REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA (9). Páginas 44–68.
Junio de 2010. ISSN: 1886-516X. D.L: SE-2927-06.
URL: http://www.upo.es/RevMetCuant/art37.pdf

Enfoques de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil

Díaz-Madroñero, Manuel
Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP)
Universidad Politécnica de Valencia
Correo electrónico: fcodiama@cigip.upv.es

Peidro, David
Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP)
Universidad Politécnica de Valencia
Correo electrónico: dapeipa@cigip.upv.es

Mula, Josefa
Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP)
Universidad Politécnica de Valencia
Correo electrónico: fmula@cigip.upv.es

Ferriols, Francisco J.
Departamento de Organización de Empresas
Universidad Politécnica de Valencia
Correo electrónico: fraferm3@omp.upv.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo para la planificacin del transporte a nivel operativo en una cadena de suministro. Los objetivos del modelo propuesto son la minimización del número de camiones utilizados y del inventario total, considerando como parámetro borroso las capacidades de los vehículos empleados. Se propone una metodología de resolución para transformar el modelo original en un modelo de programación lineal entera mixta con un único objetivo, aplicando diferentes enfoques recogidos en la literatura. El modelo propuesto se valida con datos pertenecientes a una cadena de suministro real del sector del automóvil. Por último, los resultados obtenidos para cada uno de los enfoques empleados muestran la mejora aportada por el modelo propuesto respecto al procedimiento heurístico para la toma de decisiones empleado en la cadena de suministro de estudio.

Palabras clave: planificación de la cadena de suministro; planificación del transporte; programación lineal *fuzzy* multiobjetivo; incertidumbre.
Clasificación JEL: C61; L00.
MSC2010: 90B06; 90B50.

Artículo recibido el 22 de febrero de 2010 y aceptado el 27 de mayo de 2010.

Fuzzy Multiobjective Mathematical Programming Approaches for Operational Transport Planning in an Automobile Supply Chain

ABSTRACT

In this paper, a fuzzy multiobjective mathematical programming model for operational transport planning in a supply chain is presented. The objectives of the proposed model are the minimization of the number of used trucks and the total inventory level, by considering vehicle capacities as a fuzzy parameter. We propose a solution methodology to transform the original model into a mixed integer linear programming model with a single objective by using different approaches in the literature. The proposed model is validated with data from a real-world automobile supply chain. Finally, the results for each of the approaches show the improvement obtained by the proposed model in comparison to the heuristic procedure for decision making used in the supply chain under study.

Keywords: supply chain planning; transport planning; fuzzy multiobjective linear programming; uncertainty.
JEL classification: C61; L00.
MSC2010: 90B06; 90B50.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de la cadena de suministro (CS) consiste en la planificación y coordinación de las actividades de producción, compras y aprovisionamiento asociadas a uno o más productos a través de múltiples organizaciones (Arunachalam y Sadeh 2005). Coyle *et al.* (2003) definen el transporte como el enlace físico que conecta los puntos fijos de una CS logística y, por lo tanto, es un proceso integral clave para contribuir al objetivo global de éxito de la gestión de la CS; la planificación y el control del flujo de materiales (Ellram 1991) y el aporte de valor añadido al cliente (Christopher y Towill 2001).

Sin embargo, la naturaleza compleja y dinámica de las relaciones entre los diferentes actores en una CS implica un grado importante de incertidumbre en las decisiones de planificación. En este contexto, en el que las decisiones relacionadas con el transporte involucran recursos e informaciones de diferentes entidades de una CS, existen dos aspectos principales a los que se enfrenta el decisor: (1) objetivos en conflicto que pueden surgir de la naturaleza de las operaciones (por ejemplo la minimización de costes y, simultáneamente, el incremento del nivel de servicio al cliente), así como la estructura de la CS, en la que generalmente es complicado alinear los objetivos de los diferentes participantes; y (2) la falta de conocimiento de datos (por ejemplo, borrosidad de la demanda). Por lo tanto, es importante diseñar modelos que aborden los problemas en esta área para posibilitar el manejo de estos dos tipos de complejidad (Torabi y Hassini 2008).

En este trabajo se propone un modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo para la planificación del transporte a nivel operativo con aplicación en una CS real perteneciente al sector del automóvil. El problema de planificación del transporte en la CS (PTCS) a nivel operativo que se considera en este trabajo involucra la optimización del uso de los recursos de transporte (por ejemplo, la minimización del número total de camiones utilizado) y de los niveles de inventario determinando la cantidad a aprovisionar de cada producto bajo ciertas restricciones de almacenamiento y transporte bajo incertidumbre (consultar la Sección 3 para una definición detallada). Para la resolución del modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo correspondiente al problema PTCS se emplea una metodología interactiva con el propósito de obtener una solución de compromiso entre ambos objetivos. Asimismo, se emplean diferentes enfoques de programación *fuzzy* multiobjetivo cuyos resultados se comparan con el procedimiento heurístico de toma de decisiones que se aplica en la CS estudiada.

Las contribuciones principales de este trabajo son: (1) introducir un nuevo modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo para la resolución del problema PTCS a nivel operativo en una CS diádica, multiproducto y multiperiodo; (2) desarrollar un modelo para un contexto incierto que considera objetivos y datos borrosos relacionados con los niveles de capacidad de transporte; y (3) aplicar el modelo propuesto a una CS real dedicada a la fabricación de asientos de automóviles y comparar los resultados obtenidos por los diferentes enfoques *fuzzy* multiobjetivo empleados y el procedimiento heurístico que se aplica en ésta.

El artículo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 2 se presenta una revisión de la literatura relacionada con el problema PTCS a nivel operativo y bajo incertidumbre. Posteriormente, en la Sección 3, se describe el problema PTCS a nivel operativo. En la Sección 4 se propone el modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo asociado al problema descrito y en la Sección 5 se describe la metodología de resolución y los diferentes enfoques de programación *fuzzy* multiobjetivo empleados. Seguidamente, en la Sección 6, se evalúan los resultados obtenidos por los diferentes enfoques aplicados a una CS del sector del automóvil. Por último, se presentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los procesos de transporte son partes esenciales de la CS pues posibilitan el flujo de productos entre una empresa y sus proveedores y clientes (Fleischmann 2005). En este contexto, diversos autores han abordado el estudio de la planificación operativa del transporte desde un punto de vista determinista. Por ejemplo, Lu y Dessouky (2004) abordan el problema de la recogida y entrega de productos con múltiples vehículos disponibles con el objetivo de minimizar los costes de transporte, tanto fijos como variables. Cisheng *et al*. (2008) analizan las operaciones de carga en un centro de distribución urbano, proponiendo un modelo de planificación de cargas para equilibrar el peso y el volumen de las mercancías con el objetivo que aumentar la eficiencia de los recursos de transporte. Por otro lado, Ertogral (2008) propone un modelo de programación lineal entera mixta para la integración del problema del inventario y el transporte, considerando los costes de transporte como funciones lineales a trozos. Asimismo, Pan *et al*. (2009) proponen un modelo de programación matemática para la planificación sincronizada de inventario y transporte en una red de distribución con vehículos subcontratados a un operador logístico.

