

Optimización Multiperíodo de una Cadena de Suministro Hospitalaria

Resumen: Este trabajo presenta un modelo de optimización multiperíodo para el planeamiento de las actividades logísticas de una cadena de suministro hospitalaria. El propósito es generar una agenda de tareas de reposición dentro del hospital y determinar las operaciones de compra de insumos conociendo el perfil de demanda de cada uno. Además, la formulación propuesta considera variables de inventario y de escasez de productos debido a restricciones de capacidad de almacenamiento y/o de disponibilidad de mano de obra. El modelo matemático corresponde a un problema MILP donde las decisiones discretas se emplean para determinar los períodos en los que se realizan las visitas de los proveedores y aquellos en los que se emiten las órdenes de compra. El criterio de performance es minimizar los costos totales teniendo en cuenta gastos por compras, costos de mano de obra e inventarios y las penalidades por escasez.

Palabras Claves: Cadena de suministro; Hospital; Optimización multiperíodo; Modelo MILP.

Abstract: This paper presents a multi-period optimization model to schedule logistic activities in a hospital supply chain. The main goal is to obtain a schedule for products replenishment and determine the amount of inputs purchased, knowing the demand profile of each period. In addition, the proposed formulation considers inventory variables and product shortages due to storage capacity constraints and / or availability of labor. The mathematical model corresponds to a MILP problem, where discrete decisions are used to determine the periods in which the suppliers visit the hospital and the times where each product must be ordered. The performance criterion is to minimize the total costs which comprise purchasing expenses, labor and inventory costs, and a penalty term to account for shortages.

Keywords: Supply chain; Hospital; Multi-period optimization; MILP Model.

M. Celeste Kees, M. Susana Moreno, J. Alberto Bandoni

Planta Piloto de Ingeniería Química PLAPIQUI (CONICET-UNS), Camino La carrindanga km 7, Bahía Blanca, Argentina.

Mail: mckees@plapiqui.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales desafíos que afronta el sistema de salud actual es la dificultad de sostener un alto nivel de eficiencia en la prestación a la vez que intenta mantener al mínimo los costos de dicho servicio. Se estima que, un 35% de la inversión total del sector hospitalario corresponde a las actividades procedentes del servicio de farmacia (Maestre Torreblanca et al., 2012). Normalmente, los productos farmacéuticos se adquieren a precios elevados y requieren, además, condiciones de transporte, distribución y almacenamiento particulares, que aumentan los costos de adquisición. Sin embargo, un determinado porcentaje del costo asociado a la farmacia hospitalaria comprende los gastos por escasez de medicinas esenciales, uso inapropiado de medicamentos y empleo de productos de baja calidad (Priyan y Uthayakumar, 2014). Además, se detectan gastos por reservas de insumos innecesarias e inconvenientes producto de la falta de utilización de soportes informáticos adecuados (Rachmania y Basri, 2013). Este costo no sólo afecta las variables económicas del hospital sino que además impacta de manera perjudicial sobre el estado de salud de los pacientes.

Con el fin de sortear estas dificultades, es necesario reconocer la importancia de la aplicación de nuevas políticas que permitan una eficiente administración de la cadena de suministro (CS). Para ello debe implementarse un control de inventarios más estricto que permita determinar, con mayor precisión, en qué momento debe realizarse la reposición de insumos dentro del hospital y qué tamaño deben tener las órdenes de compra correspondientes. El desafío más importante consiste en disminuir los costos de inventario sin sacrificar la calidad del servicio prestado al paciente. Esta tarea es considerada actualmente como una de las de mayor impacto sobre el desempeño integral del sector hospitalario (Nenes et al., 2010).

El control de inventarios implica la selección de estrategias de adquisición y distribución de insumos que permitan balancear las cantidades demandadas y suministradas, garantizando el cumplimiento de cierto nivel de servicio, y que minimicen, al mismo tiempo, los costos de inventario y aquellos asociados a la emisión de órdenes de compra.

Existen diferentes políticas para llevar a cabo esta tarea pero todas intentan responder a los mismos interrogantes: Qué cantidad de cada producto es conveniente ordenar?, cuándo es prudente enviar las respectivas órdenes de compra? Para encontrar respuesta a estos cuestionamientos se implementan distintos métodos generales de control, dentro de los cuales, los más frecuentes son aquellos en los que el abastecimiento se realiza cuando el inventario alcanza un nivel mínimo, donde se incluyen los métodos Order Point-Order quantity (s,Q) y Order Point-Order-up-to-level (s,S) y aquellos en los que la reposición de insumos ocurre a partir de revisiones periódicas, como en las técnicas Periodic review-Order-up-to-level (R,S) y Periodic review (R,s,S).

