

DISEÑO DE CADENA DE SUMINISTRO BI-OBJETIVO DE LOCALIZACIÓN- INVENTARIO Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES BAJO UN AMBIENTE DE INTEGRACIÓN DE RIESGO.

Guerrero-Campanur A.

Universidad Popular Autónoma de Estado de Puebla UPAEP
21 Sur 1103, Col. Santiago, Puebla, 72410 México
e-mail: aaron.guerrero@upaep.com.mx

Olivares-Benítez E.

Universidad Popular Autónoma de Estado de Puebla UPAEP
21 Sur 1103, Col. Santiago, Puebla, 72410 México
e-mail: elias.olivares@upaep.mx

Miranda-González P.A.

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso PUCV
Av. Brasil 2950, Casilla 4059, Valparaíso, Chile
e-mail: pablo.miranda@ucv.cl

RESUMEN

Un diseño de red de cadena de suministro es fundamental para llevar a cabo una eficiente y efectiva administración de cadena de suministro. La administración de cadena de suministro involucra múltiples objetivos en conflicto, por ejemplo, costo de transporte, de operación, tiempo de transporte, calidad de servicio, entre otros. En esta investigación es formulado un modelo bi-objetivo de localización-inventario con capacidades considerando una demanda estocástica en un ambiente de integración de riesgo. El nivel de servicio, la política de revisión continua de inventarios y selección de proveedores (basado en la Efectividad Total del Equipo OEE) se estudian simultáneamente con las decisiones de diseño de la red, tal como la apertura de planta, almacén y la asignación de los clientes. El estudio es basado en un conjunto de soluciones encontradas por el método epsilon-constraint y presentadas en el óptimo de Pareto.

PALABRAS CLAVE: Bi-objetivo, localización-inventario, selección de proveedores, efectividad total del equipo, cadena de suministro, integración de riesgo, epsilon-constraint.

Área principal (L & T - Logística y Transporte)

ABSTRACT

A design of supply chain network is essential to carry out an efficient and effective supply chain management. The supply chain management involves multiple conflicting objectives, for example, transportation costs, transportation time, service quality, among others. In this research is developed a bi-objective inventory-location model considering capacity with stochastic demand and risk pooling. The level of service, the policy in continuous review inventory and supplier selection (based on the Overall Equipment Effectiveness OEE) are studied concurrently with the design decisions of the network, such as localization of plants, warehouses and the allocation of customers. The study is based on a set of solutions found by the method epsilon-constraint and presented in the Pareto optimal.

KEYWORDS: Bi-objective, inventory-location, supplier selection, Overall Equipment Effectiveness, supply chain, risk pooling, epsilon-constraint.

Main area (L & T - Logistics and Transport)

1. Introducción

La cadena de suministro se compone de todas las partes involucradas, directa e indirectamente, en satisfacer las necesidades de los clientes (Chopra & Meindl, 2001). El diseño de la cadena de suministro es importante para llevar a cabo la gestión de la cadena de suministro que tiene como propósito el satisfacer las necesidades del cliente con tanta eficacia como sea posible. La literatura estándar sobre la gestión de la cadena de suministro clasifica los problemas en tres niveles jerárquicos: estratégicos (largo plazo), tácticos (mediano plazo) y operacionales (corto plazo). Tradicionalmente se enfrentan estos problemas de manera aislada, es decir decisiones estratégicas se toman a nivel gerencial, tácticas a nivel de jefatura, y operacionales a nivel de piso (Miranda & Garrido 2004). Los sistemas tradicionales de suministro tienen como único objetivo el minimizar los costes ó maximizar sus ganancias. Sin embargo, actualmente la gestión de la cadena de suministro involucra el enfoque de nuevas estrategias y tecnologías para responder a los desafíos y demanda de los clientes. La globalización de las actividades económicas junto con el rápido desarrollo de las tecnologías de la información ha conducido a ciclos cortos de vida del producto, pequeños lotes, y un muy dinámico comportamiento de los clientes en términos de preferencia. Esto ha contribuido al crecimiento de la incertidumbre de la demanda y teniendo como resultado una mayor importancia al desarrollo de un robusto y buen diseño de red de cadena de suministro (Melo, Nickel & Saldanha-da-Gama 2009). En estos casos la formulación de red de cadena de suministro multi-objetivo tiene que ser considerada.