Según Peidro *et al*. (2009b, 2009c), se pueden encontrar en la literatura diferentes enfoques para la planificación de la CS bajo incertidumbre. Entre ellos, los basados en programación matemática *fuzzy* están siendo ampliamente aplicados en problemas de planificación del transporte. Jiménez y Verdegay (1999) presentan un modelo de programación matemática *fuzzy* con un enfoque paramétrico para modelar la incertidumbre en las capacidades del aprovisionamiento, el transporte y la demanda. Shih (1999) propone diversos modelos de programación matemática *fuzzy* para la planificación del transporte de cemento en Taiwan bajo diversas fuentes de incertidumbre. Zheng y Liu (2006) desarrollan un modelo de programación matemática *fuzzy* para incorporar tiempos de tránsito difusos en el problema de la planificación de rutas con ventanas temporales. Asimismo, Bilgen (2007) propone un modelo lineal posibilista para resolver el problema de la planificación de la distribución con costes inciertos de transporte y almacenamiento. Por otro lado, Liang y Cheng (2009) y Liang (2006, 2008a, 2008b) proponen modelos interactivos de programación matemática *fuzzy* para la resolución de problemas de transporte multiobjetivo contemplando objetivos difusos y la incertidumbre en la demanda y la capacidad de fabricación.

Sin embargo, otros autores han abordado el problema de la toma de decisiones asociadas al transporte como parte de la planificación conjunta de la producción y la distribución, o bien como parte de un problema global de planificación de aprovisionamiento, fabricación y distribución. En Peidro *et al*. (2009b) se realiza una revisión bibliográfica de modelos de planificación de CS bajo condiciones de incertidumbre.

Muchos problemas del mundo real implican la optimización simultánea de varios objetivos en conflicto. Estos problemas se caracterizan por una gran complejidad del espacio de decisión asociado, especialmente en condiciones de incertidumbre, siendo necesario emplear técnicas avanzadas de resolución (Deb 2001). Así pues, la programación matemática *fuzzy* puede aplicarse a la resolución de modelos de programación lineal multiobjetivo. La ventaja principal de los enfoques de programación matemática *fuzzy* es que pueden ser capaces de medir el grado de satisfacción de cada función objetivo de una forma explícita. Este aspecto puede ayudar al decisor a tomar su decisión final eligiendo una solución de compromiso entre el grado de satisfacción y la preferencia o importancia relativa de cada función objetivo (Torabi y Hassini 2008). En este sentido, Bit *et al*. (1993a), Bit *et al*. (1993b), Bit (2005), Jiménez y Verdegay (1998), Li y Lai (2000) y Lee y Li (1993) presentan enfoques de programación matemática *fuzzy* para la resolución de problemas de transporte multiobjetivo en casos de estudio bajo condiciones de incertidumbre.

Así pues, puede destacarse la necesidad de modelos con enfoques multiobjetivo aplicados a cadenas de suministro reales que permitan al decisor optimizar simultáneamente los objetivos en conflicto que regulan el uso de recursos limitados en las empresas. Será importante tener en cuenta este aspecto cuando se trate de resolver el problema PTCS considerado en este trabajo, el cual queda detallado en la sección siguiente.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema PTCS considerado en este trabajo corresponde a una CS de tipo diádica (Huang *et al*. 2003) perteneciente al sector del automóvil (Figura 1). Está formada por un fabricante de automóviles y un proveedor de primer nivel (*first-tier*) cuyo proceso de aprovisionamiento de materiales y componentes se realiza según diferentes métodos de recogida asociados a los modos de carga completa o *full truck load* (FTL), carga parcial o *less than load* (LTL) y recogida en proveedores o *milk-round* (Hernández *et al*. 2008).

La planificación del transporte es generalmente responsabilidad del proveedor. Sin embargo, hay excepciones importantes, como en la industria del automóvil, en la que el ensamblador o fabricante controla el transporte de sus proveedores. En este caso, la planificación del transporte se desarrolla en la etapa de aprovisionamiento (Fleischmann 2005).

Así pues, el problema PTCS a nivel operativo considerado en este trabajo se define del siguiente modo:

Dados:

- Una topología de CS (proveedor de primer nivel y ensamblador).
- Datos de productos, como número de productos que caben en un contenedor, tamaño de lote de pedido, grupos de productos que han de pedirse de forma conjunta, etc.
- Datos de transporte, como capacidades de vehículos, número de vehículos disponibles en cada periodo, la ocupación mínima a mantener en cada camión, etc.
- Inventario inicial.
- Demanda del ensamblador a lo largo del horizonte de planificación.

Determinar:

- La cantidad a pedir de cada producto.
- El nivel de inventario de cada producto.
- El número de camiones necesarios en cada periodo y su ocupación.

Siendo los objetivos principales:

- Minimizar el número total de camiones empleados.
- Minimizar el nivel total de inventario para satisfacer la demanda del ensamblador sin incurrir en retrasos.

Asimismo, se asume que:

- La demanda del ensamblador es firme a lo largo de todo el horizonte de planificación. Al tratarse de un problema relativo al nivel operativo, el horizonte de planificación es corto y la demanda no tiende a variar.
- No se consideran los tiempos de transporte; únicamente se indica el periodo en el que se recibirán las cantidades a transportar independientemente de cuándo fueron pedidas al proveedor.

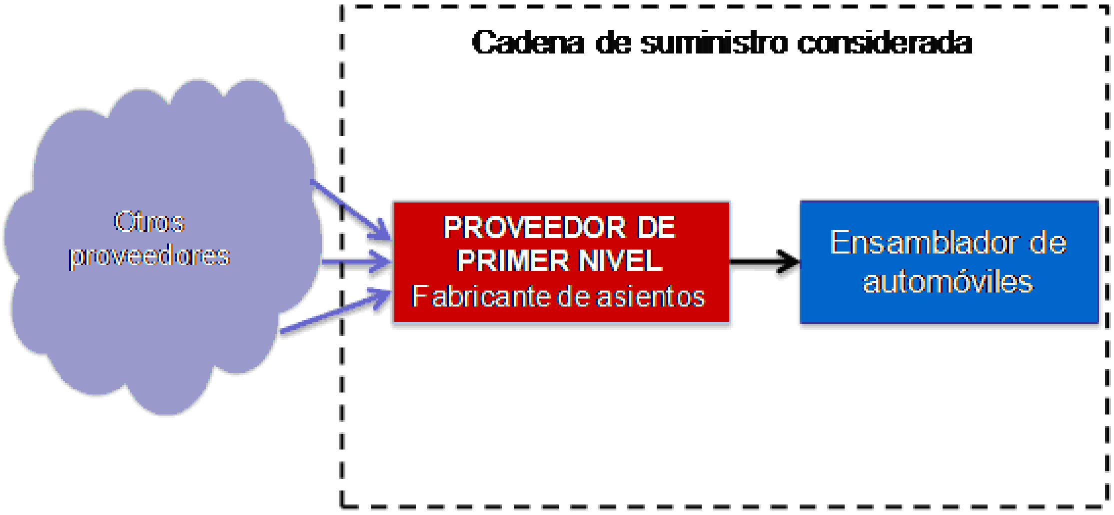

Figura 1. CS considerada.

3.1. Procedimiento heurístico

El proceso de toma de decisiones relativas a la planificación operativa del transporte en la CS considerada se realiza mediante un procedimiento heurístico soportado por una hoja de cálculo, a partir de la cual el personal del proveedor de primer nivel encargado del aprovisionamiento calcula las necesidades netas de materiales a corto plazo para satisfacer la demanda del ensamblador, minimizar los inventarios y mejorar la utilización de los recursos de transporte, sin incurrir en retrasos.

Los productos considerados en este problema corresponden a los materiales que componen la tapicería de los asientos fabricados. El proveedor de tela establece grupos de productos para los diferentes tipos de tejidos utilizados en un vehículo completo. Cada grupo se compone de tres elementos determinados por las diversas opciones ofrecidas por el ensamblador de coches a los clientes finales. El proveedor obliga que los pedidos sean realizados para cada grupo de productos de forma conjunta y según su tamaño de lote asociado, con un alto costo de penalización adicional para aquellas piezas pedidas de forma desequilibrada. Sin embargo, dadas las características del producto y su fácil deterioro una vez almacenado, puede suceder que no haya equilibrio entre los niveles de inventario de las diferentes piezas que componen un grupo.

