

## Optimización de una cadena de suministros hospitalarios incorporando parámetros difusos

María Celeste Kees, María Constanza Cragno, Marta Susana Moreno y José Alberto Bandoni

Planta Piloto de Ingeniería Química PLAPIQUI (CONICET-UNS), Camino La carrindanga  
km 7 (8000), Bahía Blanca, Argentina.  
{mckees, mccragno, smoreno, abandoni}@plapiqui.edu.ar

**Resumen.** El propósito de este trabajo es determinar la estructura óptima de una cadena de suministro de insumos hospitalarios. Para ello se plantea un modelo mixto entero lineal determinístico cuyos objetivos de optimización son tanto la minimización de los costos generales como la minimización de los tiempos de envío. Debido a la presencia de incertidumbre en algunos parámetros del problema, se presenta una segunda formulación multiobjetivo en la que se incorporan parámetros difusos a través de una metodología que proporciona una solución óptima única, evitando las inconsistencias o subjetividades propias del análisis de escenarios indicado en los métodos tradicionales de lógica borrosa. Los modelos desarrollados permiten identificar los plazos de entrega que implican un incremento en los costos, los que pueden deberse a recargos por parte de las plantas farmacéuticas o al aumento en los gastos de transporte. Las formulaciones contemplan, además, la existencia de una economía de escala en el transporte a través de la cual se logra un mejor equilibrio entre la cantidad de unidades a trasladar y el costo de transporte. Finalmente, se presenta el análisis de un caso de estudio sobre el cual se aplican los modelos propuestos.

**Palabras clave:** Cadena de suministro, insumos hospitalarios, optimización, programación difusa.

### 1 Introducción

Las cadenas de suministro (CS) son sistemas compuestos por actores altamente comunicados, distribuidos en diferentes niveles de operación. Son estas múltiples y permanentes interacciones las que dan lugar a estructuras complejas en la cadena, donde el desempeño individual afecta el rendimiento global del sistema. Esta característica provoca que las decisiones que deban tomarse para lograr un funcionamiento rentable, deban tener en cuenta todas las posibles interacciones y limitaciones entre los elementos que componen la CS. Al momento de definir las políticas operacionales para la correcta administración del sistema, deben considerarse numerosos factores operativos como por ejemplo la capacidad de producción y/o distribución de los actores, tiempos de producción y tiempos de transporte, entre otros, de modo de garantizar la satisfacción de la demanda [1].

Las cadenas de distribución de insumos hospitalarios son un ejemplo de CS en donde se transportan productos de uso hospitalario desde un grupo de productores hasta un grupo de consumidores o pacientes, atravesando niveles intermedios de distribución. En los últimos años, la comunidad científica focalizó sus esfuerzos en estudiar este tipo de CS, dada la importancia que tienen en el sistema de salud, tanto desde la perspectiva económica como desde la social [2]. Los sistemas de distribución de productos hospitalarios tienen una característica que los diferencian considerablemente de cualquier otro: una falla en el manejo o la distribución de insumos puede tener consecuencias fatales en la salud del paciente que no pueden ser adecuadamente compensadas en términos económicos. Esta particularidad obliga a que los estándares de eficiencia y efectividad sean ineludiblemente altos.

Los modelos de optimización en el área de estudio de los sistemas de salud se desarrollan con el fin de generar herramientas para la toma de decisiones, sobre la configuración de la CS y sobre las cantidades globales y los flujos de distribución, que permitan alcanzar los elevados requerimientos de desempeño. En este estudio se abordan estas decisiones analizando dos objetivos: minimizar los costos y minimizar los plazos de entrega de los insumos.

Con frecuencia, en el proceso de toma de decisiones se cuenta con información que presenta un alto grado de incertidumbre o que se encuentra expresada en términos lingüísticos imprecisos, producto de las complicaciones al momento de procesar dicha información. El tratamiento de estos datos requiere entonces una metodología que permita captar esta característica y generar resultados que garanticen la satisfacción de los objetivos del modelo. Diferentes autores [3,4], coinciden en que los métodos deducidos a partir de la teoría de lógica difusa son una de las mejores herramientas para el manejo sistemático de parámetros borrosos. Dado que las CS pueden manifestar cierta imprecisión en la definición de algunos parámetros, por ejemplo en la capacidad de provisión de los proveedores, la lógica difusa se emplea en este trabajo para transformar la información imprecisa a su forma difusa, sobre la cual se aplican diferentes técnicas desarrolladas en esta teoría.

Dentro de las numerosas metodologías difundidas para el tratamiento de parámetros difusos, en este trabajo se optó por implementar el modelo *max min* desarrollado por Zimmermann [5]. Este autor plantea una transformación de modelos lineales multicriterio, con parámetros inciertos en los objetivos y/o en las restricciones, en una formulación lineal *crisp*. La implementación de esta formulación en la distribución de insumos hospitalarios representa una nueva contribución al tratamiento de CS de este tipo, ya que no se encontraron modelos similares en la bibliografía consultada. La ventaja principal de esta técnica, respecto a las alternativas de lógica borrosa que implican análisis de escenarios, es que elude las subjetividades propias de la definición de dichos escenarios, como el tamaño de la variación o el número de alternativas a explorar [6]. De esta manera, la solución única propuesta contempla de algún modo todo el espectro de posibilidades dentro del entorno incierto.