El objetivo de la investigación es incorporar en el diseño bi-objetivo de la cadena de suministro, decisiones tácticas / operacionales en la localización de las instalaciones, decisiones de control de inventario y selección de proveedores, bajo un ambiente de integración de riesgo donde la localización de la planta o almacén central es conocido y los proveedores y almacenes regionales tienen una capacidad limitada. La integración de riesgo se presenta al considerar la varianza de la demanda en el modelo lo cual permite una disminución en el stock de seguridad y por lo tanto reduce el inventario promedio. El modelo desarrollado es considerado una extensión del problema de localización de instalaciones con capacidad (capacitated facility location problem CFLP), catalogado NP-Hard. El enfoque de solución es basado en un conjunto de soluciones encontradas por el método epsilon-constraint y presentadas en el óptimo de Pareto para instancias pequeñas, para instancias mayores se analiza un enfoque de solución de Relajación de Lagrange. Se trabajara en un inicio con instancias relativamente pequeñas para comparar los resultados obtenidos al resolver el modelo de manera óptima con los resultados obtenidos con el método heurístico.

2. Revisión de literatura

Se contemplan modelos de integración localización-inventario y multi-objetivo en la cadena de suministro. Nozick y Turnquist (1998) presentan un modelo lineal donde los costos de inventario de seguridad en función al nivel de servicio deseado de una demanda incierta son considerados en un modelo de localización. Erlebacher y Meller (2000) un modelo no lineal de localización-inventario donde buscan minimizar los costos fijos de operación, costos de inventario en los centros de distribución, y los costos de transporte entre plantas y centros de distribución, y centros de distribución y clientes, el enfoque de solución se basa en el desarrollo de dos heurísticas de asignación de clientes a centros de distribución. Nozick (2001), desarrolla un modelo localización-carga fija con restricciones de cobertura, manteniendo un nivel adecuado de servicio y minimizando los costos. El enfoque de solución es basado en Relajación de Lagrange y el método de sub-gradiente. Daskin, Coullard, y Shen (2002) presentan un modelo no lineal entero de localización que incorpora los costos de inventario en proceso e inventario de seguridad en los centros de distribución en un ambiente de risk pooling, así como los costos de transporte de los proveedores a los centros de distribución. El algoritmo de solución utilizado es Relajación de Lagrange. Shen, Coullard, y Daskin (2003) consideran un modelo de programación no lineal entero de localización-inventario relacionado con un único proveedor y los múltiples minoristas. Cada minorista cuenta con una demanda variable, y una cierta cantidad de stock de seguridad se

debe mantener para alcanzar niveles adecuados de servicio esto permite que algunos minoristas puedan servir como centros de distribución (y por lo tanto, lugares de almacenamiento de inventarios) de otros minoristas. El problema es determinar cuales minoristas deben servir como centros de distribución y la forma de asignar los otros minoristas a los centros de distribución, utilizando el algoritmo de Generación de Columnas como algoritmo de solución. Miranda y Garrido (2004) estudia un modelo de localización-inventario que integra decisiones de inventario y localización de instalaciones para resolver el problema de red de distribución se incorpora una demanda estocástica y el fenómeno de risk pooling. El enfoque de solución es baso en Relajación de Lagrange y el método de sub-gradiente. Ozsen (2004) presenta una versión de modelo de localización bajo risk pooling con capacidad que determina la política de pedidos en los centros de distribución por lo que la agregación de inventarios no exceden las capacidades del centro de distribución el enfoque de solución considera Relajación de Lagrange. Shen y Daskin (2005) extendió el modelo de localización bajo risk pooling incluyendo el componente de servicio al cliente basado en una fracción de la demanda en relación a una distancia especifica del centro de distribución proponiendo un modelo no lineal bi-objetivo. Utilizando Algoritmos Genéticos como enfoque de solución. Gaur y Ravindran (2006) estudiaron un modelo estocástico de optimización bi-criterio para representar el problema de agregación de inventario bajo un ambiente de risk pooling con el objetivo de determinar el tradeoff entre los costos y la capacidad de respuesta. Olivares-Benítez, González-Velarde, y Roger Z. Ríos-Mercado (2010) presentan un modelo bi-objetivo mixto entero las decisiones a tomar son la ubicación de los centros de distribución, la selección de los canales de transporte, y el flujo entre las instalaciones. Los canales de transporte introducen un trade-off de costo-tiempo. Para el enfoque de solución se consideran tres variaciones del método epsilon-constraint para generar los frentes del óptimo de Pareto.

3. Planteamiento del problema

El diseño de cadena de suministro bi-objetivo de localización-inventario y selección de proveedores bajo un ambiente de integración de riesgo (DCSIR-BO) es basado en un sistema de tres etapas, un producto y un periodo de tiempo *Figura 1*. La cantidad de productos enviados entre etapas así como el inventario de seguridad de la planta y los almacenes regionales se basa en la política de revisión continua de inventarios. El número y localización de clientes es conocido. La cantidad de proveedores, almacenes regionales y plantas a utilizarse no esta