El procedimiento heurístico comienza por la obtención del inventario inicial de cada producto al comienzo del período de planificación, junto con la demanda diaria de cada referencia. Los niveles de inventario y los valores de la demanda para cada producto en cada período determinan la decisión de pedir un nuevo camión. El proveedor suministra sus productos al principio de cada período, pero una vez que el ensamblador ha comenzado la producción. Como no se puede permitir retraso en la demanda, si el inventario de algún producto al final del primer período es inferior al 40% del nivel de la demanda en el período siguiente, el planificador calcula la inclusión de un camión nuevo en el período 1.

La carga del camión se realiza en función de la capacidad disponibles (entre 84 y 90 contenedores por camión), las agrupaciones de productos que han de ser pedidos de forma conjunta y el tamaño de lote de pedido asociado a estos grupos. Así pues, una vez localizado el primer ítem cuyo nivel de inventario no excede, al menos, el 40% de la demanda en el periodo posterior, la cantidad necesaria para cubrir el resto de la demanda es introducida manualmente en la hoja de cálculo como múltiplo entero del lote de pedido correspondiente. De igual forma se procede con el resto de productos del grupo al que pertenece el ítem anterior. La hoja de cálculo actualiza el nivel de inventario incorporando las nuevas cantidades a pedir determinando, a su vez, la cantidad total de contenedores a cargar en el camión. Posteriormente, se repite la operación para el siguiente producto cuyo nivel de inventario esté por debajo del 40% de la demanda en el periodo siguiente, y así sucesivamente. En el caso de que exista espacio disponible adicional una vez calculadas todas las cantidades necesarias a pedir, puede completarse la capacidad del camión con lotes de productos cuya demanda sea más frecuente, respetando las agrupaciones de productos y los tamaños de lote de pedido correspondientes.

Si una vez actualizados los valores de inventario en función de las cantidades a pedir para el camión introducido, el stock de algún producto sigue siendo inferior al 40% de la demanda en el periodo siguiente, se repite el proceso añadiendo el número de camiones necesarios hasta que el nivel de inventario sea superior, al menos, al 40% de la demanda en el periodo siguiente. Este proceso se repetirá para todos los periodos a lo largo del horizonte de planificación.

El personal encargado del aprovisionamiento revisa los resultados obtenidos en el procedimiento heurístico y ocasionalmente modifican las cantidades calculadas para conseguir los objetivos más fácilmente. Según Allen y Liu (1995) y Evans *et al*. (1990), en la práctica, el personal logístico generalmente confía en su experiencia y en su juicio personal para elegir modos de transporte, consolidar envíos o seleccionar el modo de transporte, por lo que se obtienen decisiones subóptimas.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

Con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos por el procedimiento heurístico empleado, se propone un nuevo modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo para la resolución de problemas PTCS a nivel operativo. El modelo propuesto considera objetivos y datos difusos asociados a los niveles de capacidad de transporte. La nomenclatura empleada en el modelo propuesto, compuesta por índices, parámetros y variables de decisión, se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Nomenclatura (una tilde ~ representa la borrosidad del parámetro)

Índices y conjuntos	
I:	Conjunto de productos *(i=1, 2, …, I)*
J:	Conjunto de grupos de productos que han de pedirse conjuntamente *(j=1, 2, …, J)*
K:	Conjunto de camiones *(k=1, 2, .., K)*
T:	Conjunto de periodos de tiempo en el horizonte de planificación *(t=1, 2, .., T)*
Variables de decisión	
Q_{ikt}:	Unidades a transportar del producto *i* en el camión *k* en el periodo *t*
G_{ikt}:	Unidades a transportar del producto *i* correspondientes el grupo *j*, en el camión *k*, en el periodo *t*
C_{kt}:	Contenedores transportados por el camión *k* en el periodo *t*
I_{it}:	Inventario del producto *i* al final del periodo *t*
K_{jkt}:	Número de lotes a pedir de los productos del grupo *j*, a transportar en el camión *k*, en el periodo *t*
Y_{kt}:	Variable binaria que toma el valor 1 si el camión *k* se utiliza en el periodo *t* y 0 en caso contrario
Funciones objetivo	
z_1:	Número total de camiones utilizados
z_2:	Inventario total a lo largo del horizonte de planificación
Parámetros	
u_i:	Número de unidades del producto *i* que caben en un contenedor
l_j:	Número de unidades que componen cada lote de pedido del grupo *j*
b_{ij}:	1 si el producto *i* pertenece al grupo *j*, 0 en caso contrario
D_{it}:	Demanda del producto *i* en el periodo *t*
$\tilde{M}$:	Capacidad máxima *fuzzy* de cada vehículo disponible
m:	Mínima capacidad a ocupar en cada vehículo
$I0_i$:	Inventario inicial del producto *i*

La formulación del modelo de programación *fuzzy* multiobjetivo es la siguiente:

Funciones objetivo:

- Minimización del número de camiones utilizado

$$\text{Min } z_1 \cong \sum_{k=1}^{K} \sum_{t=1}^{T} Y_{kt} \tag{1}$$

- Minimización del inventario total generado

$$\text{Min } z_2 \cong \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=1}^{T} I_{it} \tag{2}$$

El símbolo "≅" es la versión "fuzzificada" de "=" y se corresponde con la "fuzzificación" de los niveles de aspiración. En la práctica, la mayoría de los parámetros a considerar en un problema de planificación del transporte en una CS son inciertos por naturaleza, dado el carácter incompleto y/o la carencia de los datos necesarios a lo largo del horizonte de planificación que pueden obtenerse subjetivamente (Chen y Chang 2006). Para cada función objetivo se asume que el decisor tiene objetivos difusos o *fuzzy*. Considerando la propiedad incierta del pensamiento humano puede asumirse que el decisor tiene un objetivo *fuzzy* $z_1(z_2)$ con un intervalo aceptable [$z_1^l(z_2^l)$, $z_1^u(z_2^u)$].

Así pues, sería muy satisfactorio que el valor de la función objetivo fuera menor que $z_1^l(z_2^l)$, pero inaceptable que estuviera por encima de $z_1^u(z_2^u)$ (Chen y Lee 2004). En consecuencia, las ecuaciones (1) y (2) son difusas e incorporan las variaciones en las estimaciones del decisor de las soluciones del problema de optimización multiobjetivo para la planificación del transporte en un entorno con incertidumbre. Por otra parte, es necesario que el decisor optimice simultáneamente los objetivos en conflicto en el marco de los niveles de aspiración difusos (Liang 2008a).

Restricciones:

$$I_{it} = I_{i(t-1)} - D_{it} + \sum_{k=1}^{K} Q_{ikt} \qquad \forall i,t \quad (3)$$

$$Q_{ikt} = \sum_{j=1}^{J} G_{ijkt} \qquad \forall i,k,t \quad (4)$$

$$G_{ijkt} = K_{jkt} \cdot l_j \cdot b_{ij} \qquad \forall i,j,k,t \quad (5)$$

$$C_{kt} = \sum_{i=1}^{I} Q_{ikt} / u_i \qquad \forall k,t \quad (6)$$

$$C_{kt} \leq \widetilde{M} \cdot Y_{kt} \qquad \forall k,t \quad (7)$$

$$C_{kt} \geq m \cdot Y_{kt} \qquad \forall k,t \quad (8)$$

$$I_{it} \geq 0.4 \cdot D_{it+1} \qquad \forall i,t \quad (9)$$

$$I_{it}, Q_{ikt}, G_{ijkt}, C_{kt}, K_{jkt}, Y_{kt} \geq 0 \qquad (10)$$

La ecuación (3) representa la restricción del balance del inventario. La ecuación (4) representa la cantidad total a pedir de cada producto, en cada camión, por cada periodo. La ecuación (5) establece la cantidad a pedir de cada producto, según cada una de las agrupaciones de productos a las que pertenece. La ecuación (6) calcula los contenedores a colocar en cada camión, en función de las cantidades a pedir por cada producto y de las unidades que caben por contenedor. La restricción (7) asegura que no se sobrepase el número máximo de contenedores que caben en cada camión, mientras que la ecuación (8) establece el mínimo de contenedores que se cargarán en cada camión. La ecuación (9) asegura un inventario capaz de cumplir al menos un 40% de la demanda del periodo siguiente. La ecuación (10) establece las condiciones de no negatividad de las variables de decisión.