La implementación directa de estos procedimientos en el manejo de la CS hospitalaria parece no arrojar resultados eficientes. Autores como Kelle et al (2012) y Lapierre y Ruiz (2007), atribuyen este hecho a una serie de limitaciones, propias del sistema de salud. Principalmente consideran que el uso de recursos humanos es escaso y por lo tanto la decisión sobre las visitas para el control de stock y reposición de insumos, y para la emisión y recepción de las órdenes de compra, debe basarse en la disponibilidad de mano de obra y no solamente en el punto de reorden. Por otra parte, la capacidad de almacenamiento en los hospitales suele ser limitada. Esto genera que la dimensión de las áreas de almacenamiento de insumos sea un factor determi-

nante en la toma de decisiones de suministro. Además, el horario y la frecuencia de las actividades de suministro se calculan minimizando los costos sin contemplar las ventajas del control de stock frecuente, que permita una detección temprana de irregularidades en el inventario. De este modo, las tareas de control ayudan a garantizar el cumplimiento de un determinado nivel de servicio sin estar esto considerado de manera directa en la función costos.

En la bibliografía se encuentran numerosas modificaciones implementadas sobre los métodos de control de stock mencionados, las cuales permitieron que estos sean aplicables al manejo de la cadena de insumos farmacológicos. Rachmania y Basri (2013) aplican el modelo (s,Q) para decidir sobre la compra de medicamentos oncológicos dentro de un hospital en Indonesia. Se contempla una variación en la demanda de los productos y se incorpora al inventario una cantidad de seguridad con el fin de abastecer a los pacientes en los momentos en los que la demanda se desvía del valor normal. Kelle et al. (2012) evalúan modificaciones sobre el modelo (s,S) para optimizar el manejo de inventario en una unidad de cuidado hospitalaria. Incorporan consideraciones sobre las restricciones en la capacidad de almacenamiento y consideran además la existencia de una demora en la entrega de las órdenes de compra.

Existen otros autores que desarrollan técnicas diferentes de control de stock en el sistema de salud. Liao (2009) considera la satisfacción del paciente como una variable de impacto en la administración de insumos, realizando su análisis sobre una CS compuesta por 3 hospitales y una central de compras. Maestre Torreblanca et al. (2012) también incorporan este concepto utilizando diferentes reglas heurísticas para calcular la reserva de seguridad que garantice el cumplimiento

del nivel de servicio del hospital. Pryian y Uthayakmar (2014) proponen un modelo que contempla la existencia de una diferencia entre las cantidades ordenadas por el servicio de salud y las que efectivamente son recibidas desde los proveedores.

Todas estas metodologías, bajo ciertas suposiciones, parecen funcionar de manera eficiente para dimensionar las órdenes de compra y decidir en qué momento emitirlas. Sin embargo, puede plantearse una alternativa más elaborada para la gestión de la CS hospitalaria que se exprese a través de una agenda que determine la secuencia óptima de operaciones de compra y reposición, contemplando todas las necesidades de logística y las restricciones propias del sistema de salud.

En su trabajo, Lapierre y Ruiz (2007) presentan un modelo mixto entero lineal (MILP, por sus siglas en inglés) que planifica las principales actividades diarias que debe realizar el sistema de provisión de insumos a lo largo de un determinado horizonte de tiempo. Estos autores plantean que la distribución de productos a las unidades de cuidado (UC) se puede realizar mediante dos tipos de reposición. La primera opción consiste en la entrega directa de productos desde el proveedor en el mismo período en el que éste visita al hospital, quedando el insumo automáticamente a disposición para el suministro a pacientes. La opción de entrega indirecta, en cambio, se realiza a través de la unidad de almacenamiento central (AC) la cual aprovisiona a las UC en todos los períodos del horizonte de planeamiento.