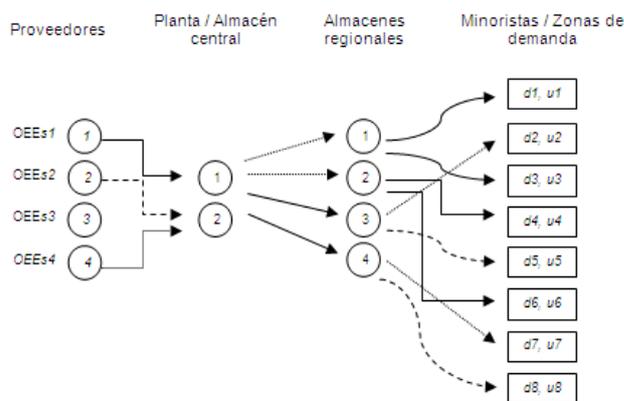


Figura 1. Representación grafica de la cadena de suministro

definido. Cada planta y almacén regional tiene un costo fijo de apertura, capacidad y costo de almacenamiento. Los proveedores cuentan con una capacidad de producción y costo por producto. La selección de proveedores se realiza en base de la efectividad total del equipo. La demanda del cliente es conocida. La idea del problema es seleccionar los almacenes regionales, determinar la cantidad de productos enviados entre instalaciones y la cantidad de productos en inventario de seguridad que minimicen la combinación del costo de transporte y el costo fijo de apertura. Además seleccionar al proveedor o proveedores que cuenten con una mayor efectividad total del equipo.

4. Efectividad global del equipo OEE

El análisis de efectividad global del equipo (OEE) actúa como un indicador porcentual

de desempeño único. Se basa en la relación entre el tiempo total disponible de producción y el tiempo de planificación de producción. OEE esta constituido por tres elementos: disponibilidad, rendimiento y calidad (1). La disponibilidad toma en cuenta las pérdidas de tiempo que detienen la producción planificada. Por ejemplo, escases en los materiales, cambio de herramental, falla en los equipos. En muchos casos estas perdidas de tiempo no pueden ser eliminadas pero si se pueden reducir. El rendimiento considera la pérdida de velocidad, incluye los factores que hacen que el proceso opere a un tiempo de ciclo mayor que el mínimo posible. Algunas causas son el desgaste del equipo, materiales de calidad inferior, ineficiencia del operador. La calidad toma en cuenta la perdida que representan los productos producidos que no cumplen con los estándares de calidad, incluyendo piezas que requieres correcciones.

$$OEE_i = \begin{matrix} \text{Disponibilidad} & & \text{Rendimiento} & & \text{Calidad} \\ \left(\frac{OT_i}{NAT_i}\right) & * & \left(\frac{ICT_i * TRP_i}{OT_i}\right) & * & \left(\frac{TPR_i - TD_i}{TPR_i}\right) \end{matrix} \quad (1)$$

Donde:

- OT_i : tiempo de operación proveedor i
- NAT_i : tiempo total disponible sistema proveedor i
- ICT_i : tiempo de ciclo ideal proveedor i
- TPR_i : total de piezas en la corrida proveedor i
- TD_i : total de piezas defectuosas en la corrida proveedor i

5. Política de control de inventario y costo económico de pedido

La política de revisión continua de inventario (Q, RP) será usada como patrón en el calculo del costo económico de pedido y costo de inventario para cada planta j y almacén k . En este caso tenemos una demanda estocástica D_l y una varianza U_l del minorista l . Para calcular los costos económicos de pedido EOC tenemos que el sistema de costo total de inventario en la planta j está dado por costo mantener inventario $\left(\frac{Q_j}{2}\right) hC_j$, costo de ordenar $\left(\frac{D_j}{Q_j}\right) OC_j$ y costo del material CD_j .

$$\text{Costo total inventario} = CD_j + \left(\frac{D_j}{Q_j}\right) OC_j + \left(\frac{Q_j}{2}\right) hC_j \quad (2)$$

Donde:

- CD_j : costo del material planta j
- D_j : demanda planta j
- Q_j : cantidad de pedido planta j
- OC_j : costo de ordenar planta j
- hC_j : costo de mantener en inventario planta j

Derivando la igualdad (2) con respecto de Q_j se obtiene la cantidad económica de pedido Q_j^* en la planta j (3). Además si sustituimos (3) en (2) obtenemos la función de costo económico de pedido EOC en la planta j (4) con la cual se trabajara en el modelo matemático para cada planta j y almacén k correspondientemente.

$$Q_j^* = \sqrt{\frac{2D_j OC_j}{HC_j}} \quad (3)$$

$$EOC = \sqrt{2 * D_j * OC_j * HC_j} \quad (4)$$

Asumiendo una distribución Normal para la demanda, el punto de reorden RP_j para cada planta j y almacén k , puede ser calculado de acuerdo la ecuación (6), donde ZT representa el

valor de la distribución Normal (0,1) que acumula una probabilidad de $1-\alpha$. Esta probabilidad es conocida normalmente como nivel de seguridad del sistema (5), asociado al inventario de seguridad para todas las plantas j y almacenes k . El producto de $\sqrt{U_j} * \sqrt{LT_j}$ representa la desviación estándar de la demanda durante el tiempo de entrega LT_j .