En la práctica, la restricción (7) es difusa, dado que la capacidad total del camión depende de la combinación de los productos cargados, ya que aunque se conocen exactamente las dimensiones de cada uno de ellos, cuando se combinan con otros, la suma del total del espacio ocupado puede ser diferente a la suma aritmética de los espacios ocupados por cada uno de ellos independientemente. El resto de las restricciones se consideran con total certidumbre, ya que la información está disponible a lo largo de todo el horizonte de planificación. Asimismo, la demanda se considera firme puesto que, en este caso concreto, se trata de un problema definido en el nivel de decisión operativo, y por tanto en el corto plazo.

5. METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

En este apartado se transforma, según diferentes enfoques propuestos en la literatura, el modelo de programación *fuzzy* multiobjetivo propuesto en la sección anterior en un modelo de programación matemática auxiliar equivalente para la planificación operativa del transporte en la CS de estudio. Para cada uno de los enfoque empleados, se toman funciones de pertenencia lineales para la representación de las funciones objetivo *fuzzy* y el patrón de distribuciones de posibilidad triangulares para representar el parámetro difuso de la capacidad por vehículo.

5.1. Enfoques de programación *fuzzy* multiobjetivo

La investigación de operaciones se ha centrado tradicionalmente en la búsqueda de una única solución óptima y su optimalidad es generalmente de corta duración debido a que no se tiene en cuenta el carácter dinámico, adaptativo y de aprendizaje en el proceso de toma de decisiones (Lai y Hwang 1994a). Mediante el uso de un paradigma con interactivo, con incorporación progresiva de información, los enfoques de programación *fuzzy* interactiva mejoran la flexibilidad y la robustez de las técnicas para la toma de decisiones multiobjetivo, permitiendo al decisor aprender y reconocer las soluciones apropiadas así como la importancia relativa de los diferentes factores del sistema. Entre los métodos correspondientes a la incorporación progresiva de información de preferencias del decisor destacan los enfoques de Lai y Hwang (1994b), Li *et al*. (2006), Selim y Ozkarahan (2008) y Torabi y Hassini (2008), entre otros. Lai y Hwang (1994b) desarrollan el enfoque max-min aumentado, mientras que Selim y Ozkarahan (2008) proponen una versión modificada del enfoque de Werners (1987a; 1987b). Por otro lado, Li *et al*. (2006) proponen un enfoque *fuzzy* en dos fases. A continuación, se exponen los enfoques de programación *fuzzy* empleados en este trabajo:

Enfoque de Zimmerman (1978) (modelo ZM)

Según el enfoque de Zimmermann (1978), basado en el operador min de Bellman y Zadeh (1970), un modelo multiobjetivo puede transformarse en un modelo auxiliar equivalente con un único objetivo mediante la maximización de una variable auxiliar λ:

$$
\begin{array}{ll}
Max & \lambda \\
sujeto\ a & \lambda \le \mu_k(x) \text{ para } k=1, 2, \ldots, N \\
 & x \in X, \lambda, \mu_k(x) \in [0,1]
\end{array}
\tag{11}
$$

Enfoque de Lai y Hwang (1993) (modelo LH)

Para reducir las deficiencias del enfoque de Zimmerman (1978), Lai y Hwang (1993) proponen el enfoque max-min aumentado, según el cual un modelo multiobjetivo puede expresarse del siguiente modo:

$$
\begin{array}{ll}
Max & \lambda(x) = \lambda_0 + \delta \sum_k \theta_k \mu_k(x) \\
sujeto\ a & \lambda_0 \le \mu_k(x) \text{ para } k=1, 2, \ldots, N \\
 & x \in X, \lambda_0, \mu_k(x) \in [0,1]
\end{array}
\tag{12}
$$

λ_0 corresponde con el mínimo grado de satisfacción de las funciones objetivo, $\mu_k(x)$ con sus funciones de pertenencia, θ_k corresponde con los pesos conferidos por el decisor, según sus preferencias, a cada uno de los k objetivos, y δ es un número positivo lo suficientemente pequeño, pudiendo tomar un valor de 0.01 (Lai y Hwang 1993; 1994b). Asimismo, x debe pertenecer al espacio de soluciones factibles X.

Enfoque de Li et al. (2006) (modelo LZL)

Li *et al*. (2006) proponen un enfoque en dos fases que mejora el enfoque para la obtención de soluciones por compromiso propuesto por Wu y Guu (2001). En este enfoque se realizan los siguientes pasos:

1. Se resuelve el problema multiobjetivo mediante el enfoque de Zimmermann (1978) y se calculan los valores que adoptan las funciones de pertenencia asociadas a cada objetivo $\mu_k(x^0)$, donde $1 \le k \le N$
2. Hacer la asignación $\lambda_k^l = \mu_k(x^0)$ y resolver el modelo:

$$
\begin{array}{ll}
Max & \lambda(x) = \sum_k \theta_k \lambda_k(x) \\
sujeto\ a & \lambda_k^l \le \lambda_k \le \mu_k(x) \text{ para } k=1, 2, \ldots, N \\
 & x \in X, \lambda_k^l, \mu_k(x) \in [0,1]
\end{array}
\tag{13}
$$

Enfoque de Selim y Ozkarahan (2008) (modelo WM)

Selim y Ozkarahan (2008) proponen un nuevo enfoque para la resolución de problemas de programación matemática multiobjetivo basado en el método de Werners (1988). Según los autores, un modelo multiobjetivo puede formularse del siguiente modo:

$$\begin{aligned} &\textit{Max} && \lambda(x) = \gamma\lambda_0 + (1-\gamma)\sum_k \theta_k \lambda_k \\ &\textit{sujeto a} && \mu_h(x) \geq \lambda_0 + \lambda_k \text{ para } k=1, 2, \ldots, N \\ & && x \in X,\ \gamma,\ \lambda_0,\ \lambda_k \in [0,1] \end{aligned} \tag{14}$$

En este modelo, λ_0 y $\mu_k(x)$ corresponden con el mínimo grado de satisfacción global y el grado de satisfacción del objetivo k-ésimo respectivamente. Por otro lado, el parámetro γ corresponde con el coeficiente de compensación entre objetivos.

Enfoque de Torabi y Hassini (2008) (modelo TH)

Torabi y Hassini (2008) proponen un enfoque para la resolución de problemas de programación matemática multiobjetivo basado en la fusión de los enfoques propuestos por Lai y Hwang (1993) y Selim y Ozkarahan (2008). Así pues, según los autores un problema multiobjetivo puede expresarse según el problema lineal equivalente determinado por:

$$\begin{aligned} &\textit{Max} && \lambda(x) = \gamma\lambda_0 + (1-\gamma)\sum_k \theta_k \mu_k(x) \\ &\textit{sujeto a} && \lambda_0 \leq \mu_k(x) \quad \text{para } k=1, 2, \ldots, N \\ & && x \in X,\ \lambda_0,\ \gamma \in [0,1] \end{aligned} \tag{15}$$

donde $\mu_k(x)$ y $\lambda_0 = min_k\{\mu_k(x)\}$ corresponden con el grado de satisfacción del objetivo k-ésimo y con el mínimo grado de satisfacción global de los objetivos, respectivamente. Por otro lado, θ_k y γ corresponden con los pesos asociados a cada una de las funciones objetivo y al coeficiente de compensación, respectivamente. Los parámetros θ_k son controlados por el decisor en función de sus preferencias de tal forma que $\sum_k \theta_k = 1, \theta_k > 0.$ Asimismo, γ controla el nivel mínimo de satisfacción de los objetivos así como el grado de compromiso entre éstos, pudiendo obtenerse soluciones con distintos niveles de balanceo en función de las preferencias del decisor.

