden sustituir, combinar, adaptar, modificar, poner en otros usos, eliminar o reordenar con el propósito de optimizar costos, hacer más sencillo el sistema o buscar otros beneficios.

### **Evaluación financiera de alternativas de inversión**

En esta etapa se verifica la confiabilidad prospectiva de la información financiera de la evaluación del PITI, partiendo de los supuestos de que los proyectos son excluyentes con vidas iguales, del valor de mercado de las inversiones no capitalizadas, de que la tasa de oportunidad se calcula en torno al valor de colocación de dinero en el sector financiero colombiano y de que el ingreso neto operacional unitario del servicio se valora en términos del margen sobre precio de venta [20-21].

## **ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA)**

Una vez obtenidas las diferentes propuestas de diseño del CD es necesario elegir la más apropiada. En la MGA de [3] se realiza una selección por BANA. La propuesta de este trabajo es realizar esta etapa mediante DEA, haciendo la metodología más robusta. Como se afirma en [22], DEA es una herramienta adecuada para medir el desempeño de las bodegas debido a su capacidad de capturar simultáneamente las entradas y salidas exponiendo las deficiencias de las bodegas ineficientes; consecuentemente ha sido utilizada como herramienta en varios artículos académicos [23-26]. Debido a que en el diseño de un CD se tienen múltiples características de interés, la utilización de DEA es apropiada, ya que permite comparar cada una de las propuestas evaluándolas con un índice y obteniendo los valores de las entradas que deberían tener las que resultan ineficientes, abriendo el camino para modificar y mejorar su diseño para hacerlas eficientes.

DEA es un método no paramétrico propuesto por Charnes, Cooper y Rhodes en 1978 [27] inspirados en el trabajo de Farell de 1957 [28] y que permite medir la eficiencia relativa de unidades denominadas DMU (Decision Making Units), que toman varias entradas y las transforman en salidas. El conjunto de las DMU establecen una frontera Pareto-Eficiente con base en la que se calcula un índice de eficiencia

relativa para cada DMU que es proporcional a su distancia con la frontera. En el caso de la presente propuesta, cada una de las propuestas de diseño de CD propuestos corresponde a una DMU.

Se definen  $X$  y  $Y$  como las matrices que reúnen los valores de las entradas y salidas respectivamente, correspondientes a todas y cada una de las DMU. En particular las de la DMU evaluada (denotada como DMU<sub>o</sub>) están contenidas en los vectores  $x_o$  y  $y_o$ . Las variables que representan los factores de ponderación que tienen cada una de las salidas y de las entradas en la medición de eficiencia de la DMU<sub>o</sub> se encuentran en los vectores  $\bar{u}$  y  $\bar{v}$ . Por su parte  $\bar{\lambda}$  es un vector de multiplicadores asociados a cada una de las DMU. Con esta notación, se presentan la pareja primal-dual dada por los modelos (1) y (2) con retornos constantes de escala [29].

La solución del modelo (1) permite obtener una medida de eficiencia para la DMU<sub>o</sub> y los factores de importancia que tienen cada una de las entradas y salidas involucradas.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Maximizar: } \theta_o = \bar{y}_o^T \bar{v} & \text{Maximizar: } \theta_o \\
 \text{Sujeto a:} & \text{Sujeto a:} \\
 \bar{x}_o^T \bar{u} + \bar{0}^T \bar{v} = 1 & \theta_o \bar{x}_o - x \bar{\lambda} \geq \bar{0} \\
 -\bar{x}^T \bar{u} + \bar{y}^T \bar{v} \leq \bar{0} & \text{y } \bar{\lambda} \geq \bar{y}_o \\
 \bar{u} \geq \bar{0} & \bar{\lambda} \geq \bar{0} \\
 \bar{v} \geq \bar{0} &
 \end{array} \quad (1) \quad (2)$$

El modelo (2) es la versión dual del modelo (1) y también mide la eficiencia de la DMU<sub>o</sub>, pero adicionalmente permite expresarla, mediante el vector  $\bar{\lambda}$ , como una combinación de las otras (las DMU cuyos componentes en  $\bar{\lambda}$  son positivos, sirven de referentes para DMU<sub>o</sub>). Multiplicando  $\theta_o$  por  $\bar{x}_o$  se tienen los valores de las entradas que debería tener DMU<sub>o</sub> para ser eficiente. Este modelo es el que se implementa en la presente propuesta.