$$Prob(D(LT_j) \leq RP_j) \geq 1 - \alpha \quad (5)$$

$$RP_j = D_j * LT_j * ZT * \sqrt{U_j} * \sqrt{LT_j} \quad (6)$$

Basados en (6) tenemos que RP_j se encuentra conformado por la demanda promedio durante un tiempo de entrega $D_j * LT_j$ y por el inventario de seguridad $ZT * \sqrt{U_j} * \sqrt{LT_j}$, siendo la cantidad de inventario que debe tener en existencia en cada planta j y almacén k para absorber fluctuaciones de la demanda del minorista l o la utilización durante el tiempo que transcurre entre la colocación del pedido y su recepción en cada planta j o almacén k . La determinación del tamaño de inventario de seguridad incluye un equilibrio costo de quedar probablemente sin existencias y el costo de mantener el inventario de seguridad. En este caso no se consideran costos por quedar sin existencias, solo el costo por mantener en inventario (7) en cada planta j o almacén k .

$$ZT * HC_j * \sqrt{U_j * LT_j} \quad (7)$$

6. Formulación del modelo

A continuación se presentan tres formas de modelación de DCSIR-BO. De inicio de parte de un modelo no lineal bi-objetivo entero mixto, enseguida se pasa a la linealización de restricciones y por ultimo a un modelo bi-objetivo lineal entero mixto mediante una función objetivo lineal a tramos.

6.1 Modelo bi-objetivo no lineal entero mixto DCSIR-NL

Notación.

Grupos:		TC_{kl}	: costo transporte almacén k minorista l
I	: grupo de proveedor i	UC_i	: costo por unidad proveedor i
J	: grupo de planta j	U_l	: varianza minorista l
K	: grupo de almacén k	ZT_k	: valores de $ZT= 97.5\% - 1.96, 90.0\% - 1.28, 75\% - 0.67, 50\% - 0$
L	: grupo de minorista l		
Parámetros		Variables de decisión	
Cap_i	: capacidad proveedor i	X_k	: variable binaria apertura almacén k
Cap_k	: capacidad almacén k	Y_j	: variable binaria apertura planta j
Cap_j	: capacidad planta j	A_{kl}	: variable binaria arco almacén k minorista l
D_l	: demanda minorista l	Variables auxiliares	
FC_j	: costo fijo de apertura planta j	VP_{ij}	: volumen producción proveedor i planta j
FC_k	: costo fijo de apertura almacén k	D_{jk}	: volumen de flujo planta j almacén k
HC_j	: Costo almacén (unidad) en planta j	D_j	: demanda planta j
HC_k	: costo de almacenaje en almacén k	U_j	: varianza planta j
LT_k	: lead time almacén k	D_k	: demanda del almacén k
LT_j	: lead time planta j	U_k	: varianza almacén k
OC_j	: costo ordenar planta j		
OC_k	: costo ordenar almacén k		
OEE_i	: efectividad global del equipo proveedor i		
TC_{jk}	: costo transporte planta j almacén k		

Modelo matemático.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z1 = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J UC_i * VP_{ij} + \sum_{j=1}^J \sqrt{2 * OC_j * HC_j} * \sqrt{D_j} + \sum_{j=1}^J ZT * HC_j * \sqrt{LT_j} * \sqrt{U_j} + \sum_{j=1}^J FC_j * Y_j \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K TC_{jk} * D_{jk} + \sum_{k=1}^K \sqrt{2 * OC_k * HC_k} * \sqrt{D_k} + \sum_{k=1}^K ZT * HC_k * \sqrt{LT_k} * \sqrt{U_k} \\ & + \sum_{k=1}^K FC_k * X_k + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L TC_{kl} * D_l * A_{kl} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Max } Z2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (VP_{ij} * OEE_i) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^K A_{kl} = 1 \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L D_l * A_{kl} \leq \text{Cap}_k * X_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L D_l * A_{kl} = D_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L U_l * A_{kl} = U_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (6)$$

$$D_l * A_{kl} = D_{kl} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (7)$$

$$U_l * A_{kl} = U_{kl} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K D_k * B_{jk} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K U_k * B_{jk} = U_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K D_k * B_{jk} \leq \text{Cap}_j * Y_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (11)$$

$$D_k * B_{jk} = D_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (12)$$

$$U_k * B_{jk} = U_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J B_{jk} = X_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I VP_{ij} \leq \text{Cap}_j * Y_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I VP_{ij} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J VP_{ij} \leq \text{Cap}_i \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (17)$$