5.2. Resolución del problema de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo

Existen diferentes formas posibles para representar una función de pertenencia: lineal, exponencial, hiperbólica, lineal a trozos, etc. (en Peidro y Vasant (2009) se presenta una comparación entre las más destacadas). Entre los diferentes tipos de funciones de pertenencia, el más viable para la resolución de problemas de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo es el de funciones de pertenencia lineales, siendo su ventaja principal la generación de modelos lineales computacionalmente eficientes. Aún así, puede haber preferencias por otro tipo de patrones con diferentes aplicaciones (Zimmermann 1975; Zimmermann 1978; Tanaka *et al.* 1984).

Así pues, las funciones de pertenencia asociadas a las funciones objetivo del modelo propuesto se formulan como funciones de pertenencia lineales y decrecientes, puesto que se tratan de objetivos a minimizar. De forma analítica, estas funciones de pertenencia se expresan del siguiente modo:

$$\mu_1(z_1) = \begin{cases} 1 & z_1 < z_1^l \\ \dfrac{z_1^u - z_1}{z_1^u - z_1^l} & z_1^l < z_1 < z_1^u \\ 0 & z_1 > z_1^u \end{cases} \tag{16}$$

$$\mu_2(z_2) = \begin{cases} 1 & z_2 < z_2^l \\ \dfrac{z_2^u - z_2}{z_2^u - z_2^l} & z_2^l < z_2 < z_2^u \\ 0 & z_2 > z_2^u \end{cases} \tag{17}$$

donde $\mu_1(z_1)$ y $\mu_2(z_2)$ son las funciones de pertenencia de z_1 y z_2, y z_1^u y z_2^u son los valores máximos de las funciones objetivo, mientras que z_1^l y z_2^l son los límites inferiores.

Por otro lado, para expresar la imprecisión de la máxima capacidad disponible por camión, en la restricción (7) se adopta el patrón de distribuciones de posibilidad triangulares (Liang 2006; Wang y Liang 2005; Lai y Hwang 1992), lo que permite la "defuzzificación" del parámetro difuso y su conversión en un valor concreto. Aquellos lectores interesados en conocer otros enfoques de representación y defuzzificación de parámetros difusos aplicados a una CS pueden consultar Peidro (2006).

Por lo tanto, dada la posibilidad mínima aceptable (β) la restricción *fuzzy* (7) se transforma en una restricción concreta equivalente del siguiente modo:

$$C_{kt} \leq (w_1 M_\beta^p + w_2 M_\beta^m + w_3 M_\beta^o) \cdot Y_{jt} \tag{18}$$

donde $w_1+w_2+w_3=1$, y w_1, w_2 y w_3 corresponden a los pesos de los valores más pesimista, más posible y más optimista de la máxima capacidad disponible por vehículo. Según el concepto de valores más probables propuesto por Lai y Hwang (1992) y otros trabajos relevantes (Liang 2006; Wang y Liang 2005), se toman como valores $w_2 = 4/6$, $w_1 = w_3 = 1/6$ y $\beta = 0.5$.

Así pues, puede determinarse cada función de pertenencia mediante la especificación por parte del decisor del intervalo impreciso de valores para cada función objetivo (1) y (2), así como los valores máximo y mínimo del recurso *fuzzy* (18).

5.3. Procedimiento de resolución

En este trabajo, se adapta el procedimiento interactivo de resolución propuesto por Liang (2008a) para la resolución de problemas PTCS a nivel operativo, tomando como base el trabajo de Peidro *et al.* (2009a). Este procedimiento proporciona un marco sistemático que facilita el proceso de toma de decisiones bajo incertidumbre, permitiendo al decisor ajustar interactivamente la dirección de búsqueda durante el proceso de resolución con la finalidad de obtener una solución satisfactoria (Liang 2008a).

Así pues, el procedimiento de resolución propuesto se compone de las siguientes fases:

- Fase 1. Formular el modelo de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo original para la resolución de problemas PTCS, según las ecuaciones (1) hasta (10).
- Fase 2. Especificar las funciones de pertenencia correspondientes a las funciones objetivo y restricciones *fuzzy* según las ecuaciones (16) hasta (18).
- Fase 3. Determinar la posibilidad mínima aceptable (β) para la restricción *fuzzy* y especificar los valores correspondientes a la importancia relativa de las funciones objetivo (θ_k) y el coeficiente de compensación (γ).
- Fase 4. Transformar el modelo original de programación matemática *fuzzy* multiobjetivo en un modelo de programación lineal entera mixta mono-objetivo equivalente mediante la aplicación de alguno de los enfoques expuestos anteriormente.
- Fase 5. Resolver el modelo obtenido mediante el uso de un *solver* de programación lineal entera mixta y obtener una solución inicial de compromiso para el problema PTCS.
- Fase 6. Si la solución obtenida es satisfactoria para el decisor se finaliza el procedimiento. En caso contrario, volver a la Fase 2 y buscar una nueva solución satisfactoria mediante el ajuste de los parámetros controlables (β, θ_k , γ, $\tilde{M}$).

6. APLICACIÓN A UNA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR DEL AUTOMÓVIL

El modelo propuesto ha sido evaluado con datos relativos a una cadena de suministro real del sector del automóvil, con estructura diádica, compuesta por un proveedor de primer nivel encargado de la fabricación de asientos y por un ensamblador de automóviles. Asimismo, se realiza una evaluación de los resultados obtenidos por los diferentes enfoques empleados a partir de los datos asociados al problema de planificación operativa del transporte descrito.

6.1. Implementación y resolución

Los modelos propuestos han sido implementados con el lenguaje de optimización GAMS y resueltos mediante el *solver* Xpress-MP en el servidor de cálculo NEOS Server (Czyzyk *et al*. 1998; Gropp y Moré 1997). Los modelos han sido ejecutados para un periodo de planificación de 7 días, con 96 productos diferentes que conforman un total de 54 agrupaciones y que corresponden a un único proveedor que transporta sus productos mediante camiones completos con una ocupación mínima de 86 contenedores por vehículo. Por otro lado, a excepción del enfoque de Zimmermann (1978), en el resto de enfoques el decisor puede expresar la importancia que confiere a los objetivos lingüísticamente tal que $\theta_2 > \theta_1$ y basándose en esta relación se establece un vector de pesos θ = (0.1, 0.9). En este caso, para el decisor es más importante minimizar los niveles de inventario por lo que es deseable una solución desbalanceada con un mayor grado de satisfacción de z_2. Estos pesos se establecen para la totalidad de los experimentos computacionales realizados en el presente trabajo. Asimismo, para favorecer la obtención de soluciones desbalanceadas se establece un valor de coeficiente de compensación $\gamma=0.1$ para los enfoques de Selim y Ozkarahan (2008) y Torabi y Hassini (2008).

La Tabla 2, recogida en el Anexo I, muestra los datos básicos asociados a los productos como son los grupos a los que pertenecen, el inventario inicial y el número de unidades que caben en un contenedor. Por otro lado, la Tabla 3 (Anexo I) recoge los datos de la demanda del ensamblador a lo largo del horizonte de planificación.