De qué modo y en qué cantidad deben distribuirse los productos dentro de una unidad de salud resultan ser una decisiones clave en la programación de tareas para el control de inventarios (Lapierre y Ruiz, 2007). Si se decide realizar la entrega de insumos de modo directo, se consume menor cantidad de recurso de mano de obra pero obliga a aumentar la capacidad de

almacenamiento de las UC. Por el contrario, la reserva provisorio en el AC no suele presentar limitaciones de espacio pero obliga a utilizar mayor cantidad de horas de mano de obra. En el trabajo de Lapierre y Ruiz (2007), se plantea la necesidad de encontrar una agenda de tareas que alcance el equilibrio óptimo entre todas las operaciones de suministro de la cadena, garantizando el cumplimiento del nivel de servicio sin comprometer la disponibilidad de espacio y de recursos humanos.

Basados en los estudios anteriores y considerando la importancia de la adecuada gestión de la CS hospitalaria, este trabajo extiende el modelo presentado por Lapierre y Ruiz (2007). Se propone una formulación MILP multiperíodo que permite programar de manera óptima las tareas logísticas en una CS hospitalaria minimizando los costos totales.

El modelo propuesto contempla nuevas características de la provisión de insumos, como la existencia de escasez y la clasificación de productos dentro de categorías que requieran diferentes modalidades de control.

La escasez de productos puede deberse a dos factores: la capacidad de almacenamiento reducida, que imposibilita la recepción de nuevos insumos, y la escasa disponibilidad de mano de obra, que dificulta las tareas de control de inventario y distribución. Esta escasez deteriora la prestación del servicio produciendo una insatisfacción de las necesidades del paciente y, por lo tanto, será penalizada en la función costos (Jung et al., 2008).

Con el fin de establecer la prioridad en los controles de inventario, durante los cuales se emiten las órdenes de compra, se incorpora un sistema de categorización de insumos hospitalarios denominado Clasificación ABC o Lote económico de compras (Borges Rosa et al.2005). Los productos de Clase A

son aquellos cuyo costo representa alrededor del 50% del gasto total de inversión en insumos, pero que constituyen como máximo el 20% de los ítems totales; los productos de Clase B corresponden al 20-30% de los ítems y ocupan el 20-30% del costo total; mientras que los de Clase C son aquellos que requieren una menor inversión (20 % del costo total aproximadamente) pero se incluyen en esta categoría alrededor de la mitad de los ítems totales ordenados. Bajo estas reglas de categorización, cada clase presenta una periodicidad de control de inventario diferente en las UC, entendiendo que los insumos de menor coste y mayor fracción de la cantidad total (Clase C) pueden ser inspeccionados con menor frecuencia que los de clase A, cuya insuficiencia puede implicar graves consecuencias en la salud del paciente y es por ello que deben ser inventariados con mayor regularidad.

Además, la formulación del problema permite determinar el período de emisión de las órdenes de compra contemplando la existencia de una demora en la entrega por parte de los distribuidores. De este modo, la decisión sobre qué proveedor seleccionar no está basada únicamente en obtener el menor precio, sino que se esfuerza por balancear los costos con los retrasos en la recepción de la orden, impidiendo que esto afecte al abastecimiento de insumos.

El propósito de este trabajo es realizar un seguimiento detallado de productos de uso médico dentro de un hospital con el fin de optimizar la programación de las tareas de compra, reposición y suministro de los mismos, a través de un modelo MILP. Se busca determinar la cantidad óptima de insumos que se deben comprar y la frecuencia de realización de las respectivas órdenes de compra.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para el problema considerado en este trabajo se parte de la CS que se muestra en la Figura 1. En un horizonte de planeamiento dividido en $t = 1 \dots T$ períodos de tiempo, se analiza el camino que realizan los productos $i = 1 \dots I$, clasificados cada uno dentro de una de las categorías $g = A, B, C$. Para definir esto último se incorpora el subconjunto SI_g que incluye la distribución de los productos en el grupo al cual pertenezcan. El seguimiento de los insumos ocurre desde que son entregados por los proveedores $p = 1 \dots P$ hasta que son recibidos en las distintas unidades de cuidado $k = 1 \dots K$ del hospital.

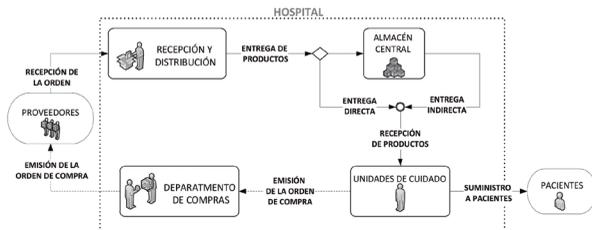


Figura 1: Esquema de la cadena de suministro hospitalaria.