$$X_k, Y_j, A_{kl}, B_{jk} \in \{0,1\} \quad (18)$$

Donde la función objetivo Z1 busca minimizar los costos de transporte, costos de apertura de almacenes y proveedores, costo económico de pedido y el inventario de seguridad de las plantas y almacenes. La función objetivo Z2 busca maximizar la efectividad total del equipo en la selección de proveedores. La restricción (3) indica que un minorista l es asignado a un solo almacén k . En (4) se acota la asignación de los minoristas en relación a la capacidad de cada almacén activo. La restricción (5)-(6) presenta el balance de flujo la demanda y varianza en cada almacén. En (7)-(8) asigna la demanda y varianza de cada minorista al flujo de almacenes a minoristas. La restricción (9)-(10) presenta el balance de flujo de demanda y varianza en cada planta. En (11) se acota la asignación de los almacenes en relación a la capacidad de cada planta. En (12)-(13) asigna el volumen de flujo de planta a cada almacén. La restricción (14) asegura que de una planta activa se manda volumen de flujo hacia el almacén. En (15) se acota el volumen de flujo del proveedor a la planta en relación a la capacidad de cada planta activa. En (16) se presenta el balance del flujo del proveedor asignado a cada a la planta. La restricción (17) indica que el volumen de flujo del proveedor a la planta es menor o igual a la capacidad de cada proveedor. La restricción (18) indica que son X_k, Y_j, A_{kj}, B_{jk} variables binarias.

6.2 Linealización de restricciones DCSIR-PL

En la linealización de restricciones (9) – (13) se considera que, en la restricción (9) se presenta una variable de decisión binaria B_{jk} y un variable auxiliar entera discreta D_k .

$$\sum_{k=1}^K D_k * B_{jk} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (9)$$

Además de acuerdo a (5) se tiene que

$$\sum_{l=1}^L D_l * A_{kl} = D_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5)$$

Bajo esos argumentos podemos escribir la restricción (9) de la siguiente forma:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L D_l * B_{jk} * A_{kj} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (19)$$

Teniendo en este caso un producto de dos variables binarias de decisión $B_{jk} * A_{kj}$ y una constante D_l . Si generamos una sola variable binaria C_{jkl} y se agregan las desigualdades (21) y (22) que aseguran que si $A_{kj} = 1$ y $B_{jk} = 1$ la variable $C_{jkl} = 1$ en otro caso 0, se obtiene una restricción lineal (20) que involucra el producto de una constante D_l por una variable binaria de decisión C_{jkl} y un par de desigualdades lineales.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L D_l * C_{jkl} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (20)$$

$$C_{jkl} \geq A_{kl} + B_{jk} - 1 \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (21)$$

$$C_{jkl} \leq B_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (22)$$

Bajo el mismo argumento tenemos que las restricciones (10) – (13) son representadas de la siguiente forma:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L U_l * C_{jkl} = U_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L D_l * C_{jkl} \leq Cap_j * Y_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^L D_l * C_{jkl} = D_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (25)$$

$$\sum_{l=1}^L U_l * C_{jkl} = U_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (26)$$

6.3 Linealización a tramos de función objetivo Z1 DCSIR-L

En una función lineal a tramos, la función esta definida por dos o más diferentes rectas presentadas en diferentes partes del dominio de la función. Se usa una función lineal a tramos del costo económico de pedido, y del costo de mantener el inventario de las plantas j y de los almacenes k en la función objetivo Z1. En el caso del costo económico de pedido de cada planta j $\sum_{j=1}^J \sqrt{2 * D_j * OC_j * HC_j}$ se trabajara en la linealización de $\sqrt{D_j}$, debido a que el resto de los términos son constantes *Figura 4*. La función $\sqrt{D_j}$ es aproximadamente lineal a $BSd_{jm-1} * Fd_{jm} + Pd_{jm} * Gd_{jm}$, con $BSd_{j1} < BSd_{j2} < BSd_{j3} \dots < BSd_{jm}$ y $Pd_{j1} > Pd_{j2} > Pd_{j3} \dots > Pd_{jm}$, para $m = 1 \dots M$ tramos, donde ASd_{jm} valor de la demanda de la planta j en la sección m , BSd_{jm} valor de la función de la demanda de la planta j en la sección m , Fd_{jm} una variable binaria de apertura de arco planta j en el tramo m , Pd_{jm} es la pendiente de la demanda en el tramo m , y Gd_{jm} volumen de demanda en la pendiente de la planta j en el tramo m .