En cuanto a las aplicaciones de DEA en sistemas de almacenamiento e encuentra el trabajo de [30] en el que se propone una forma de seleccionar de una red de centros de almacenamiento, considerando las preferencias de los consumidores. Los autores recurren inicialmente al proceso de análisis jerárquico (AHP) para obtener las prioridades evaluadas por los consumidores, para posteriormente emplear DEA

en la medición de la eficiencia relativa de varios centros de almacenamiento acorde con las prioridades producto del AHP y de esta forma poder establecer la red más eficiente de depósitos. Un punto valioso de este trabajo es que incluye variables cualitativas y cuantitativas dentro del proceso de selección y que permite incluir al consumidor dentro del mismo, dándole importancia a sus preferencias.

Teniendo en cuenta que los modelos DEA permiten la incorporación de entradas y salidas que no están expresados en las mismas unidades, [26] implementa DEA para medir la eficiencia relativa de las operaciones logísticas de los principales almacenes encargados de distribuir productos de empresas multinacionales en Europa.

En 2011 [31] desarrollan un modelo para facilitar la clasificación de grandes cantidades de inventario, bajo la metodología ABC, apoyándose AHP difuso y en DEA. Mediante ABC determinan la importancia de los diferentes tipos de inventario, después se aplica AHP difuso para establecer la importancia de los criterios empleados en la clasificación ABC y una vez obtenido el peso de los criterios, se utiliza DEA para determinar los valores de los términos lingüísticos y se finaliza con una ponderación aditiva para agregar los puntajes de cada ítem bajo los diferentes criterios.

## PROPUESTA DEA-MEINASA

La propuesta presentada en este trabajo consiste en complementar MEINASA con DEA, para así poder tener la posibilidad de elegir entre los diseños propuestos que sean evaluados como eficientes o realizar modificaciones correctamente cuantificadas acerca de los que pertenecen al grupo de los ineficientes. Los resultados de DEA también le permiten al tomador de decisiones, saber cuántas veces cada propuesta eficiente es tomada como referente de las ineficientes y así tener un criterio adicional para la selección final. El esquema conjunto DEA-MEINASA se presenta en la Figura 1.

En esta propuesta la implementación del modelo DEA tiene como propósito darle al tomador de decisiones la opción de seleccionar la alternativa final por criterios adicionales al BANA (que es como lo hace MEINASA tradicional).