En el período t en el que entregan insumos i pertenecientes al grupo g , el hospital recibe una cantidad Q_{igpt} de productos de cada proveedor p . En ese periodo, se realiza la distribución directa de Q_{Digkt} unidades a las UC, mientras que la cantidad restante Q_{Iigkt} se almacena provisoriamente en la unidad AC. Esta última cantidad se incorpora automáticamente al nivel de inventario IC_{igt} de dicho almacén.

En cada UC k se realiza la provisión de insumos i a los pacientes respondiendo, en caso de que sea factible, a la demanda total del periodo t , D_{igkt} . Si bien la intención principal del servicio de salud es entregar todas las unidades solicitadas, puede ocurrir que, por

limitaciones de espacio y/o tiempo, la cantidad total entregada por la UC QE_{igkt} sea menor que la cantidad demandada. Se genera entonces una escasez de producto E_{igkt} que será penalizada en la función objetivo del problema.

Previo a la emisión de la orden de compra, se realiza un control de inventario en cada UC. Para ello se contabiliza, en todos los períodos el nivel de inventario, I_{igkt} . Como se mencionó en la introducción, el grupo g al cual pertenezca cada producto va a determinar la frecuencia necesaria fc de control de inventario.

Una vez finalizada esta tarea se procede a calcular la cantidad óptima que debe ser ordenada QO_{igkt} , a uno o más proveedores, para satisfacer las necesidades de los pacientes. En este procedimiento se deben considerar dos limitaciones importantes. En principio se debe tener en cuenta que el total de productos pedidos, cada uno con un volumen V_{ig} , no supere la capacidad volumétrica del hospital. La misma está caracterizada por el volumen VU_k disponible en las UC y el del almacén central, VC. En segundo lugar, se debe contemplar la mano de obra disponible al momento en el que se reciba la orden, de modo que se puedan consumir sin inconvenientes todas las tareas de recepción y distribución de insumos en ese período.

El personal contratado para cumplir con las actividades del manejo de suministros dispone para tal fin de un tiempo total HU_p , que se encuentra dividido entre las horas correspondientes a una jornada de extensión regular, HR_p , y una cantidad menor, HE_p , la cual representa el tiempo de horas extra. Esta división tiene como finalidad contabilizar el aumento de los costos de mano de obra cuando ésta realiza tareas que superen la duración normal. Se utiliza para esto el factor de costos fcs .

La emisión de la orden de compra requiere de

una cantidad de tiempo HFP_p , que varía según el proveedor con el cual se esté efectuando el arreglo, y de una cantidad HVP_{igp} que depende además del tipo de producto que se desee adquirir. De manera similar, las tareas reposición implican el uso de un tiempo HF_k según sea la UC en la cual se realice y de un tiempo HV_{igk} característico de cada insumo que se está distribuyendo dentro del hospital. Cuando la entrega se realiza de modo directo, se produce un ahorro en el tiempo consumido respecto a la entrega indirecta, denominado A_{igk} .

Junto con lo explicado anteriormente, la cantidad a ordenar a cada proveedor debe tener en cuenta la capacidad máxima de provisión de los mismos MP. Además, ésta debe incluir la reserva de seguridad SS_{igkt} . Esta representa una cantidad de insumos con los que debe contar el hospital para abastecer a los pacientes durante los períodos en los que espera que se entregue la orden de compra solicitada.

La cantidad de producto ordenada para cada UC está establecida con base en la capacidad máxima MU_k de dichos módulos. Una vez determinado el tamaño de la compra, el hospital realiza el arreglo con los proveedores y espera la llegada de los productos que ocurrirá luego de un lapso de tiempo L_p , característico de cada distribuidor.

La función objetivo del problema consiste en minimizar los costos totales teniendo en cuenta gastos por compras, costos de mano de obra e inventarios y las penalidades por escasez. Resulta indispensable entonces detallar cómo cada una de las actividades descritas anteriormente participa en el cálculo del costo total del servicio. Aquí p_{igp} es el precio de adquisición de cada insumo, pn_{ig} la penalización por la escasez de productos que impide cumplir con el total demandado, cm_{ig} es el costo de inventario dentro de las unidades de cuidado, cmc_{ig} el costo de inventario

dentro del almacén central, como representa el costo por hora de mano de obra utilizada por período, ct_p el costo asociado al transporte de productos que debe pagarse al proveedor p y co es el costo por emisión de una orden de compra (contempla gastos administrativos del arreglo de compra).