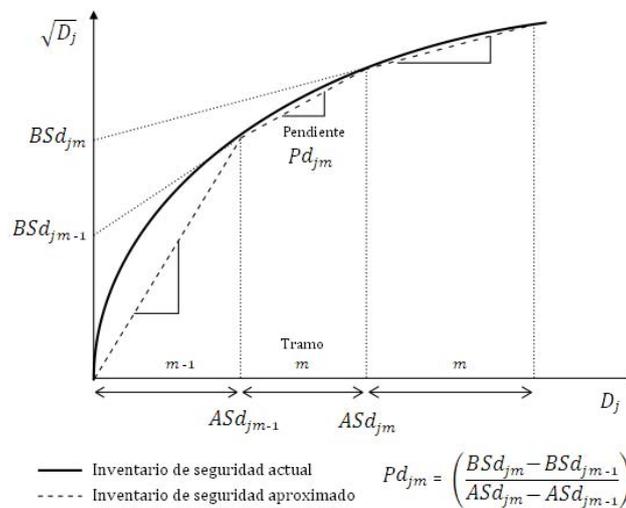


Figura 4. Gráfica función lineal a tramos.

Por lo tanto la función lineal a tramos es de la siguiente manera.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sqrt{2 * OC_j * HC_j * (BSd_{jm-1} * Fd_{jm} + Pd_{jm} * Gd_{jm})} \quad (26)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m=1}^M Gd_{jm} + ASd_{j,m-1} * Fd_{jm} = D_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (27)$$

$$Gd_{jm} \leq ASd_{jm} * Fd_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, J \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (28)$$

$$\sum_{m=1}^M Fd_{jm} \leq Y_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (29)$$

Bajo el mismo análisis tenemos la función lineal a tramos del costo de mantener el inventario en cada planta j (30), costo económico de pedido (31) y del costo de mantener en cada almacén k (32).

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M ZT * HC_j * \sqrt{LT_j} * (BSu_{jm-1} * Fu_{jm} + Pu_{jm} * Gu_{jm}) \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sqrt{2 * OC_k * HC_k} * (BSd_{km-1} * Fd_{km} + Pd_{km} * Gd_{km}) \quad (31)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M ZT * HC_k * \sqrt{LT_k} * (BSu_{km-1} * Fu_{km} + Pu_{km} * Gu_{km}) \quad (32)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m=1}^M Gu_{jm} + ASu_{jm-1} * Fu_{jm} = U_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (33)$$

$$Gu_{jm} \leq ASu_{jm} * Fu_{jm} \quad \forall j = 1, \dots, J \forall m = 1, \dots, M \quad (34)$$

$$\sum_{m=1}^M Fu_{jm} \leq Y_j \quad \forall j = 1, \dots, J \quad (35)$$

$$\sum_{m=1}^M Gd_{km} + ASd_{km-1} * Fd_{km} = D_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (36)$$

$$Gd_{km} \leq ASd_{km} * Fd_{km} \quad \forall k = 1, \dots, K \forall m = 1, \dots, M \quad (37)$$

$$\sum_{m=1}^M Fd_{km} \leq X_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (38)$$

$$\sum_{m=1}^M Gu_{km} + ASu_{km-1} * Fu_{km} = U_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (39)$$

$$Gu_{km} \leq ASu_{km} * Fu_{km} \quad \forall k = 1, \dots, K \forall m = 1, \dots, M \quad (40)$$

$$\sum_{m=1}^M Fu_{km} \leq X_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (41)$$

7. Enfoque de solución bi-objetivo

El enfoque de solución para instancias pequeñas es el método de epsilon-constraint interpretado mediante el óptimo de Pareto. De acuerdo al método de epsilon-constraint se optimiza uno de los objetivos, y el resto de los objetivos se incorporan al modelo en forma de restricciones paramétricas. En este caso se toma la restricción Z2 para ser incorporada como restricción paramétrica, quedando de la siguiente manera.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (VP_{ij} * OEE_i) \geq \mathcal{E} \quad (2)$$

La programación lineal paramétrica, investiga los cambios en la solución óptima de la PL que son el resultado de variaciones continuas predeterminadas en los coeficientes de la función objetivo y en el lado derecho de las restricciones, en este caso \mathcal{E} representa el porcentaje de OEE promedio del flujo total de VP_{ij} con respecto a la demanda D_i en el sistema.

8. Experimentación y resultados

A continuación se presentan los resultados (soluciones no dominadas) de las tres formas de modelación de DCSIR-BO en Lingo 10.0. (DCSIR-NL = No lineal, DCSIR-PL= Lineal

restricciones, DCSIR-L = Lineal restricciones y función objetivo). En las tablas 1-3 se resumen los resultados obtenidos de la evaluación de los modelos. Para cada modelación se expresa el valor de la función objetivo (Min Z1) y el tipo de la solución. Si en el estatus de una solución aparece la palabra " O. Local" significa que se logró encontrar una solución óptima local, en otro caso, la palabra "O. Global" significa que se encontró una solución óptima global.

En una instancia inicial se consideran 4 proveedores, 3 plantas, 5 localizaciones de almacenes regionales, 10 minoristas y un nivel de servicio $z = 95\%$.