Además, este trabajo proporciona un nuevo enfoque para determinar los costos de traslado incorporando el criterio de economía de escala en el transporte. Es decir, se consideran los beneficios económicos producto del aumento en la cantidad de unidades transportadas. En base a la propuesta de Tsiakis y col. [7], el costo asociado al

movimiento de productos entre los diferentes actores de la cadena se considera una función lineal a tramos del flujo de productos, y pueden incluirse aquí diferentes tasas e impuestos.

Otra característica de los modelos propuestos es que ofrecen la posibilidad de seleccionar, dentro de una cantidad acotada de valores, el plazo de entrega que se va a acordar con las plantas farmacéuticas y el aumento en el costo base (que en este caso incluye tanto costos de compra como de transporte) al que esta elección conduce. Según lo postulado por Chandra y col. [8] la reducción del plazo de entrega permite mejorar el servicio de distribución, pero puede estar acompañada de un incremento en los costos producto de la imposición de recargos por parte de las plantas farmacéuticas o por aumento en los precios de transporte. Dado que no se hallaron antecedentes del uso de este procedimiento en otros trabajos similares, consideramos que la selección del plazo de entrega en la CS afectada por un factor de costos constituye un importante aporte a través del cual se puede evaluar esta relación de compromiso.

Bajo estas consideraciones, en este trabajo se presenta un problema mixto entero lineal (MILP, por sus siglas en inglés) para optimizar el diseño de la CS hospitalaria analizando dos funciones objetivos (minimizar costos generales y minimizar tiempos de distribución). Inicialmente se desarrolla una formulación determinística, la cual se modifica luego aplicando técnicas provistas por la lógica difusa. Esta transformación permite abordar un modelo multicriterio con el fin de obtener una solución “óptima” de compromiso. Las formulaciones tienen en cuenta las variables de decisión vinculadas al diseño y la distribución de múltiples productos a lo largo de una cadena multinivel.

## 2 Descripción del problema

La CS hospitalaria considerada en este trabajo se ilustra en la Fig. 1 y está compuesta por cinco niveles o “eslabones”: plantas farmacéuticas, mayoristas, farmacias hospitalarias, farmacias de unidades de servicio y pacientes. Se asume que la CS puede estar integrada por hasta  $k = 1, \dots, K$  actores o nodos divididos en  $r = 1, \dots, R$  niveles a través de los cuales circulan los  $i = 1, \dots, I$  productos de uso hospitalario. En cada eslabón  $r$  existe un conjunto de actores  $N_r$  y cada uno de ellos puede suministrar o demandar un conjunto de insumos diferente  $SI_k$ . A excepción del primero, cada nivel  $r$  demanda  $DN_{ir}$  unidades del producto  $i$ .

Para evitar interrupciones en el suministro y garantizar el abastecimiento se emplean diferentes estrategias como el uso de múltiples fuentes de provisión o la utilización de envíos de manera discontinua a lo largo de la cadena, que permiten acortar los plazos de entrega. Otra alternativa, no contemplada en este estudio, surgiría al admitir el flujo de unidades entre actores pertenecientes a un mismo nivel.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo previo, se supone que los insumos pueden recorrer de manera consecutiva todos y cada uno de los  $r$  niveles de la CS, o pueden avanzar atravesando solo algunos de los eslabones hasta ser provistos a los pacientes (ver Fig. 1). En este último caso, representado por líneas de trazos en el

diagrama, un producto puede ser entregado de forma directa desde las plantas farmacéuticas a las farmacias hospitalarias y/o desde éstas a los pacientes. Este tipo de entrega, denominada “de emergencia”, puede eventualmente acortar los plazos de envío, y está acotada a un determinado porcentaje ( $\alpha_i$ ) de la demanda  $DN_{ir}$  del nivel receptor.

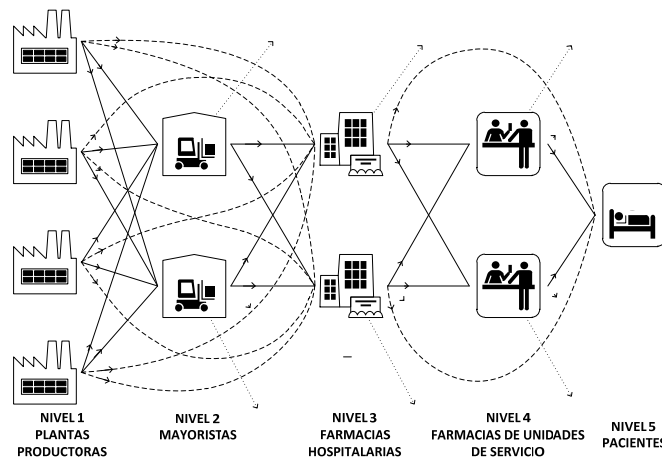


Fig. 1. Estructura de la cadena de suministro hospitalaria analizada.

Para identificar la posición relativa del actor  $k$  en la cadena se definen los conjuntos  $A_k$  y  $S_k$ , compuestos por los actores antecesores y sucesores a  $k$ , respectivamente. En el primer grupo se encuentran los actores  $k'$  pertenecientes a cualquiera de los niveles previos al que contiene a  $k$ , mientras que en el segundo se agrupan los nodos  $k''$  de los eslabones posteriores.