FORMULACIÓN DEL MODELO

En esta sección se describen las restricciones del modelo MILP planteado, que tiene como base el modelo propuesto por Lapierre y Ruiz (2007). Teniendo en cuenta las decisiones que involucra es necesario definir dos variables binarias. La variable X_{gpt} adopta el valor 1 si el proveedor p visita el hospital para realizar la entrega de productos pertenecientes al grupo g en el período t , de lo contrario adopta el valor 0. Por otra parte, la variable Y_{gkt} que toma el valor 1 si se visita la unidad de cuidado k para realizar el control de inventarios de los productos del grupo g en el período t o cero si esto no ocurre.

$$\min C = \sum_{i \in SI_g, g, t} cmc_{ig} \cdot IC_{igt} + \sum_{i \in SI_g, g, k, t} cm_{ig} \cdot I_{igkt} + \sum_{i \in SI_g, g, p, t} p_{igp} \cdot Q_{igpt} + \sum_{i \in SI_g, g, p, t} ct_p \cdot Q_{igpt} + \sum_{g, p, t} co \cdot X_{gpt} + \sum_t cmo \cdot HR_t + \sum_t fcs \cdot cmo \cdot HE_t + \sum_{i \in SI_g, g, k, t} pn_{ig} \cdot E_{igkt} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$HU_t = \sum_{g, p} HFP_p \cdot X_{gpt} + \sum_{i \in SI_g, g} HVP_p \cdot Q_{igpt} - \sum_{i \in SI_g, g, k} A_{igk} \cdot QD_{igkt} + \sum_{g, k} HF_k \cdot Y_{gkt} + \sum_{i \in SI_g, g, k} HV_{igk} \cdot (QI_{igkt} + QD_{igkt}) \quad \forall t \quad (2)$$

$$HU_t = HR_t + HE_t \quad \forall t \quad (3)$$

$$E_{igkt} = D_{igkt} - QE_{igkt} \quad \forall i \in SI_g, g, k, t \quad (4)$$

$$I_{igkt} = I_{igk(t-1)} + QI_{igkt} + QD_{igkt} - QE_{igkt} \quad \forall i \in SI_g, g, k, t \quad (5)$$

$$IC_{igt} = IC_{ig(t-1)} + \sum_s Q_{igst} - \sum_k (QD_{igkt} + QI_{igkt}) \quad \forall i \in SI_g, g, t \quad (6)$$

$$SS_{igkt} = \sum_t^{t+LM} (D_{igkt} \cdot Y_{gkt}) \quad \forall i \in SI_g, g, k, t \quad (7)$$

$$IC_{igt} + \sum_k I_{igkt} \geq \sum_k SS_{igkt} \quad \forall i \in SI_g, g, k, t \quad (8)$$

$$\sum_k Q_{igkt} = \sum_p QO_{igk(t+L_p)} \quad \forall i \in SI_g, g, t \quad (9)$$

$$\sum_{i \in SI_{g,p,t}} Q_{igt} = \sum_{i \in SI_{g,k,t}} Q_{igt} \quad (10)$$

$$\sum_k QD_{igt} \leq \sum_p Q_{igt} \quad \forall i \in SI_{g,t} \quad (11)$$

$$\sum_k QD_{igt} \leq MU_k \cdot \sum_p X_{igt} \quad \forall i \in SI_{g,t} \quad (12)$$

$$\sum_i Q_{igt} \leq MU_k \cdot Y_{igt} \quad \forall i \in SI_{g,t} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in SI_g} Q_{igt} \leq M_p \cdot X_{igt} \quad \forall g, p, t \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^{t+(fc-1)} Y_{igt} \leq 1 \quad \forall g = 1, j, t = 1, \dots, (fc-1) \quad (15)$$

$$\sum_{i \in SI_{p,g}} V_{ig} \cdot I_{igt} \leq VU_k \quad \forall k, t \quad (16)$$

$$\sum_{i \in SI_{p,g}} V_{ig} \cdot IC_{igt} \leq VC \quad \forall t \quad (17)$$

La Ecuación (1) representa la función objetivo del modelo, C, la cual consiste en minimizar los costos totales generados durante la provisión de insumos. En esta expresión se incluyen los costos de mantenimiento durante el almacenamiento, los gastos por compra de insumos a diferentes proveedores, costos de transporte y emisión de órdenes, costos de mano de obra y la penalización por escasez de producto.