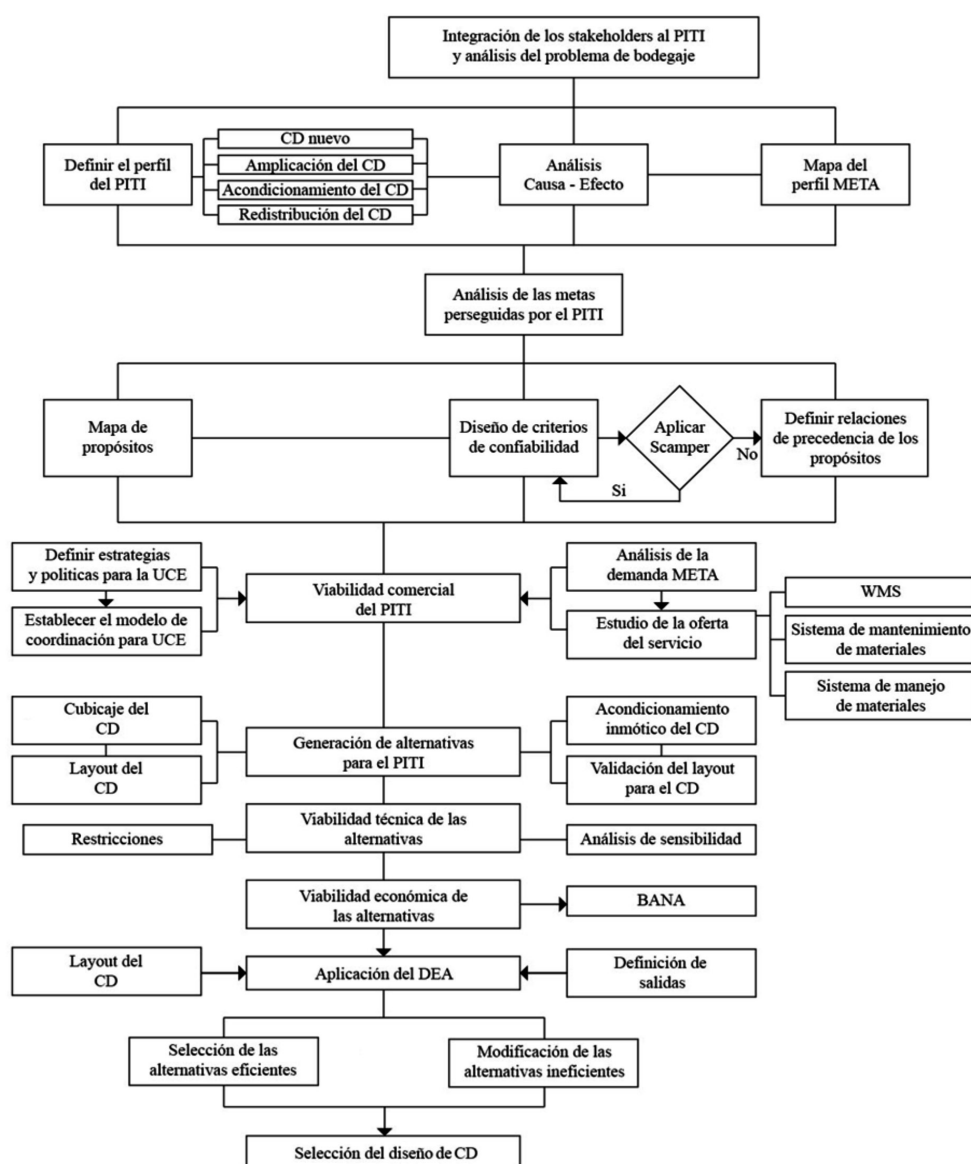


Figura 1. Metodología propuesta DEA-MEINASA.

Existen herramientas multicriterio diferentes a DEA, como proceso de análisis jerárquico (AHP), frontera estocástica (SFA), entre otras. AHP es comúnmente usado para evaluar decisiones estratégicas [32], y permite integrar variables cualitativas y cuantitativas. En esta propuesta esa etapa se desarrolla aplicando MEINASA y cuando se obtienen los valores numéricos para los criterios evaluados se recurre a DEA, entre otros motivos, porque no requiere de asignar pesos subjetivos a las entradas y salidas, sino que estos son resultados, ver modelo (1). En cuanto

a frontera estocástica, tiene como desventaja el requerir especificar la forma funcional y tecnológica de producción [33], exigencia que no tiene DEA por ser un método no paramétrico.

Por los factores mencionados, se seleccionó DEA y se soluciona el modelo (2) para cada alternativa y aquellas cuya eficiencia relativa es del 100% conforman el grupo de elegibles. Sin embargo, no es deseable que dicho grupo esté constituido por un porcentaje alto del conjunto original de alternativas

evaluadas, es decir, se requiere un modelo DEA con capacidad de discriminación.

En ese sentido se optó por el modelo (2) con retornos constantes de escala, puesto que este tiene un mayor poder de discriminación que el modelo DEA con retornos variables de escala. Este resultado es consistente con [26], quienes evaluaron 65 bodegas en Europa, obteniendo que el número de las eficientes se aumenta de 29, con retornos constantes, a 42, con retornos variables de escala, afirmando que en este último caso la comparación de las eficiencias no es muy relevante.

Para la evaluación de las propuestas de CD con DEA se definieron como entradas los costos; de construcción del edificio inmótico, los asociados al WMS y los logísticos de operación. Como salidas se establecieron; el BANA, distancia de *Picking* (para cada configuración hace referencia a la distancia que se debe recorrer para la recogida de los pedidos) y el precio de venta por Pallet (valoración contable en términos de posición y/o unidad básica de almacenamiento del servicio de bodegaje, atendiendo al cubicaje del tamaño de lote de pedido). Para solucionar el modelo DEA, la salida asociada a la distancia de *Picking* se toma como el inverso multiplicativo de la distancia, de este modo se cumple que mayor valor de la salida es mejor.

Como parte de la metodología se debe garantizar que el número de alternativas generadas sea suficientemente grande con respecto a la suma del número de entradas y de salidas, pues de lo contrario se corre el riesgo de que el modelo DEA no sea lo suficientemente discriminante. Para ello existen recomendaciones como la de [34]. También

se pueden emplear pruebas de correlación como las de Pearson o la de Spearman para comprobar la independencia entre las salidas y el supuesto de monotonía.