A excepción de los nodos del último nivel de la CS ( $k \in N_5$ ), cada actor  $k$  puede entregar una cantidad  $Q_{ikk''}$  del insumo  $i$  a alguno de sus sucesores  $k''$ . De manera equivalente, cada actor  $k$  perteneciente al segundo nivel o superiores, recibe una cantidad de unidades  $Q_{ik'k}$  para satisfacer su demanda  $D_{ik}$ . Es necesario mencionar que dicha demanda puede coincidir con la de los eslabones posteriores, o ser mayor que ésta, de manera que cada actor puede, eventualmente, abastecer a clientes externos a la CS estudiada, según lo indican los flujos de línea punteada en la Fig. 1.

Al momento de seleccionar un proveedor ( $k' \in N_1$ ), se debe considerar el plazo de entrega de los productos demandados por el nodo  $k$ ,  $LT_{k'k}$ . Cada proveedor  $k$  establece un costo base para la compra y envío del producto  $i$ ,  $CC_{ik}$ , al que se le debe añadir un costo adicional que depende del plazo de entrega. Para contemplar los incrementos en el costo de adquisición que deben abonarse por dicha operación, se utiliza un parámetro que toma valores mayores a la unidad y aumenta a medida que disminuye el plazo de entrega.

Para cada planta farmacéutica existen  $m = 1, \dots, M_k$  períodos (días) que definen el plazo de entrega y, cada uno de ellos tiene asociado un factor de costo  $FC_m$  (Fig. 2). De esta manera, el modelo selecciona un único plazo ( $LT_m$ ) en el que el proveedor  $k'$  entrega todos los productos requeridos por el nodo sucesor  $k$ . Puesto que cada planta farmacéutica puede ofrecer diferentes condiciones de venta, es posible realizar una función de este tipo para cada una de ellas.

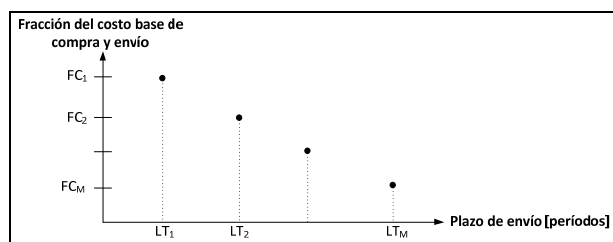


Fig. 2. Factores aplicados al costo base de compra en función del plazo de entrega.

Para las operaciones de transporte de insumos en la CS que no involucren a las plantas farmacéuticas, sólo se considera el plazo de entrega  $T_{k'k}$ , determinado en función de la longitud del trayecto que separa las instalaciones de los nodos emisores  $k'$  de los receptores  $k$ .

Por otra parte, cada envío que se realice entre los distintos actores de la CS, exceptuando a las entregas desde las plantas farmacéuticas, tiene asociado un costo  $CT_{k'k}$  que varía no sólo con la distancia entre los mismos sino también con el número de unidades de producto transferidos. Según Tsiakis y col. [7], el costo total de transporte se puede representar por una función lineal a tramos de la cantidad de unidades, como se observa en la Fig.3.

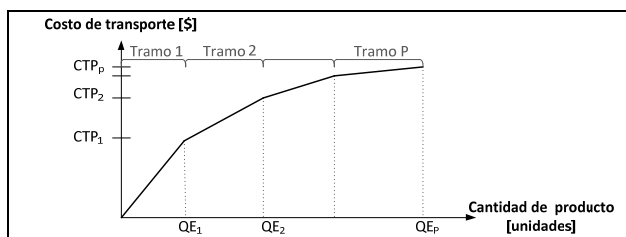


Fig. 3. Costo de transporte como función lineal a tramos de la cantidad de unidades demandada.

Aquí, se divide el rango de unidades de productos en  $p = 1, \dots, P_{k'k}$  tramos. Para los diferentes tramos, la pendiente de la recta de costo de transporte se reduce a medida que aumenta el número de unidades de producto. De este modo, si la cantidad total transferida entre los actores  $k'$  y  $k$ ,  $QP_{ik'kp}$ , se encuentra dentro de los extremos  $QE_{p-1}$  y  $QE_p$  del tramo  $p$ , el costo de dichas unidades se calculará linealmente a partir de los costos  $CTP_{k'k,p-1}$  y  $CTP_{k'k,p}$  asociados a los extremos del intervalo referido.

Los extremos de cada tramo pueden variar con cada uno de los actores intervinientes en las operaciones de transporte y con las características de los contratos que entre ellos se generen, por lo tanto pueden existir tantas gráficas, similares a la de la Fig. 3, como movimientos de unidades ocurran en la cadena. El conjunto  $SP_k$  define la cantidad de tramos que posee cada gráfica, en función del proveedor del cual se trate.

Junto a los costos de adquisición y transporte de unidades, en el problema se incluyen los fijos  $CF_k$ , asociados a la participación o presencia del actor  $k$  en la CS, que representan la depreciación de la infraestructura y los costos administrativos anuales. Se incluyen, además, los costos de mantenimiento de inventario  $CM_{ik}$  calculados para los niveles intermedios, es decir, en los mayoristas, farmacias hospitalarias y farmacias de unidades de servicio. Estos últimos dependen de las características de almacenamiento del producto y de las particularidades del depósito en el que se dispongan.