El tiempo total de mano de obra utilizada, tanto en las operaciones vinculadas a la compra de productos como en las tareas de control y abastecimiento, se contabiliza en la Ecuación (2). Este total es distribuido, en la Ecuación (3), entre horas regulares y horas extra.

El cálculo de la cantidad de producto en escasez, al no cumplir con la demanda, se realiza en la Ecuación (4). Las Ecuaciones (5) y (6) describen el balance de productos para calcular el nivel de inventario en las UC y en el AC, respectivamente. Se asumen conocidas la cantidad inicial en inventario en las UC y en el AC, I_{ig0} e IC_{ig0} , para cada producto i al comienzo del horizonte de tiempo.

En cada UC se determina la reserva de seguridad mediante la Ecuación (7) sumando los valores de demanda durante los periodos a lo largo del plazo de espera promedio de recepción de las órdenes de compra. Según determina la Ecuación (8), este valor

debe ser superado por la suma de los niveles de inventario de las UC y del AC en el período en que se requiera.

En la Ecuación (9) se especifica que la cantidad total ordenada en un determinado período t debe ser igual a la cantidad total recibida desde los proveedores en los periodos posteriores a la emisión del pedido, dependiendo de la demora propia del suministrador asignado. Dado que el modelo no admite la posibilidad de incumplimiento de la orden por parte de los proveedores, la Ecuación (10) iguala las cantidades ordenadas y recibidas durante todo el período de planeamiento.

La Ecuación (11) controla que la cantidad de insumos que componen la entrega directa no debe ser mayor a la cantidad total suministrada al hospital. Vinculado a esto se encuentra la Ecuación (12) que establece que las entregas directas de productos a las UC pueden ocurrir únicamente en los períodos en los que el proveedor con el cual se acordó la compra visita el hospital.

Las órdenes de compra sólo pueden emitirse en aquellos períodos en los que se visita la UC para realizar el respectivo control de inventario, tal como lo muestra la Ecuación (13). En la Ecuación (14) se establece que la cantidad pedida a un proveedor no debe superar la capacidad máxima de entrega que este posee.

En la Ecuación (15) se restringe la frecuencia de visitas a las UC para control de inventario, variando según el grupo al cual pertenezca el producto inventariado.

Las Ecuaciones (16) y (17) garantizan que la cantidad de inventario, tanto en las UC como en el AC, no supere la capacidad volumétrica disponible en cada módulo.

CASO DE ESTUDIO

El modelo MILP para el planeamiento de las tareas logísticas de la CS hospitalaria detallado en la sección previa se ilustra a través del siguiente ejemplo numé-

rico. Cabe aclarar que el mismo fue implementado y resuelto en el software GAMS 24.1.3 en una computadora AMD A6-3620 APU 2.20GHz con 8 GB de RAM empleando el resolvidor comercial CPLEX 12.5.1.0. Una diferencia de integralidad (integrality gap) de 5%, fue utilizada durante el proceso de solución.

El caso estudiado consiste en una CS compuesta por 5 ($P=5$) proveedores y un hospital integrado por un almacén central y 6 unidades de cuidado ($K=6$). Se realiza el seguimiento de un total de 100 productos ($I=100$), distribuidos en cada una de las categorías indicadas en el Lote económico de compras, del siguiente modo: los productos i_{1-120} pertenecen a la clase A, los productos i_{21-150} corresponden a la clase B, mientras que la clase C está integrada por los productos $i_{51-1100}$. El horizonte de tiempo global es de 2 meses fraccionado en 60 períodos o días ($T=60$). La demanda de cada insumo en cada una de las UC es conocida y varía en cada período.

La frecuencia de emisiones de orden considerada en el factor fcs , varía, según la clasificación ABC, del siguiente modo: 7 días para la clase A, 15 días para la clase B y 60 días para la clase C. Las UC poseen una capacidad de almacenamiento de 3 m^3 mientras que el AC soporta un volumen de almacenamiento de 11 m^3 . La demora en la entrega de pedidos por parte de los proveedores es de 3 períodos para p_1 , p_2 y p_5 , 4 períodos para p_3 y 2 para p_4 .