6.2. Comparación de resultados

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos por los diferentes modelos, tomando solamente para los enfoques con coeficiente de compensación aquellos en los que éste toma el valor de $\gamma=0.1$. Además del número de camiones empleado, del inventario total generado, de la ocupación media de los vehículos y de los grados de satisfacción asociados a cada objetivo, también se muestra el tiempo de CPU necesario para la resolución de cada uno de los modelos en el servidor de cálculo NEOS Server.

Los resultados obtenidos por el enfoque max-min de Zimmermann igualan el número de camiones obtenidos por el procedimiento heurístico, pero son superiores en el valor total de inventario generado. Sin embargo, el resto de enfoques aplicados, además de utilizar el mismo número de camiones que en el procedimiento heurístico, consiguen obtener valores inferiores de inventario total, especialmente los modelos LZL, WM y TH. Asimismo, el valor de ocupación media obtenido en todos los enfoques empleados es superior al obtenido según el procedimiento heurístico.

Tabla 2. Comparación de resultados entre modelos

Ítem	Proced. heurístico	Modelo ZM	Modelo LH	Modelo LZL	Modelo WM (γ=0.1)	Modelo TH (γ=0.1)
Camiones (z_1)	7	7	7	7	7	7
Inventario (z_2)	63865 unidades	68720 unidades	60080 unidades	56552 unidades	56264 unidades	56528 unidades
Ocupación de vehículos (promedio)	86.71 contenedores	89.29 contenedores	87.86 contenedores	87.27 contenedores	87.57 contenedores	87.71 contenedores
μ_1	No aplicable	0.875	0.875	0.875	0.875	0.875
μ_2		0.892	0.942	0.962	0.964	0.962
$\lambda(x)$		0.875	0.884	0.954	0.860	0.946
T_{CPU} (s)		1.98	1.55	12.3	22.21	14.18
$[z_1^l, z_1^u]$		$z_1^l = 6 \;\; z_1^u = 14$				
$[z_2^l, z_2^u]$		$z_2^l = 50{,}000 \;\; z_2^u = 223{,}700$				
$\tilde{M}$		$M_\beta^p = 88; M_\beta^m = 92; M_\beta^o = 96$				

Los modelos LZL, WM y TH obtienen los valores de inventario inferiores a los enfoques ZM y LH, siendo el WM el que ofrece un valor mínimo de stock generado. Por otro lado, entre los modelos LZL, WM y TH, este último es el que ofrece un valor de ocupación media superior. Sin embargo, los modelos LH y ZM son los que obtienen unos valores de ocupación media superiores. Asimismo, los enfoques LH y ZM necesitan un tiempo de CPU inferior a 2 s, mientras que los modelos LZL, WM y TH muestran unos valores de tiempo de cómputo superiores. Entre ellos, el modelo WM necesita de un total de 22.21 segundos de CPU mientras que el modelo TH utiliza 14.18 segundos y el modelo LZL 12.3 segundos.

A partir de los resultados mostrados puede concluirse que tanto el modelo WM como el TH presentan mejores características que el resto de enfoques considerados. Además de utilizar los pesos asociados a cada función objetivo, estos modelos consideran la existencia del coeficiente de compensación (γ). Este parámetro permite controlar el mínimo nivel de satisfacción de los objetivos y grado de compromiso entre éstos. Un valor reducido de γ permite dirigir el modelo a encontrar una solución mejor para la función objetivo con mayor peso o preferencia por parte del decisor. Esta característica permite al decisor regular el proceso interactivo de resolución en función de su preferencia mayoritaria de la minimización del inventario respecto a la minimización del uso de camiones. Ambos modelos, presentan resultados similares en cuando a la cifra total de stock generado, a la ocupación media de los vehículos utilizados y a las distancias obtenidas, sin embargo el valor del tiempo de CPU necesario para resolver el modelo es significativamente superior en el caso del modelo WM respecto al modelo TH. Por lo tanto, el enfoque de Torabi y Hassini (2008) puede considerarse más adecuado aplicar al problema abordado.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolla un modelo nuevo basado en la programación matemática *fuzzy* multiobjetivo como herramienta para la toma de decisiones relativas a la planificación operativa del transporte en una CS del sector del automóvil. Los objetivos del modelo propuesto son la minimización del número de camiones empleados y del inventario total generado a lo largo del horizonte de planificación. El modelo planteado es transformado en un modelo mono-objetivo de programación lineal equivalente mediante la aplicación de diferentes enfoques interactivos de programación matemática *fuzzy*. Para ello, es necesario definir las funciones objetivo y las restricciones *fuzzy* con funciones de pertenencia que representen el grado de satisfacción del decisor correspondiente con su nivel de cumplimiento. En este trabajo se toman funciones de pertenencia lineales para la representación de las funciones objetivo *fuzzy* y el patrón de distribuciones de posibilidad triangulares para representar el parámetro difuso de la capacidad máxima por vehículo. Mediante el uso de un paradigma interactivo, los enfoques de programación *fuzzy* mostrados mejoran la flexibilidad y la robustez de las técnicas para la de toma de decisiones multiobjetivo, permitiendo al decisor aprender y reconocer las soluciones apropiadas así como la importancia relativa de los diferentes factores del sistema mediante la indicación de los pesos asociados a cada objetivo y, especialmente, del coeficiente de compensación. Los diferentes resultados obtenidos muestran que los diferentes enfoques utilizados mejoran los resultados del procedimiento heurístico para la toma de decisiones utilizado en la CS de estudio.

La limitación principal de este trabajo es la asunción de linealidad de la función de pertenencia que representa los objetivos y los valores de capacidad, ya que en contextos reales el decisor debería generar funciones de pertenencia basadas en juicios subjetivos y/o datos históricos. Se propone el uso futuro de funciones de pertenencia no lineales aplicadas a la resolución de problemas PTCS bajo condiciones de incertidumbre. Por consiguiente, se hace necesario el uso de técnicas avanzadas de resolución basadas en algoritmos evolutivos y *soft computing* para reducir los tiempos de cómputo necesarios para resolver este tipo de problemas eficientemente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el Proyecto Nacional del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) del Gobierno Español titulado: "Modelos de optimización *fuzzy* y computación evolutiva y de simulación de los procesos de planificación de la producción y del transporte en una cadena de suministro. Propuesta de planificación colaborativa soportada por sistemas multi-agente. Integración en un sistema de decisión. Aplicaciones" (Ref. DPI2007-65501). Asimismo, esta investigación ha sido también financiada mediante una beca doctoral concedida por el Ministerio de Educación del Gobierno de España al primer autor (AP2008-01968). www.cigip.upv.es/evolution.