En resumen, el problema de diseño de la CS hospitalaria consiste en determinar la presencia de actores en la CS y el modo en el que estos interactúan, las cantidades de productos trasladadas, el plazo de entrega de los plantas farmacéuticas, y el costo de adquisición y transporte en el que se incurre en todo el sistema de provisión de insumos analizado.

### 3 Formulación del modelo

En esta sección se describe la formulación matemática del modelo propuesto para el diseño de la CS hospitalaria. Las decisiones consideradas están representadas a través de cuatro variables binarias, a saber: la variable  $y_k$  toma el valor 1 si el actor  $k$  existe en la CS, es decir, si recibe y distribuye productos; la variable  $x_{k'k}$  adopta el valor 1 cuando existe el transporte de insumos entre el actor  $k'$  y su sucesor  $k$ ;  $w_{k'km}$  vale 1 si el proveedor  $k' \in N_1$  entrega productos al nodo sucesor  $k$ , a un costo de adquisición asociado al plazo  $m$  y, finalmente, la variable  $z_{k'kp}$  determina el tramo  $p$  de la curva de costos de transporte (ver Fig. 3) al cual pertenece la cantidad transportada entre los actores  $k'$  y  $k$ .

$$DN_r = \sum_{k \in Nr} D_{ik} \quad \forall i \in SI_k, r \neq 1 \quad (1)$$

$$\sum_{k \in S_i} Q_{ik'k} \leq QUP_k \quad \forall i \in SI_k, k' \in N_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in SI_i} \sum_{k' \in A_i} Q_{ik'k} \leq C_k \cdot y_k \quad \forall k \notin N_1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in SI_i} Q_{ik'k} \leq C_k \cdot x_{k'k} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (4)$$

$$\sum_{k' \in A_k} Q_{ik'k} \geq \sum_{k'' \in S_k} Q_{ikk''} \quad \forall i \in SI_k, k \notin N_1 \quad (5)$$

$$\sum_{k' \in A_k} Q_{ik'k} = D_{ik} \quad \forall i \in SI_k, k \notin N_1 \quad (6)$$

$$\alpha_i \cdot DN_{ir} = \sum_{k' \in A_k \cap (N_1 \cup N_3)} Q_{ik'k} \quad \forall i \in SI_k, k \in (N_3 \cup N_5) \quad (7)$$

$$x_{k'k} \cdot Q^{LO} \leq \sum_{i \in SI_k} Q_{ik'k} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (8)$$

$$x_{k'k} \leq y_k \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (9)$$

$$x_{k'k} \leq y_{k'} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (10)$$

$$\sum_{k' \in A_k} x_{k'k} \leq y_k \quad \forall k \notin N_1 \quad (11)$$

$$\sum_{k \in A_k} x_{k'k} \leq y_{k'} \quad \forall k' \notin N_1 \quad (12)$$

$$\sum_{p \in SP_k} z_{k'kp} \leq x_{k'k} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (13)$$

$$\sum_{p \in SP_k} QP_{k'kp} = \sum_{i \in SI_k} Q_{ik'k} \quad \forall i \in SI_k, k \notin N_1, k' \in A_k \quad (14)$$

$$QE_p z_{k'kp} \leq QP_{k'kp} \leq QE_{(p-1)} z_{k'kp} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k, p \in SP_k \quad (15)$$

$$CT_{k'k} = \sum_{p \in SP_k} \left\{ (CTP_{k'kp} \cdot z_{k'kp}) + QP_{k'kp} \right\} - \sum_{p \in SP_k} \left\{ (QE_{p-1} \cdot z_{k'kp}) \cdot \left[ \frac{(CTP_{k'kp} - CTP_{k'k(p-1)})}{(QE_p - QE_{p-1})} \right] \right\} \quad \forall k \notin N_1, k' \in A_k \quad (16)$$

$$LT_{k'k} = \sum_m m \cdot w_{k'km} \quad \forall k \in S_k, k' \in N_1 \quad (17)$$

$$\sum_m w_{k'km} = x_{k'k} \quad \forall k \in S_k, k' \in N_1 \quad (18)$$

$$\sum_{m \in M} QM_{ik'km} = Q_{ik'k} \quad \forall i \in SI_k, k \in S_k, k' \in N_1 \quad (19)$$

$$QM_{ik'km} \leq D_{ik} \cdot w_{k'km} \quad \forall i \in SI_k, k \in S_k, k' \in N_1 \quad (20)$$

$$QM_{ik'km} \geq Q_{ik'k} - D_{ik} \cdot (1 - w_{k'km}) \quad \forall i \in SI_k, k \in S_k, k' \in N_1 \quad (21)$$

$$CG = \sum_{k \in K} CF_k \cdot y_k + \sum_{k \in K} \sum_{k' \in A_k} CT_{k'k} + \sum_{i \in SI_k} \sum_{k \in K} \sum_{k' \in A_k} CM_{ik} \cdot Q_{ik'k} + \sum_{i \in SI_k} \sum_{k \in K} \sum_{k' \in A_k} \sum_{m \in M} CC_{ik'} \cdot FC_m \cdot QM_{ik'km} \quad (22)$$

$$TP = \sum_{k \in K} \sum_{k' \in A_k} T_{k'k} \cdot x_{k'k} + f \cdot \sum_{k \in K} \sum_{k' \in A_k} LT_{k'k} \quad (23)$$

En la Ec. (1) se exige que la demanda del producto  $i$  requerida por el nivel  $r$ , sea igual a la suma de las demandas, de todos los actores  $k$  pertenecientes a ese nivel para ese producto.