## CASO DE APLICACIÓN

La propuesta de metodología integrada DEA-MEINASA se aplicó a una compañía del sector de grifería en la ciudad de Bogotá, que está planeando la construcción de un CD para cubrir un mercado anual de 50.000.000 USD, con un crecimiento anual estimado en 2% para cada uno de los próximos diez años. Después de los correspondientes estudios de microlocalización que indicaron el sitio adecuado, la empresa invertirá una partida de financiamiento conformada por recursos propios en la compra de un terreno de 20 ha para este PITI y en la construcción de una NdA, con un aforo de al menos 30.000 pallets universales.

Los estimativos de las inversiones requeridas y de costos administrativos por pallet se muestran en la Tabla 1. El margen de error empleado en la proyección del dimensionamiento de la NdA es del 10% [3]. Los pallets serán estibados con una UCE homogenizada con un peso comprendido entre 200-500 kilogramos, este cubicaje representa un ingreso neto operacional promedio de 250 USD por pallet.

Se necesita software WMS para el sistema de mantenimiento y manejo de materiales, tres carretillas retráctiles y por política de la firma el SKU de bodegaje es el mismo que la unidad de carga eficiente (UCE) de distribución, motivo por el cual no requiere *picking* y la totalidad de las posiciones disponibles serán para almacenar pallets completos.

Tabla 1. Estimativos de costos e inversiones proyectadas.

Inversiones proyectadas (USD/m <sup>2</sup> )			
Encerramiento	Cubierta	Terreno	Sistema Inmótico
1.000	110	550	170
Costos administrativos por pallet			
Preparación de pedidos	Tarifa de alistamiento por ACCF	Manejo de materiales	Tasa de transferencia
50 USD/año	5 USD/año	1,6 USD/m	30% anual
Otros Costos			
Paquete WMS	Carretillas retráctiles	Costo promedio pallet universal	Inventario de seguridad
175.000 USD/Licencia	75.000 USD/Unidad	25 USD	15% de la ocupación del área de bodegaje



La red de suministro, RdS, está conformada por cinco administradores de cuentas claves filiales, ACCF, sobre los cuales recae la administración de la demanda, el cumplimiento del servicio y la gestión de pagos. Este modelo de negocio le cuesta a la firma en promedio el 35% anual de los ingresos operacionales. Se tiene que la política de almacenamiento puede ser caótica o dedicada, el índice de bodegaje 2 o 3 con respecto al área de almacenamiento y el índice de volumen interior de almacenamiento 3 o 6 en relación al inventario máximo actual [3]. La construcción del patio de maniobras se hace adoptando parámetros de diseño sugeridos para muelle posterior [35]. En cuanto a la configuración de la distribución del área de almacenamiento y la posición de la plataforma, se obtienen buscando la generación del mejor costo racional para las operaciones de *picking* y *shipping* [3, 17, 19], y los aspectos estructurales, de infraestructura y locativos están fuera del alcance de este diseño metodológico.

Los costos de operación y posesión del CD corresponden al 40% de los ingresos. Por ser un proyecto productivo nuevo, se dan subvenciones anuales durante cinco años, correspondientes al 25% de los impuestos. El capital de trabajo está representado por la nómina de colaboradores y por el costo fijo de compra de los pallets del CD.

### OBTENCIÓN DE LAS PROPUESTAS DE DISEÑO DEL CD

Con las condiciones dadas en el caso de aplicación, se consideraron diferentes configuraciones de tamaño proyectado, política de almacenamiento, criterio de costeo del servicio y capacidad de bodegaje, para definir los parámetros que debe

tener cada una de las 16 propuestas de diseño para el CD, Tabla 2. Por último, se aplicó DEA-MEINASA para la obtención de cada propuesta de diseño con los valores de entradas y salidas presentadas en la Tabla 3.

Bajo estas condiciones el número de entradas (m) es tres, el de salidas (s) también es tres y el de DMU (n) es 16, cumpliendo la recomendación de que  $n \geq 2(m + s)$  [34]. Mediante las pruebas de Pearson y de Spearman se verificó la independencia entre las salidas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo la metodología propuesta DEA-MEINASA, se requiere que inicialmente cada diseño de la Tabla 2 sea obtenida mediante MEINASA, luego cada una de ellas es evaluada usando el modelo (2) de DEA previamente mostrado en este estudio. Este modelo se corrió orientado a entradas, ya que se puede considerar que estas están bajo el control de los tomadores de decisión.