Los empleados asignados a las tareas de control y reposición disponen regularmente de 8 horas por período para el cumplimiento de sus actividades, y, en caso de ser necesario, pueden extender la jornada laboral durante 4 horas más cada uno. Existe una disponibilidad máxima de 10 empleados durante cada período. El costo por hora de mano de obra se estimó en \$ 50 y los costos administrativos por la emisión

de cada orden de compra se consideraron iguales a \$ 100. El factor de costo que contempla el aumento en el pago de las horas extras se determina en un valor de 1.5 según lo sugerido por Yang y Chou (2011). En este trabajo, por razones de espacio y dado el elevado número de productos, se omite la presentación del resto de los datos de entrada del modelo, pero está disponible para los lectores que los requieran.

El problema involucra 151.786 ecuaciones, 421.163 variables continuas y 1.452 variables binarias. El tiempo de resolución fue de 48,40 CPU s, obteniéndose un valor para la función objetivo de \$ 31.493.559,54. En la solución la distribución de tareas es tal que no se genera escasez de insumos en el hospital pueda cumplir con la totalidad de la demanda.

Para facilitar el análisis de los resultados, se estudia el comportamiento únicamente de un producto, seleccionado al azar, en este caso el producto $i=10$, que pertenece al grupo A, durante todo el horizonte de planeamiento. La Figura 2 muestra el movimiento del producto en una UC, mientras que la Figura 3 sigue al mismo producto pero en el AC.

Al observar la Figura 2 se puede identificar que las órdenes de compra se emiten únicamente en 8 períodos ($t_2, t_9, t_{19}, t_{26}, t_{33}, t_{40}, t_{47}, t_{59}$), las cuales se reciben luego, por parte de los proveedores, en 23 ocasiones diferentes. Como se explicó anteriormente, en el período en el cual se envía la orden de adquisición de un producto el nivel de inventario almacenado, en todo el hospital, debe ser superior o igual al valor de reserva de seguridad calculado. En las Figuras 2 y 3 se observa que esta cantidad se almacena de manera distribuida tanto en la UC como en el AC.

La Figura 2 indica que la cantidad de veces en que se realiza la entrega directa del producto se asemeja a la cantidad en que ocurren las entregas indirectas.

En la misma gráfica se puede observar que, existe una tendencia a generar niveles de inventario mayores a la demanda diaria únicamente en los periodos en que el producto se entrega de manera directa a la UC, mientras que en aquellos en los que ingresa desde el AC sólo ingresa la cantidad demandada.

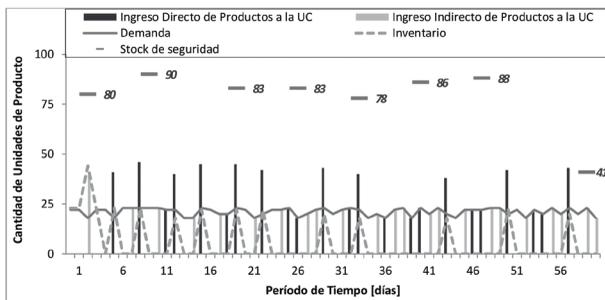


Figura 2: Movimiento del producto $i = 10$ en la unidad de cuidado $k = 3$ a través de todo el horizonte de planeamiento.

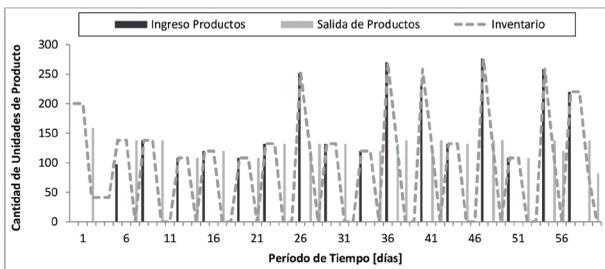


Figura 3: Movimiento del producto $i = 10$ en el almacén central a través de todo el horizonte de planeamiento.

Resulta interesante conocer la composición del costo total alcanzado por el hospital durante el horizonte de planeamiento. En la Figura 4 se muestra un detalle de la distribución de cada uno de los términos considerados en la función objetivo del modelo.