La cantidad total de unidades que puede entregar cada proveedor está restringida por su capacidad de provisión  $QUP_k$ , tal como se muestra en la Ec. (2). Del mismo modo, la cantidad total de unidades que puede recibir el resto de los actores que participan en la CS, se encuentra acotada por su capacidad de almacenamiento  $C_k$  indicada en las Ecs. (3) y (4).

Las tres restricciones siguientes representan los balances de unidades del producto  $i$  en cada actor  $k$ . La Ec. (5) determina que la cantidad de producto que recibe un integrante de la cadena es mayor, o a lo sumo igual, a la cantidad que el mismo debe entregar a los niveles posteriores. De este modo se garantiza el abastecimiento, evitando la ocurrencia de incumplimientos por falta de reservas. El volumen de producto que cada actor obtiene es igual a su demanda, lo cual está representado en la Ec. (6). Las entregas de emergencia de los productos  $i$  están calculadas en la Ec. (7) para cada uno de los elementos  $k$  pertenecientes a aquellos niveles capaces de recibir productos bajo esta modalidad.

En particular, si existe transporte entre dos nodos de la cadena, es decir  $x_{k'k}=1$ , entonces la cantidad total de unidades transferidas debe ser mayor que una cantidad mínima establecida  $Q^{LO}$  (Ec.(8)) y, además, el traslado es posible siempre que existan tanto el actor emisor como el receptor, hecho que se expresa en las Ecs. (9) a (12).

Las Ecs. (13) a (16) permiten determinar el costo de transporte en función de la cantidad de unidades. La restricción (13) indica que se selecciona un único tramo  $p$  en la curva del costo de transporte, si existe transporte entre dos nodos (ver Fig. 2), y por consiguiente una sola cantidad de unidades,  $QP_{k'kp}$ , por transacción existente (Ec. (14)). La desigualdad (15) establece que la cantidad transportada entre dos nodos  $k'$  y  $k$  de la cadena se encuentra limitada por los extremos superior e inferior del intervalo  $p$  de unidades de producto seleccionado. Finalmente, el costo de transporte se calcula en la Ec. (16) como indica la formulación citada.

El plazo de entrega por parte de las plantas farmacéuticas, se selecciona una sola vez por envío, tal como lo señalan las Ecs. (17) y (18). Todas las unidades de producto  $i$  enviadas se asocian entonces a un único valor  $m$  a través de la variable  $QM_{ik'm}$ , según lo indica la Ec. (19). El conjunto de las Ecs. (20) y (21) vinculan la variable binaria  $w_{k'km}$  con la cantidad de producto  $i$  enviada desde las plantas farmacéuticas, representados por el subíndice  $k'$ , hasta los receptores  $k$ : si el proveedor realiza la entrega con una tardanza determinada, la cantidad enviada se asocia a dicho plazo de entrega a través del subíndice  $m$ .

El costo total calculado en la Ec. (22) está compuesto por el costo fijo correspondiente a la participación de cada actor  $k$ , el costo de transporte entre nodos de la cadena, el costo de mantenimiento calculado para los actores intermedios de la



cadena y el costo de compra por unidad, que incluye un costo base y el factor adicional según el plazo de envío seleccionado.

El tiempo total involucrado en todas las transacciones de la cadena se calcula en la Ec. (23) e involucra tanto los tiempos de transporte como los plazos de entrega por parte de las plantas farmacéuticas. El factor  $f$  representa la conversión entre las unidades del tiempo de traslado y las del plazo de entrega, en caso de que éstas difieran.

En síntesis, el modelo para optimizar el diseño de la CS es un problema MILP el cual consiste en minimizar dos funciones objetivo contrapuestas: (i) el costo total representado en la Ec. (22) sujeto a las restricciones (1) – (21) y (23); (ii) el tiempo total Ec. (23) sujeto a las restricciones (1) – (22) y las cotas necesarias sobre las variables.

#### 4 Caso de estudio

El modelo descrito se aplica en esta sección a un caso de estudio con el objetivo de exhibir la capacidad y flexibilidad del mismo. La formulación fue implementada y resuelta en el software GAMS 24.1.3 en una computadora AMD A6-3620 APU 2.20HGz con 8 GB de RAM, empleando el resolvidor comercial CPLEX 12.5.1.0.

La CS estudiada presenta una estructura similar a la estudiada en el trabajo de Costantino [2] (Fig. 1). En la cadena pueden participar diferente número de actores por nivel, esto es: 4 plantas farmacéuticas ( $k_1$  a  $k_4$ ), 2 mayoristas ( $k_5$ ,  $k_6$ ), 2 farmacias hospitalarias ( $k_7$ ,  $k_8$ ), 2 farmacias de unidades de servicio ( $k_9$ ,  $k_{10}$ ) y un grupo de pacientes ( $k_{11}$ ). Se analiza la compra y distribución de 4 productos ( $I=4$ ) que se relacionan con cada una de las plantas farmacéuticas según lo indican los siguientes subconjuntos:  $SI_1=\{1,2\}$ ,  $SI_2=\{1,3\}$ ,  $SI_3=\{2,3,4\}$ ,  $SI_4=\{3,4\}$ . Este conjunto no se define para todos los actores ya que en los restantes niveles se demandan todos los productos. El porcentaje de la demanda que se puede satisfacer mediante entregas de emergencia desde el nivel  $r_1$  hasta el  $r_3$ , y desde el nivel  $r_3$  al  $r_5$  se estimó en un 10% ( $\alpha_i = 0.1$ ).