El valor de 1 en los resultados, indica que la DMU tiene 100% de eficiencia técnica relativa. De otra parte, un valor menor a 1, significa que en la propuesta de CD se pueden contraer los costos en un factor igual a la eficiencia obtenida, manteniendo el valor de sus salidas. La solución del modelo (2) también identifica, para cada diseño, cuáles son sus pares de comparación, mostrados en la tercera columna de la Tabla 4, y su correspondiente peso (valor de la importancia como referente).

Los diseños identificados como DMU 01, 03, 05, 07 y 13 tienen eficiencia relativa del 100% y sus

Tabla 2. Definición de DMU con los Centros de Distribución Diseñados.

Proyección del tamaño del CD	Criterio de costeo del servicio	Política de Almacenamiento			
		Dedicado		Caótico	
		Capacidad mínima de bodegaje	Capacidad máxima de bodegaje	Capacidad mínima de bodegaje	Capacidad máxima de bodegaje
Mínima	Posición	DMU 01	DMU 02	DMU 03	DMU 04
	Pallet	DMU 05	DMU 06	DMU 07	DMU 08
Máxima	Posición	DMU 09	DMU 10	DMU 11	DMU 12
	Pallet	DMU 13	DMU 14	DMU 15	DMU 16

Tabla 3. Entradas, salidas y estadísticas descriptivas.

DMU	Entradas			Salidas		
	Costo de construcción del edificio inmóvil (USD)	Costo asociados al WMS (USD)	Costos Logísticos de operación (USD/AÑO)	BANA (USD)	Distancia Picking (Km/año)	Precio de Venta (USD/Pallet)
1	121709600	1810000	10364090	66721548	68	240,84
2	125055200	2750000	10364090	31930922,92	83	191,44
3	125055200	1810000	10364090	61037102,81	67	237,13
4	128400800	2750000	10364090	42927361,82	75	210,67
5	121709600	1810000	16616119	65269865,51	69	306,37
6	125055200	2750000	16616119	29793700,42	82	273,99
7	125055200	1810000	16616119	59424336,85	68	316,57
8	128400800	2750000	16616119	41037160,56	74	300,55
9	121709600	1810000	13533912	36715894,37	72	178,16
10	123382400	2280000	13533912	55502039,92	93	130,28
11	125055200	1810000	13533912	20992776,29	73	162,53
12	126728000	2280000	13533912	42631696,93	80	210,79
13	121709600	1810000	10388088	34115926,51	72	243,77
14	123382400	2280000	10388088	37127281,63	92	213,39
15	125055200	1810000	10388088	16683089,39	73	242,11
16	126728000	2280000	10388088	41037160,56	79	227,11
Promedio	124637000	2162500	12725552	42684241,53	76,25	230,36
Desviación	2244296,71	402483,95	2674830,80	15150447,47	8,03	51,92
Máximo	128400800	2750000	16616119	66721548	93	316,57
Mínimo	121709600	1810000	10364090	16683089,39	67	130,28

Tabla 4. Resultados de eficiencia relativa y referentes para cada diseño evaluado.

DMU	Eficiencia	Referentes (Factor de importancia)	Veces que se toma como referente
01	1	01(1)	6
02	0,807	01(0,004); 03(0,804)	0
03	1	03(1)	3
04	0,893	03(0,893)	0
05	1	05(1)	1
06	0,865	07(0,865)	0
07	1	07(1)	2
08	0,939	07(0,894); 13(0,072)	0
09	0,944	01(0,944)	0
10	0,820	01(0,832)	0
11	0,918	03(0,918)	0
12	0,817	01(0,763); 05(0,088);	0
13	1	13(1)	4
14	0,877	01(0,220); 13(0,658)	0
15	0,993	13(0,993)	0
16	0,934	01(0,280); 13(0,655)	0

referentes de comparación son ellos mismos. El diseño más ineficiente es el correspondiente a la DMU 02, con una eficiencia de 80,7%. La distribución de

frecuencias relativas para los índices de eficiencia obtenidos por los diseños de CD analizados, se muestran en la Figura 2.

El análisis de las DMU que se clasificaron como eficientes en la fase de aplicación de DEA, muestra que las cinco corresponden a propuestas diseñadas con la capacidad mínima de bodegaje y tres de ellos con política de almacenamiento dedicado y dos a caótico.