Tabla 1 Instancia 1 4S-3P-5W-10R

ϵ	Min Z1			Solución			Tiempo Computacional		
	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L
40%	8694249	8694249	8694249	O. Local	O. Local	O. Global	00:05:54	00:00:24	00:00:32
45%	8701389	8701389	8701389	O. Local	O. Local	O. Global	00:03:01	00:00:21	00:00:32
50%	8708529	8708529	8708529	O. Local	O. Local	O. Global	00:04:27	00:00:29	00:00:39
55%	8718278	8715669	8715669	O. Local	O. Local	O. Global	00:05:31	00:00:21	00:00:32
60%	8724829	8724829	8724829	O. Local	O. Local	O. Global	00:04:11	00:00:18	00:00:17
65%	8739240	8737019	8737019	O. Local	O. Local	O. Global	00:05:26	00:00:19	00:00:17
70%	nf	nf	nf	-	-	-	-	-	-

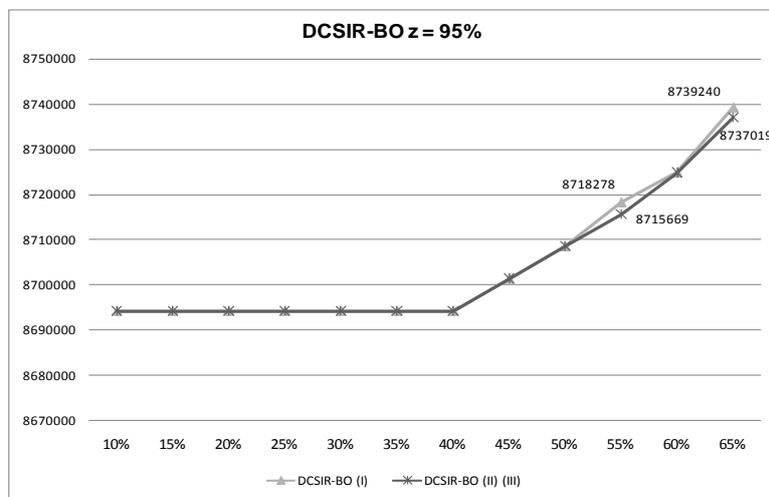


Figura 5. Frente Pareto Instancia 1

En la segunda instancia se consideran 4 proveedores, 3 plantas, 5 localizaciones de almacenes regionales, 15 minoristas y un nivel de servicio $z = 95\%$.

Tabla 2 Instancia 2 4S-3P-5W-15R

ϵ	Min Z1			Solución			Tiempo Computacional		
	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L
55%	8738079	8737590	8737590	O. Local	O. Local	O. Global	01:45:11	00:29:41	00:02:48
60%	8738190	8738099	8738099	O. Local	O. Local	O. Global	02:35:14	00:35:11	00:02:49
65%	8759112	8756331	8747271	O. Local	O. Local	O. Global	03:29:16	00:27:41	00:09:41
70%	nf	nf	nf	-	-	-	-	-	-

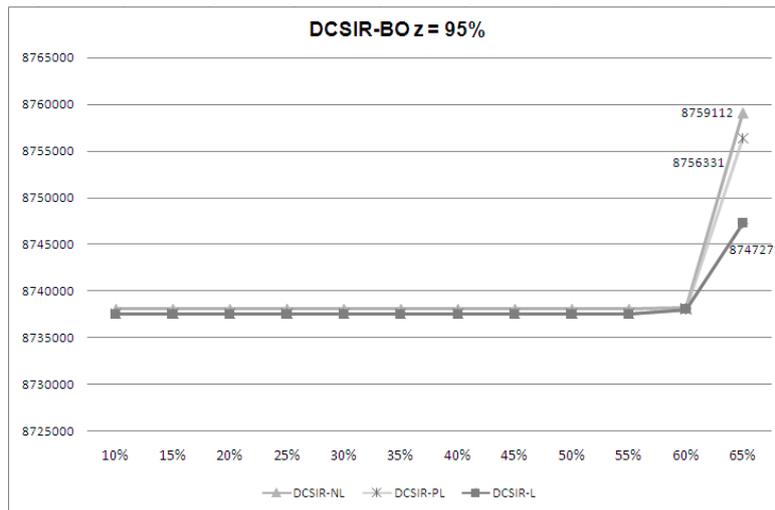


Figura 6. Frente Pareto Instancia 2

En una tercera instancia se consideran 5 proveedores, 3 plantas, 8 localizaciones de almacenes regionales, 20 minoristas y un nivel de servicio $z = 95\%$.