Para cada proveedor de la CS existen 4 opciones para el plazo de entrega, las que corresponden a esperar 1, 2, 3 o 4 días ( $M_k = 4$ ). Los valores de demanda por etapa se encuentran detallados en la Tabla 1.

Los datos de costos de adquisición y transporte, tiempos de transporte, capacidades máximas de los actores, costos fijos por actor, y las curvas de costos de transporte y de plazos de entrega fueron omitidos en este trabajo debido a las limitaciones de espacio. Todos los datos ingresados al modelo se encuentran disponibles para los lectores que los soliciten.

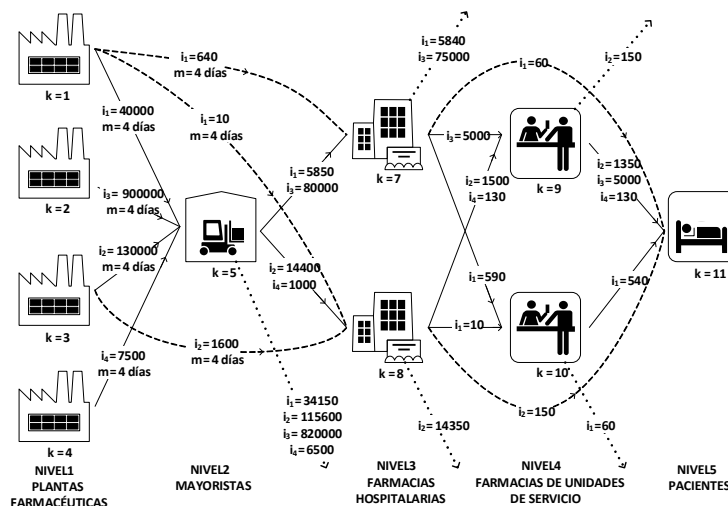
En esta sección se realiza un análisis de dos diferentes situaciones: en principio se describen los resultados de optimización obtenidos a partir del modelo determinístico en el que se minimizan los costos totales y, posteriormente, se implementa la

formulación en la que se minimiza el tiempo total asociado a las operaciones de compra y envío de productos.

**Tabla 1.** Unidades demandadas en cada nivel de la CS [unidades/año].

Nivel	Producto			
	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$
$r_2$	40000	130000	900000	7500
$r_3$	6500	16000	80000	10000
$r_4$	600	1500	5000	130
$r_5$	600	1500	5000	130

En la Fig. 4 se presenta la estructura de la CS obtenida al minimizar el costo general de la misma. Los resultados indican que el valor de la variable  $CG$  es de \$11.213.270, mientras que el tiempo  $TP$  es de 675,5 horas. Dado que la función objetivo no involucra de manera directa la minimización de los tiempos, la selección sobre el plazo de entrega en este caso es igual al valor máximo ( $m = 4$  días) para todas las entregas que las plantas farmacéuticas realicen.



**Fig. 4.** Configuración obtenida al minimizar los costos generales de la CS.

Dado el objetivo de este caso, cada producto es entregado por la planta farmacéutica que ofrezca el menor precio de venta, sin estar considerado en ningún caso el plazo de entrega. Tal como lo indican las flechas de puntos, todos los actores pertenecientes a los niveles  $r_2$ ,  $r_3$  y  $r_4$  realizan envíos a actores que no pertenecen a esta CS.

Por otra parte, la configuración óptima de la CS obtenida al minimizar el tiempo total se ilustra en la Fig. 5. La variable  $CG$  presenta un aumento del 21,2% ( $CG = \$13.5894.610$ ) en relación al valor obtenido en el primer caso. Cumpliendo con el objetivo de esta formulación, el tiempo se reduce a un valor de 98,5 horas, representando tan sólo el 14,6% del  $TP$  obtenido cuando se minimizaron los costos.

En todos los envíos realizados desde el nivel de plantas farmacéuticas, el plazo de entrega seleccionado es  $m=1$  día, correspondiente con el valor mínimo posible. Al no incorporar el cálculo de costos en el objetivo del modelo, los resultados muestran traslados de cantidades mínimas de unidades, descartando la posibilidad de una eventual disminución de los costos de transporte producto de la economía de escala.

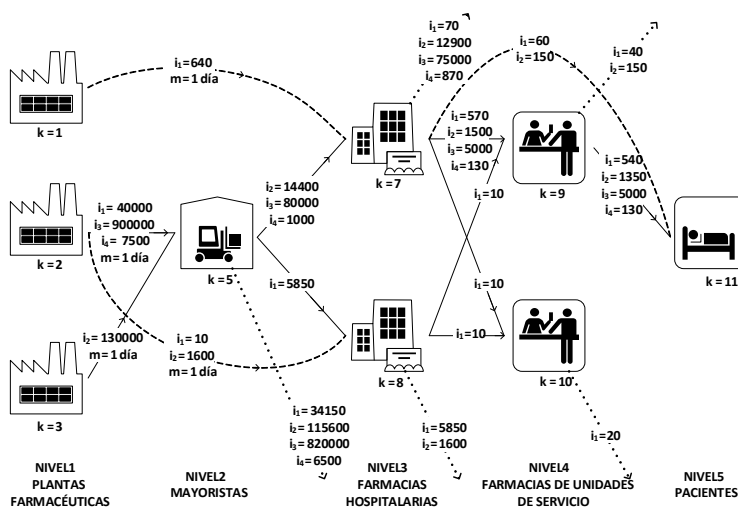


Fig. 5. Configuración obtenida al minimizar los tiempos totales en la CS.