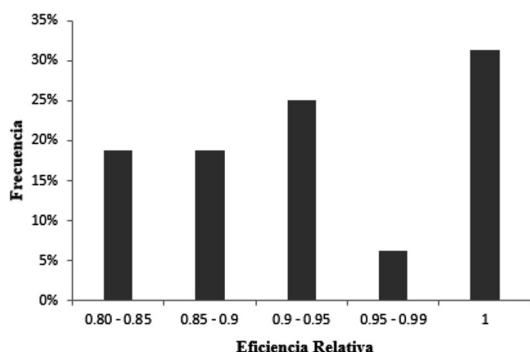


Figura 2. Distribución de frecuencias para las eficiencias obtenidas por los diseños evaluados.

En cuanto al criterio de costeo del servicio, dos de las alternativas eficientes utilizan posición y las otras tres pallet. La situación con la proyección del tamaño del CD es cuatro en mínimo y una en máximo.

Se tiene que DMU 01 es tomado como referente por el 54,54% de las DMU ineficientes, la DMU 03 por el 27,3%, el diseño DMU 5 por el 9%, DMU 07 por el 18,18% y la DMU 13 es referente del 36,36% de los ineficientes. En cuanto a la importancia que tienen como referentes los diseños eficientes, la DMU 01, a pesar de ser la que más se repite, no es la que tiene una importancia promedio mayor (0,51) puesto que ese rol lo asumen la DMU 03 y DMU 07 (0,871 y 0,879, respectivamente). Para DMU 13, este valor es 0,594 y para la DMU 05 es 0,08 y solo es referente en una ocasión.

Los criterios de elección del diseño final se amplían, puesto que se puede pensar en seleccionar la propuesta eficiente que más veces es referente de diseños ineficientes, en cuyo caso se elegiría la DMU 01. Si el criterio es la mayor importancia promedio como referente, se opta por la DMU 07 o por la DMU 03. Si se piensa en una propuesta balanceada con estos dos criterios, se inclina por la DMU 13.

La ventaja de aplicar la propuesta hecha en este trabajo, DEA-MEINASA, con respecto a MEINASA

es evidente, puesto que bajo esta última solamente se seleccionaría la propuesta de diseño con el mayor BANA, mientras que, con la primera, se tienen como cota máxima de alternativas seleccionables aquellas que resulten eficientes (en el caso de aplicación, cinco). Análisis, como el número de veces que cada DMU eficiente se toma como referente o su importancia como tal, pueden ayudar a decantar la decisión final, pero se deben analizar en cada caso particular, pues DEA puede hacer (dependiendo el contexto) que aparezcan en la frontera unidades que no se deben tomar como referentes [36].

Si existe alguna característica deseable en una propuesta de diseño ineficiente, este se puede modificar para ser seleccionado, puesto que DEA indica en cuánto se deben contraer las entradas para convertirlo en un diseño eficiente. Esto se puede lograr mediante negociaciones con los proveedores, por ejemplo, aunque no siempre se lograra que estas alcancen los resultados numéricos resultantes de la aplicación de DEA.

Sin embargo, los dos últimos aspectos mencionados deben tomarse con cautela, pues como se muestra en el trabajo de [36] sobre hogares geriátricos, DEA puede llevar a que no todas las DMU que resultan 100% eficientes sean deseables para ser tomadas como referentes de las unidades ineficientes.

Si se da una orientación a salidas, el hecho de lograr los valores de frontera puede no ser factible, pues no necesariamente existirá una opción de diseño que alcance el BANA, la distancia *picking* o el precio de venta indicados por la expansión correspondiente.

## CONCLUSIONES

Se presentó una metodología robusta, DEA-MEINASA, aplicada al diseño de PITI y que permite obtener una gama de alternativas entre las cuales elegir de acuerdo a los criterios de los *stakeholders*, en contraposición de la metodología MEINASA, que conduce a un único diseño basándose solo en un criterio financiero. Entre las ventajas de DEA-MEINASA también se encuentra el obtener indicadores para poder modificar los diseños ineficientes, llevándolos a ser eficientes, y considerarlos como opciones viables a implementar. Esto se logra multiplicando el valor de cada una de las entradas por la correspondiente eficiencia

del diseño evaluada, de esta manera se estima la reducción de costos necesaria.

La utilidad de la propuesta se mostró con su aplicación en una situación real en la que una empresa colombiana productora de grifos y otros accesorios para construcción, requiere diseñar un centro de distribución centralizado. Los resultados obtenidos le permiten a la organización calificar las propuestas disponibles y clasificarlas entre eficientes e ineficientes, para que de acuerdo con los criterios de decisión fijados, se decante por una de las del primer grupo o modifique alguna de las del segundo, hasta donde lo indican los resultados DEA. No obstante, y como se puede derivar de [36], es importante considerar que no siempre los valores objetivos o de frontera, que se obtienen mediante DEA para las DMU ineficientes, son alcanzables o tienen sentido. Por lo tanto, el tomador de decisiones debe ser cuidadoso al establecer si una contracción de entradas, para una DMU que se quiere mejorar, en realidad es realizable en la práctica.