ANEXO I. DATOS Y DEMANDAS DE LOS PRODUCTOS

Tabla 3. Datos de los productos

Producto (i)	Grupos (j)	$I0_i$ (unidades)	u_i (unidades)
Ítem 1	1	292	50
Ítem 2	2	95	50
Ítem 3	3	55	50
Ítem 4	4	11	50
Ítem 5	1, 2, 3, 4	448	100
Ítem 6	1, 2, 3, 4	388	25
Ítem 7	5	286	50
Ítem 8	6	0	50
Ítem 9	5, 6	276	100
Ítem 10	5, 6	276	25
Ítem 11	7	0	50
Ítem 12	8	0	50
Ítem 13	7, 8	0	100
Ítem 14	7, 8	0	25
Ítem 15	9	148	50
Ítem 16	10	0	50
Ítem 17	9, 10	273	100
Ítem 18	9, 10	218	25
Ítem 19	11	21	50
Ítem 20	12	0	50
Ítem 21	11, 12	26	100
Ítem 22	11, 12	21	25
Ítem 23	13	55	25
Ítem 24	14	0	50
Ítem 25	13, 14	50	100
Ítem 26	13, 14	50	25
Ítem 27	15	57	25
Ítem 28	16	0	50
Ítem 29	15, 16	82	100
Ítem 30	15, 16	62	25
Ítem 31	17	61	20
Ítem 32	18	0	20
Ítem 33	17, 18	211	40
Ítem 34	17, 18	201	20
Ítem 35	19, 21	36	20
Ítem 36	20, 22	0	20
Ítem 37	19, 20, 21, 22	31	20
Ítem 38	19, 20	36	10
Ítem 39	21, 22	0	10
Ítem 40	23, 25	9	20
Ítem 41	24, 26	0	20
Ítem 42	23, 24, 25, 26	9	20
Ítem 43	23, 24	9	10
Ítem 44	25, 26	0	10
Ítem 45	27	8	20
Ítem 46	28	0	20
Ítem 47	27, 28	23	20
Ítem 48	27, 28	23	10
Ítem 49	29	93	48

Producto (i)	Grupos (j)	$I0_i$ (unidades)	u_i (unidades)
Ítem 50	30	4	48
Ítem 51	29, 30	142	96
Ítem 52	29, 30	137	48
Ítem 53	31	410	48
Ítem 54	32	178	48
Ítem 55	33	60	48
Ítem 56	31, 32, 33	698	96
Ítem 57	31, 32, 33	683	48
Ítem 58	34	50	48
Ítem 59	35	75	48
Ítem 60	36	50	48
Ítem 61	34, 35, 36	175	96
Ítem 62	34, 35, 36	175	48
Ítem 63	37	57	48
Ítem 64	38	0	48
Ítem 65	39	50	48
Ítem 66	37, 38, 39	102	96
Ítem 67	37, 38, 39	102	48
Ítem 68	40	78	48
Ítem 69	41	0	48
Ítem 70	42	10	48
Ítem 71	40, 41, 42	128	96
Ítem 72	40, 41, 42	118	48
Ítem 73	43	11	48
Ítem 74	44	0	48
Ítem 75	43, 44	51	96
Ítem 76	43, 44	41	48
Ítem 77	45	83	48
Ítem 78	46	0	48
Ítem 79	45, 46	138	96
Ítem 80	45, 46	138	48
Ítem 81	47	88	48
Ítem 82	48	22	48
Ítem 83	47, 48	120	96
Ítem 84	47, 48	125	48
Ítem 85	49	307	48
Ítem 86	50	23	48
Ítem 87	49, 50	325	96
Ítem 88	49, 50	360	48
Ítem 89	51	40	24
Ítem 90	52	0	24
Ítem 91	51, 52	40	48
Ítem 92	51, 52	20	24
Ítem 93	53	62	24
Ítem 94	54	0	24
Ítem 95	53, 54	72	48
Ítem 96	53, 54	57	24

Tabla 4. Demanda por producto y día

Producto (i)	Demanda							
	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8
Ítem 1	170	162	107	130	111	71	140	135
Ítem 2	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 4	0	0	0	20	37	57	16	17
Ítem 5	170	162	107	150	148	128	156	152
Ítem 6	170	162	107	150	148	128	156	152
Ítem 7	129	130	110	94	71	31	4	0
Ítem 8	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 9	129	130	110	94	71	31	4	0
Ítem 10	129	130	110	94	71	31	4	0
Ítem 11	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 12	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 13	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 14	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 15	173	178	176	205	216	270	269	281
Ítem 16	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 17	173	178	176	205	216	270	269	281
Ítem 18	173	178	176	205	216	270	269	281
Ítem 19	3	2	0	11	24	6	1	5
Ítem 20	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 21	3	2	0	11	24	6	1	5
Ítem 22	3	2	0	11	24	6	1	5
Ítem 23	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 24	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 25	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 26	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 27	0	1	0	0	1	1	9	0
Ítem 28	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 29	0	1	0	0	1	1	9	0
Ítem 30	0	1	0	0	1	1	9	0
Ítem 31	54	55	54	65	66	82	78	81
Ítem 32	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 33	54	55	54	65	66	82	78	81
Ítem 34	54	55	54	65	66	82	78	81
Ítem 35	2	2	4	1	0	2	1	0
Ítem 36	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 37	2	2	4	1	0	2	1	0
Ítem 38	2	2	4	1	0	2	1	0
Ítem 39	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 40	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 41	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 42	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 43	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 44	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 45	0	0	0	4	5	9	10	11
Ítem 46	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 47	0	0	0	4	5	9	10	11
Ítem 48	0	0	0	4	5	9	10	11
Ítem 49	38	36	32	31	39	40	39	39
Ítem 50	0	0	11	0	0	0	0	0
Ítem 51	38	36	43	31	39	40	39	39

Producto (i)	Demanda							
	t=1	**t=2**	**t=3**	**t=4**	**t=5**	**t=6**	**t=7**	**t=8**
Ítem 52	38	36	43	31	39	40	39	39
Ítem 53	320	333	382	259	379	381	363	347
Ítem 54	89	57	0	155	8	15	17	10
Ítem 55	18	21	56	16	46	18	19	49
Ítem 56	427	411	438	430	433	414	399	406
Ítem 57	427	411	438	430	433	414	399	406
Ítem 58	11	5	4	6	1	7	6	2
Ítem 59	1	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 60	10	27	0	1	10	23	23	17
Ítem 61	22	32	4	7	11	30	29	19
Ítem 62	22	32	4	7	11	30	29	19
Ítem 63	5	11	15	2	5	13	17	32
Ítem 64	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 65	5	1	0	0	3	1	2	0
Ítem 66	10	12	15	2	8	14	19	32
Ítem 67	10	12	15	2	8	14	19	32
Ítem 68	3	5	8	19	3	10	2	6
Ítem 69	0	0	0	1	0	0	0	0
Ítem 70	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 71	3	5	8	20	3	10	2	6
Ítem 72	3	5	8	20	3	10	2	6
Ítem 73	4	3	0	1	4	3	4	3
Ítem 74	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 75	4	3	0	1	4	3	4	3
Ítem 76	4	3	0	1	4	3	4	3
Ítem 77	4	6	14	1	7	9	8	9
Ítem 78	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 79	4	6	14	1	7	9	8	9
Ítem 80	4	6	14	1	7	9	8	9
Ítem 81	29	28	54	0	38	29	59	49
Ítem 82	1	0	0	0	20	0	16	57
Ítem 83	30	28	54	0	58	29	75	106
Ítem 84	30	28	54	0	58	29	75	106
Ítem 85	369	381	332	426	329	323	314	309
Ítem 86	16	6	4	3	26	60	24	0
Ítem 87	385	387	336	429	355	383	338	309
Ítem 88	385	387	336	429	355	383	338	309
Ítem 89	0	0	0	0	1	0	0	0
Ítem 90	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 91	0	0	0	0	1	0	0	0
Ítem 92	0	0	0	0	1	0	0	0
Ítem 93	6	8	8	11	9	0	6	3
Ítem 94	0	0	0	0	0	0	0	0
Ítem 95	6	8	8	11	9	0	6	3
Ítem 96	6	8	8	11	9	0	6	3

REFERENCIAS

Allen, W.B. y Liu, D., 1995. Service Quality and Motor Carrier Costs: An Empirical Analysis. The Review of Economics and Statistics, 77(3), 499–510.

Arunachalam, R. y Sadeh, N.M., 2005. The supply chain trading agent competition. Electronic Commerce Research and Applications, 4(1), 66–84.

Bellman, R.E. y Zadeh, L.A., 1970. Decision-Making in a Fuzzy Environment. Management Science, 17(4), 141–164.