Las dos configuraciones obtenidas al analizar los diferentes objetivos, se diferencian tanto en la cantidad de actores que integran la cadena como en las interacciones que entre ellos ocurren. Se puede notar que, al minimizar costos participan más plantas farmacéuticas y ocurre un mayor número de traslados en la cadena que en el caso representado por la Fig. 5. Esto se debe a que existe menor cantidad de variables afectando al cálculo del tiempo de entrega que al cálculo del costo, por ende la búsqueda del valor óptimo del costo genera una estructura más compleja.

## 5 Aplicación de programación difusa a la CS

En el problema de CS analizado, se reconoce que determinados parámetros presentan un comportamiento incierto debido a que sus valores se expresan en

términos lingüísticos imprecisos o a causa de la vaguedad de la información histórica con la que se cuenta. Esta situación no se puede abordar mediante un modelo determinístico, ya que las decisiones generadas podrían no responder a los verdaderos propósitos de la optimización [3]. Para contemplar esta condición, se propone un segundo modelo de optimización en el cual estos parámetros se introducen empleando lógica difusa. Particularmente, en este problema la capacidad máxima de suministro de las plantas farmacéuticas ( $k \in N_1$ ),  $QUP_k$ , y el porcentaje de unidades que deben ser distribuidas a través de envíos de emergencia,  $\alpha_i$ , presentan un alto grado de incertidumbre.

Para introducir estos parámetros, se definen intervalos o rangos de variabilidad, definiendo el nivel de incertidumbre  $\gamma$ , cuyos extremos corresponden al valor más optimista y al más pesimista, respectivamente. En el caso de la capacidad de provisión por parte de las plantas farmacéuticas,  $QUP_k$ , el extremo más optimista representa el valor máximo de provisión acordado, mientras que la situación más pesimista supone la utilización de una fracción de esa cantidad pactada. Esta reducción de capacidad de provisión puede originarse por fallas en los procesos de producción o por disminución del nivel de compromiso en el cumplimiento del contrato. Lo mismo ocurre con los envíos de emergencia: la condición optimista representa la entrega del total de las unidades determinada por esta vía, mientras que el extremo opuesto conllevaría a entregar solo una fracción de lo pactado como traslados de emergencia. En cualquier caso, la evaluación de cuál es el porcentaje en el que se disminuyen los valores determinísticos para modelar las circunstancias pesimistas se realiza considerando las características del parámetro y los datos históricos con los que se cuenta, y contemplando, además, la experiencia y el conocimiento de la persona a cargo de tomar esta decisión [6].

La formulación y solución del modelo multiobjetivo que incluye parámetros difusos se realiza a partir del procedimiento implementado por Kumar y col. [3]. Este método requiere, en principio, la resolución del modelo MILP sin incertidumbre para hallar los valores  $CG^{max}$ ,  $CG^{min}$ ,  $TP^{max}$  y  $TP^{min}$  lo cual, según propone Zimmermann [5], se logra maximizando y minimizando las dos funciones objetivo de forma separada. Luego, se reescriben las ecuaciones que involucran los parámetros inciertos,  $QUP_k$  y  $\alpha_i$ , como se muestra en las Ecs. (25) y (26). Finalmente, se modifican las funciones de costo total  $CG$  y tiempo  $TP$ , como se indica en las Ecs. (27) y (28), respectivamente. La formulación *crisp* obtenida es la siguiente:

$$\text{Maximizar } \lambda \quad (24)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in A_k} Q_{ik'k} \leq [1 + \gamma \cdot (1 - \lambda)] \cdot QUP_k, \quad \forall i \in SI_k, k' \in N_1 \quad (25)$$

$$\alpha_i \cdot D_{ik} \cdot [1 + \gamma \cdot (1 - \lambda)] = \sum_{k' \in A_k} Q_{ik'k} \quad \forall i \in SI_k, k \notin N_1 \quad (26)$$

$$\lambda \cdot (CG^{max} - CG^{min}) + CG \leq CG^{max} \quad (27)$$

$$\lambda \cdot (TP^{max} - TP^{min}) + TP \leq TP^{max} \quad (28)$$

Ecs. (1)-(6), (8)-(21)

De este modo, se obtiene un modelo MILP que maximiza el nivel de satisfacción  $\lambda$  (Ec. (24)), sujeto a las mismas restricciones que el modelo original, con las modificaciones ya señaladas para las ecuaciones dependientes de los parámetros inciertos. Esta formulación permite obtener una configuración de CS y flujos de distribución contemplando los dos objetivos presentados en el modelo determinístico, pero en simultáneo: minimizando  $CG$  y  $TP$ .