El número de propuestas evaluadas, comparado con el número de entradas y salidas, se convierte en un factor importante en la aplicación, puesto que si se tienen pocas DMU, el número de unidades eficientes tiende a aumentar. Por ello, para trabajos futuros se recomienda generar un mayor número de propuestas.

Una extensión de este trabajo es la utilización de supereficiencia [37], pues de esta forma se pueden categorizar las DMU de acuerdo con su eficiencia, pero permitiendo valores mayores a la unidad (entre más alejados mejor) para la función objetivo. De esta forma, la metodología propuesta puede hacerse más selectiva reduciendo el número de opciones acerca de las cuales tomar la decisión final.

## REFERENCIAS

- [1] P. Mendes. "Demand driven supply chain: A structured and practical roadmap to increase profitability", pp. 185. Editorial Springer. Berlin, Germany. 2011. e-ISBN: 978-3-642-19992-9.
- [2] W.J. O'Brien, C.T. Formoso, V. Ruben and K. London. "Construction Supply chain management Handbook". Editorial CRC Press. Boca Ratón, USA, pp. 508. 2009. ISBN: 978-1-4200-4745-5.
- [3] O. Palacio. "Propuesta metodológica para el diseño y operación de instalaciones de almacenamiento modulares ecoeficientes para productos no perecederos", pp. 184. Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. 2012.
- [4] C. Berbeo y O. Palacio. "Pautas generales para la creación de una nave de almacenamiento modular destinada a productos no perecederos". Revista Clepsidra. N° 13. 2011.
- [5] J.J. Bartholdi and S.T. Hackman. "Warehouse & distribution science". The Supply Chain and Logistics Institute. Georgia Institute of Technology, pp. 270. Fecha de actualización: 21 de agosto de 2011. Fecha de consulta: 30 de junio de 2014. URL: <http://www.warehouse-science.com/>
- [6] E.F. Bolten. "Managing Time and Space in the Modern Warehouse: With Ready-to-use Forms, Checklist & Documentation", pp. 288. Editorial AMACOM BOOKS. New York, USA. 1997. e-ISBN: 978-0-585-04001-1.
- [7] R. Saldarriaga. "Diseño, Optimización y Gerencia de centros de distribución: Almacenar menos, distribuir más", pp. 469. Impresos Begón Ltda. Medellín, Colombia. 2012. ISBN: 978-9-5846-0258-9.
- [8] M. Mauleón. "Sistemas de Almacenamiento y Picking". 1ª Edición, pp. 416. Editorial Díaz de Santos. Madrid, España. 2003. ISBN: 84-7978-559-4.
- [9] A. Langevin and D. Riopel. "Logistics Systems: Design and Optimization", pp. 388. Springer. New York, USA. 2005. ISBN: 978-0-387-24977-3.
- [10] F.E. Meyers and M.P. Stephens. "Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales", pp. 508. Tercera edición. Editorial Pearson. Ciudad de México D.F., México. 2006. ISBN: 970-2-60749-3.
- [11] D.R. Sule. "Instalaciones de Manufactura: Ubicación, planeación y diseño", pp. 726. Segunda edición. Editorial Thomson. Ciudad de México D.F., México. 2001. ISBN: 978-9-7068-6068-2.
- [12] P. Hernández y G. Woithe. "Fundamentos de la proyección de fábricas de construcción de maquinarias", pp. 296. Editorial Pueblo