Tabla 3 Instancia 3 4S-3P-8W-20R

ε	Min Z1			Solución			Tiempo Computacional		
	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L	DCSIR- NL	DCSIR-PL	DCSIR-L
60%	-	10924710	10924710	-	O. Local	O. Global	-	01:20:15	00:18:30
65%	-	10944616	10931840	-	O. Local	O. Global	-	03:44:23	00:37:58
70%	nf	nf	nf	-	-	-	-	-	-

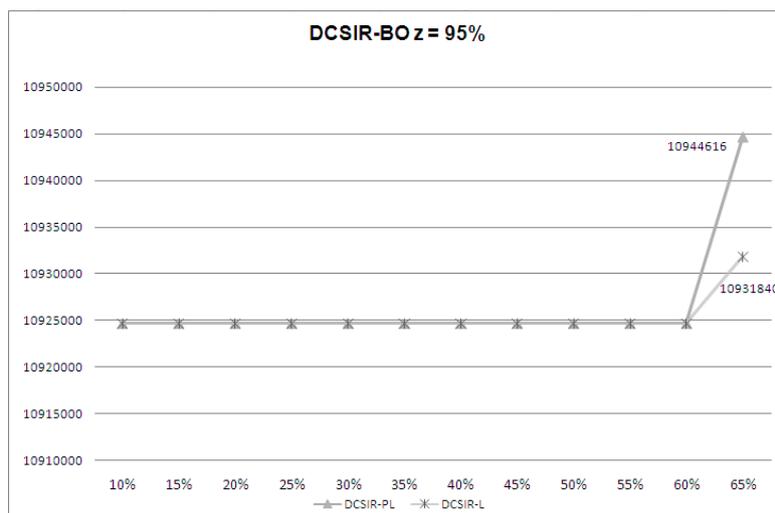


Figura 7. Frente Pareto Instancia 3

En las tres instancias se observó que el valor de la función objetivo (Min Z1) en DCSIR- NL es mayor en comparación con DCSIR-PL y DCSIR-L, debido a que sus soluciones fueron óptimas locales (salvo en la instancia 3, la cual es intratable computacionalmente para Lingo 10.0). Los modelos DCSIR-PL y DCSIR-L fueron capaces de resolver las tres instancias propuestas, pero DCSIR-L obtuvo soluciones óptimas globales de menor costo en un tiempo computacional menor. La diferencia del valor de la función objetivo (Min Z1) de los tres modelos se presentan

principalmente en los últimos valores de \mathcal{E} (50% - 60%), antes de llegar a la infactibilidad. Como es conocido, el incremento en algún conjunto de proveedores, plantas, almacenes y/o clientes produce un crecimiento exponencial en el número de variables y en el número de restricciones. Además si se considera una función objetivo no lineal genera que el modelo DCSIR- NL se vuelve computacionalmente intratable al generar instancias mayores.

8. Conclusiones y trabajos futuros

En los modelos DCSIR-BO utilizados para el diseño de cadena de suministro de localización-inventario y selección de proveedores bajo un ambiente de integración de riesgo, se observo que los modelos DCSIR-PL y DCSIR-L tienen un mejor desempeño en relación a su función de costos y tiempo computacional en instancias pequeñas frente a DCSIR- NL. Más sin embargo se continuara trabajando con instancias mayores bajo el enfoque de Relajación de Langrange.

Referencias

- Altıparmak F., Gen M., Lin L., Paksoy T.** (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 197–216.
- Chopra S. and Meindl P.** (2001). *Administración de la cadena de suministro, estrategia, planeación y operación*. Pearson Prentice Hall. (2001).
- Daskin M., Coullard C., and Shen Z.** (2002). An inventory-location model: formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of Operations Research*, 110, 83-106.
- Erlebacher S.J., Meller R.C.** (2000). The interaction of location and inventory in designing distribution systems. *IIE Transactions*, 32, 155–166.
- Gaur S., Ravindran A.** (2006). A bi-criteria model for the inventory aggregation problem under risk pooling. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 482-501.
- Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F.** (2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401–412.
- Miranda P., Garrido R.** (2004). Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network model with stochastic demand. *Transportation Research Part E*, 40, 183-207.
- Nozick L.K., Turnquist M.A.** (1998). Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 34, 173–186.
- Nozick L.K.** (2001). The fixed charge facility location problem with coverage restriction. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37, 281-296.
- Olivares-Benítez, González-Velarde, Ríos-Mercado Roger Z.** (2010). A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices, *TOP*, 10.1007/s11750-010-0162-8, 1–25.
- Ozsen L.** (2004). *Location-Inventory Planning Models: Capacity Issues and Solution Algorithms*, PhD Dissertation, Northwestern University, IL. 2004.
- Sabri E.H., Beamon B.M.** (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581–598.
- Shen Z., Daskin M.** (2005). Trade-offs between customer service and cost in integrated supply chain design. *Manufacturing and Service Operations Management*, 7(3), 188-207.
- Shen Z.-J.M., Coullard C., Daskin M.S.** (2003). A joint location-inventory model. *Transportation Science*, 37, 40–55.