Para el análisis con incertidumbre se estimó un valor de desviación del 20% (parámetro  $\gamma = 0.20$ , Ecs. (25) y (26)) para ambos parámetros borrosos. En la solución óptima el máximo valor de nivel de satisfacción,  $\lambda$ , es 0.962.

Las interacciones óptimas sugeridas por el modelo se muestran en la Fig. 6. Debido a que este es un caso de optimización multiobjetivo, las variables de optimización  $CG$  y  $TP$  toman valores intermedios a los obtenidos en los modelos determinísticos, esto es, el costo general producido es de \$11.700.710, mientras que el tiempo total  $TP$  es de 145,5 horas.

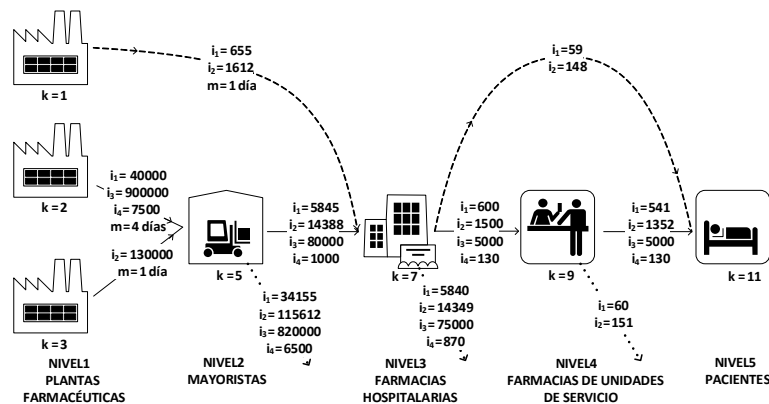


Fig. 6. Configuración obtenida a partir de la optimización multiobjetivo con incertidumbre.

En relación al plazo de entrega que resulta de esta formulación, se seleccionan valores de entre 1 y 4 días dependiendo de la operación referida. Si se observa, por ejemplo, el plazo para el envío de unidades desde  $k_1$  hasta  $k_7$ , es de  $m=1$  día. Si se considera, en cambio, la operación realizada entre los actores  $k_2$  y  $k_5$  se encuentra que es de  $m=4$  días. En este caso, el envío de emergencia corresponde al 9,86% de lo ordenado, situación que se encuentra señalada en la Fig. 6 con líneas de trazos.

## 6 Conclusiones

En este trabajo se presentaron dos modelos MILP para gestionar la distribución de insumos hospitalarios obteniendo configuraciones óptimas de la CS. El modelo

determinístico presentado permite considerar como objetivo minimizar el costo general o minimizar el tiempo total de traslado. En cambio, la formulación que contempla la existencia de datos difusos, permite considerar ambos objetivos a la vez.

Dependiendo del propósito principal de optimización y de la formulación aplicada, se obtienen diferentes combinaciones entre los actores involucrados, y se asigna a cada una de estas interacciones un flujo de unidades a distribuir. Además, en caso de que el actor emisor pertenezca al nivel de plantas farmacéuticas, se asocia a cada transacción un plazo para el envío de todos los productos, la cual representa costes mayores a medida que su valor disminuye.

La existencia de datos borrosos en la CS hospitalaria exige la implementación de técnicas de modelado que garanticen el cumplimiento de los objetivos de optimización, independientemente de las potenciales variaciones que puedan sufrir determinados parámetros. Con este propósito, se utilizaron conceptos provenientes de la teoría de lógica difusa y se implementó una técnica que no solo contempla parámetros borrosos sino que, además, permitió obtener una formulación multiobjetivo considerando simultáneamente la minimización de los costos totales y la minimización de los tiempos que surgen de las transacciones efectuadas. Como característica adicional, el método implementado permite obtener resultados únicos, evitando las ineficiencias provenientes del análisis de escenario tradicional.

En particular, este trabajo permite que la determinación de la cantidad de unidades a transferir dependa no sólo de la capacidad de almacenamiento de los actores involucrados y de la demanda del receptor, sino que además se maximicen los volúmenes transportados con el fin de disminuir los costos asociados al transporte.

## Referencias

1. Perea-López, E., Ydstie, B.E., Grossmann, I.: A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computer and Chemical Engineering* 27 (2003) 1201-1218
2. Costantino, N., Dotoli, M., Falagario, M.; Fanti, M., Mangini, A.M., Sciancalepore, F., Ukovich, W.: A model for the optimal design of the hospital drug distribution chain. *Workshop on Health Care Management – WHCM. Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2010)
3. Kumar, M., Vrat, P., Shankar, R.: A fuzzy programming approach for vendor selection problem in a supply chain. *Int. J. Production Economics* 101 (2006) 273-285.
4. Peidro, D., Mula, J., Jiménez, M., Botella, M.: A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. *European Journal of Operational Research* 205 (2010) 65-80
5. Zimmermann, H.J.: Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy sets and systems* 1 (1978) 45-55
6. Cunico, M.L., Vecchiotti, A.: Fuzzy programming model for procurement management under delivery shortage. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2015, 54 (16) 4616–4624
7. Tsiakis, P., Shah, N., Pantelides, C.C.: Design of multi echelon supply chain networks under demand uncertainty. *Ind. Eng. Chem. Res.* (2010) 40. 3585-3604
8. Chandra, C., Grabis, J.: Inventory management with variable lead-time dependent procurement cost. *Omega* 36 (2008) 877-887