- y Educación. Ciudad de La Habana, Cuba. 1986. ISBN: 01-04070-7.
- [13] J.A. Diego-Más. "Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos: Aportación al control de la geometría de las actividades". Memoria de la Tesis Doctoral. Publicado por la UPV. Valencia, España. 2006.
- [14] N. Martínez y J.C. Túregano. "Ciencias para el Mundo Contemporáneo: Guía de recursos didácticos". Publicado por la Agencia Canaria de Investigación, Innovación y Sociedad de la Información (ACIISI). Presidencia del Gobierno, pp. 384. Islas Canarias, España. 2010. ISBN: 978-84-606-5017-1.
- [15] M. Lahmar. "Facility logistics: Approaches and solutions to next generation challenges", pp. 336. Auerbach Publications. Boca Raton, USA. 2008. ISBN-13: 978-0-8493-8518-6
- [16] P. Hernández y G. Woithe. "Fundamentos de la proyección de fábricas de construcción de maquinarias". Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana, Cuba. 1986.
- [17] R.H. Ballou. "Logística: Administración de la Cadena de Suministro", pp. 789. 5ª Edición. Editorial Pearson. Ciudad de México D.F., México. 2004. ISBN: 978-9-7026-0540-9.
- [18] R. López. "Logística comercial", pp. 304. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 2005. ISBN: 978-8-4973-2655-1.
- [19] J.A. Dávila. "Herramienta basada en internet, como apoyo en el aprendizaje de la operación logística de Almacenamiento". Memoria de Trabajo de Grado. Publicado por Uniandes. Bogotá D.C., Colombia. 2001.
- [20] I. Vélez. "Decisiones de Inversión: Para la valoración financiera de proyectos y empresas", pp. 691. 5ª Edición. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 2006. ISBN: 978-9-5868-3896-2.
- [21] S. López. "Manual de proyectos de inversión". Publicado por la biblioteca del desarrollo-DNP, pp. 427. Bogotá D.C., Colombia. 1985. Documento Técnico UPEC-IE-0203.
- [22] J. Gu, M. Goetschalckx and L. McGinnis. "Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review". European Journal of Operational Research. Vol. 203 N° 3, pp. 539-549. 2010.
- [23] M. Schefczyk. "Industrial benchmarking: A case study of performance analysis techniques". International Journal of Production Economics. Vol. 32 N° 1, pp. 1-11. 1993.
- [24] S. Hackman, E. Frazelle, P.Griffin, S. Griffin and D. Vlasta. "Benchmarking warehouse and distribution operations: An input-output approach". Journal of Productivity Analysis. Vol. 16 N° 1, pp. 79-100. 2001.
- [25] A. Ross and C. Droge. "An integrated benchmarking approach to distribution center performance using DEA modeling". Journal of Operations Management. Vol. 20 N° 1, pp. 19-32. 2002.
- [26] M. Koster and B. Balk. "Benchmarking and Monitoring International Warehouse Operations in Europe". Production and Operations Management. Vol. 17 N° 2, pp. 175-183. 2008.
- [27] A. Charnes, W. Cooper and E. Rhodes. "Measuring the efficiency of decision making units". European Journal of Operational Research. Vol. 2 N° 6, pp. 429-444. 1978.
- [28] M.J. Farrell. "The measurement of Productive Efficiency". Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General). Vol. 120 N° 3, pp. 253-290. 1957.
- [29] E. Thanassoulis. "Introduction to the theory and application of data envelopment analysis". Kluwer Academic Publishers. Massachusetts, USA. 2001.
- [30] J. Korpela, A. Lehmusvaara and J. Nisonen. "Warehouse operator selection by combining AHP and DEA methodologies". International Journal of Production Economics. Vol. 108 N° 1, pp. 135-142. 2007.
- [31] A. Hadi-Vencheh and A. Mohamadghasemi. "A fuzzy AHP-DEA approach for multiple criteria ABC inventory classification". International Journal of Expert Systems with Applications. Vol. 38 N° 4, pp. 3346-3352. 2011.
- [32] N. Subramanian and R. Ramanathan. "A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management". International Journal of Production Economics. Vol. 138 N° 2, pp. 215-241. 2012.
- [33] G. Rodríguez. "Indicadores DEA (Data Envelopment Analysis) de Eficiencia y Productividad para las actividades de

- extensión universitaria. Aplicación en la Universidad Nacional de Colombia". Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas. ISBN: 978-958-719-909-3. 2011.
- [34] J. Fitzsimmons and M. Fitzsimmons. "Service Management: Operations, Strategy, and Information Technology". Mc Graw Hill. 2 ed. 2004.
- [35] D. Adler. "Metric Handbook: Planning and Design Data", pp. 856. 4nd Edition. Editorial Architectural Press. Boston, USA. 2008. ISBN: 978-0-7506-0899-2.
- [36] D. Shimshak, M. Lenard and R. Klimberg. "Incorporating quality into data envelopment analysis of nursing home performance: a case study". Omega. Vol. 37 N° 3, pp. 672-685. 2009.
- [37] P. Andersen and N.C. Petersen. "A procedure for ranking efficiency units in data envelopment analysis". Management Science. Vol. 39 N° 10, pp. 1261-1264. 1993.