Bilgen, B., 2007. Possibilistic Linear Programming in Blending and Transportation Planning Problem. In Applications of Fuzzy Sets Theory. 20–27.

Bit, A.K., 2005. Fuzzy programming with hyperbolic membership functions for multi-objective capacitated solid transportation problem. The Journal of Fuzzy Mathematics, 13(2), 373–385.

Bit, A.K., Biswal, M.P. y Alam, S.S., 1993a. An additive fuzzy programming model for multiobjective transportation problem. Fuzzy Sets and Systems, 57(3), 313–319.

Bit, A.K., Biswal, M.P. y Alam, S.S., 1993b. Fuzzy programming approach to multiobjective solid transportation problem. Fuzzy Sets and Systems, 57(2), 183–194.

Cisheng, C., Ying, W. y Qichao, H., 2008. Study on Truck Stowage Planning of Cargo Distribution Center in a Town. En: Proceedings International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008, 509–512.

Coyle, J., Edward, J. y Langley, C., 2003. The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective 7th ed., Western/Thompson Learning.

Czyzyk, J., Mesnier, M. y More, J., 1998. The NEOS Server. Computational Science & Engineering, IEEE, 5(3), 68–75.

Chen, C. y Lee, W., 2004. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. Computers & Chemical Engineering, 28(6-7), 1131–1144.

Chen, S. y Chang, P., 2006. A mathematical programming approach to supply chain models with fuzzy parameters. Engineering Optimization, 38(6), 647–669.

Christopher, M. y Towill, D., 2001. An integrated model for the design of agile supply chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 31(4), 235–246.

Deb, K., 2001. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, John Wiley and Sons.

Ellram, L.M., 1991. Supply-Chain Management: The Industrial Organisation Perspective. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 21(1), 13–22.

Ertogral, K., 2008. Multi-item single source ordering problem with transportation cost: A Lagrangian decomposition approach. European Journal of Operational Research, 191(1), 156–165.

Evans, K., Feldman, H. y Foster, J., 1990. Purchasing motor carrier service: an investigation of the criteria used by small manufacturing firms. Journal of Small Business Management, 28(1), 39–47.

Fleischmann, B., 2005. Distribution and Transport Planning. In Supply Chain Management and Advanced Planning. 229–244

Gropp, W. y Moré, J., 1997. Optimization Environments and the NEOS Server. In Approximation Theory and Optimization. Cambridge University Press, 167–182.

Hernández, J.E, Mula, J., Ferriols, F.J. y Poler, R., 2008. A conceptual model for the production and transport planning process: An application to the automobile sector. Computers in Industry, 59(8), 842–852.

Huang, G., Lau, J. y Mak, K., 2003. The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature. International Journal of Production Research, 41, 1483–1517.

Jiménez, F. y Verdegay, J.L., 1999. Solving fuzzy solid transportation problems by an evolutionary algorithm based parametric approach. European Journal of Operational Research, 117(3), 485–510.

Jiménez, F. y Verdegay, J.L., 1998. Uncertain solid transportation problems. Fuzzy Sets and Systems, 100(1-3), 45–57.

Lai, Y. y Hwang, C., 1994a. Fuzzy multiple objective decision making: methods and applications, Berlin: Springer.

Lai, Y. y Hwang, C., 1994b. Interactive fuzzy multiple objective decision making. In Fuzzy Optimization. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 179–198.

Lai, Y. y Hwang, C., 1992. A new approach to some possibilistic linear programming problems. Fuzzy Sets and Systems , 49(2), 121–133.

Lai, Y. y Hwang, C., 1993. Possibilistic linear programming for managing interest rate risk. Fuzzy Sets and Systems, 54(2), 135–146.

Lee, E.S. y Li, R.J., 1993. Fuzzy multiple objective programming and compromise programming with Pareto optimum. Fuzzy Sets and Systems, 53(3), 275–288.

Li, L. y Lai, K.K., 2000. A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem. Computers & Operations Research, 27(1), 43–57.

Li, X., Zhang, B. y Li, H., 2006. Computing efficient solutions to fuzzy multiple objective linear programming problems. Fuzzy Sets and Systems, 157(10), 1328–1332.

Liang, T., 2006. Distribution planning decisions using interactive fuzzy multi-objective linear programming. Fuzzy Sets and Systems, 157(10), 1303–1316.

Liang, T., 2008a. Interactive multi-objective transportation planning decisions using fuzzy linear programming. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 25(1), 11–31.

Liang, T., 2008b. Fuzzy multi-objective production/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in a supply chain. Computers & Industrial Engineering, 55(3), 676–694.

Liang, T. y Cheng, H., 2009. Application of fuzzy sets to manufacturing/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in supply chains. Expert Systems with Applications, 36(2), 3367–3377.

Lu, Q. y Dessouky, M., 2004. An Exact Algorithm for the Multiple Vehicle Pickup and Delivery Problem. Transportation Science, 38(4), 503–514.

Pan, Z., Tang, J. y Fung, R.Y., 2009. Synchronization of inventory and transportation under flexible vehicle constraint: A heuristics approach using sliding windows and hierarchical tree structure. European Journal of Operational Research, 192(3), 824–836.

Peidro, D., 2006. Modelos para la planificación táctica centralizada en una cadena de suministro bajo incertidumbre. Aplicación en una cadena de suministro del sector del automóvil. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Peidro, D., Diaz-Madroñero, M. y Mula, J., 2009a. Operational transport planning in an automobile supply chain: an interactive fuzzy multi-objective approach. En Recent advances in computational intelligence, man-machine systems and cybernetics. WSEAS, 121–127.

Peidro, D., Mula, J., Poler, R. y Lario, F., 2009b. Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 43(3), 400–420.

Peidro, D., Mula, J., Poler, R. y Verdegay, J., 2009c. Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties. Fuzzy Sets and Systems, 160(18), 2640–2657.

Peidro, D. y Vasant, P., 2009. Fuzzy Multi-Objective Transportation Planning with Modified S-Curve Membership Function. En Proceedings 2nd Global Conference Power Control and Optimization, 101–110.

Selim, H. y Ozkarahan, I., 2008. A supply chain distribution network design model: An interactive fuzzy goal programming-based solution approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 36(3), 401–418.

Shih, L., 1999. Cement transportation planning via fuzzy linear programming. International Journal of Production Economics, 58(3), 277–287.

Tanaka, H., Ichihashi, H. y Asai, K., 1984. A formulation of fuzzy linear programming problem bases on comparision of fuzzy numbers. Control and Cybernetics, 13, 185–194.

Torabi, S. y Hassini, E., 2008. An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. Fuzzy Sets and Systems, 159(2), 193–214.

Wang, R. y Liang, T., 2005. Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. International Journal of Production Economics, 98(3), 328–341.

Werners, B., 1988. Aggregation models in mathematical programming. En Mathematical Models for Decision Support. Springer, 295–305.

Werners, B., 1987a. An interactive fuzzy programming system. Fuzzy Sets and Systems., 23(1), 131–147.

Werners, B., 1987b. Interactive multiple objective programming subject to flexible constraints. European Journal of Operational Research, 31(3), 342–349.

Wu, Y. y Guu, S., 2001. A compromise model for solving fuzzy multiple objective linear programming problems. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 18(5), 87–93.

Zheng, Y. y Liu, B., 2006. Fuzzy vehicle routing model with credibility measure and its hybrid intelligent algorithm. Applied Mathematics and Computation, 176(2), 673–683.

Zimmermann, H., 1978. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. Fuzzy Sets and Systems, 1(1), 45–46.

Zimmermann, H., 1975. Description and optimization of fuzzy systems. International Journal of General Systems, 2(1), 209.