Se destacan principalmente los costos de adquisición y transporte de insumos. Los costos totales por inventarios en las UC representan una fracción mayor que los costos totales de inventario en el AC. Dado que la diferencia individual, o por producto, de dichos costos no es significativa, el resultado de la optimización indica que en todo el hospital, y en todos los

períodos de planeamiento, el almacenamiento de insumos para el aprovisionamiento ocurre preferentemente en las UC.

Los costos administrativos vinculados a la emisión de órdenes de compra y los costos de mano de obra resultan ser considerablemente menores si se los compara con cualquiera de los antes mencionados. Si bien no corresponden a factores de peso en la función objetivo del modelo, representan restricciones que afectan a la toma de decisiones de la cadena por motivos no económicos.

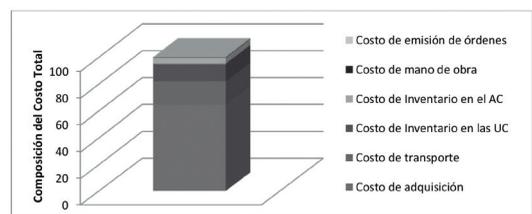


Figura 4: Composición del costo de la provisión de insumos durante todo el período de planeamiento.

Para estudiar la influencia de la restricción de mano de obra sobre el cumplimiento de los objetivos del hospital, se implementó el modelo utilizando los mismos datos que el caso base planteado, pero reduciendo las horas disponibles de mano de obra en un 25%. Bajo esta modificación, en la solución la función objetivo es \$ 32.749.207,76. En este caso existe un costo de penalidad por escasez debido a un incumplimiento de la demanda del 1,4% durante todo el período de planeamiento, a la vez que se produce un aumento del costo total del 4%, aproximadamente.

En la descripción del problema se planteó que otra de las causas por las cuales podría ocurrir escasez de insumos es la disminución en la capacidad total del almacenamiento del hospital. Para comprobar en qué medida esto afecta a las decisiones de planificación, y siguiendo con lo planteado en el párrafo anterior;

se parte del problema original y se disminuye en un 25% la capacidad volumétrica de las UC. Los resultados muestran una escasez de alrededor de 4%, que conlleva a un aumento del 16% de los costos totales.

Si se comparan los resultados de las dos variaciones respecto al ejemplo original, se puede deducir que la reducción en la capacidad de almacenamiento tiene un mayor impacto en el costo total del hospital que la reducción de la disponibilidad de mano de obra. La relación entre la escasez producida y el aumento de los costos en uno y otro evento no mantienen proporciones similares. Un factor involucrado en esta diferencia puede ser que la reducción de mano de obra genera un gasto menor inmediato, mientras que la reducción de la capacidad de almacenamiento no está directamente considerada en la función objetivo, sino que afecta a los niveles de inventario y por ende a los costos correspondientes.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso un modelo de optimiza-

ción multiperíodo para el planeamiento de las actividades logísticas de una CS hospitalaria. La formulación involucra tanto variables continuas como variables binarias resultando un problema MILP. Las variables binarias están asociadas a dos tipos de decisiones discretas. La primera determina el período óptimo en el cual realizar la emisión de las órdenes de compra, cuya frecuencia varía según sea la clasificación del producto. La segunda establece en qué período el proveedor, con el cual se acordó cada compra, visita al hospital. El resto de las variables están relacionadas con las cantidades emitidas y recibidas, la distribución de la mano de obra a lo largo de todo el período de planeamiento, los niveles de inventario y, por supuesto, el costo total asociado a todas estas actividades.

Los resultados muestran una detallada descripción sobre la distribución de tareas y sobre la cantidad óptima de insumos que se deben adquirir y distribuir para lograr la minimización de los costos del servicio, adaptando toda la planificación a la disponibilidad de recursos, tanto de capacidad como de mano de obra disponible, del hospital.

REFERENCIAS

- Borges Rosa M., Vasconcelos de Magalhães Gomes M.J., A.M. Moreira Reis (2005). Capítulo 21. En: *Ciências Farmacêuticas uma abordagem em Farmacia Hospitalar*. Atheneu Editora
- Hung-Chang L. (2009). Using GA to dispatch the obtaining quantity for minimizing the total cost based on consideration of patient safety in HSCM. *Expert System with Applications*, 36, 11358-11362.
- Jung J.Y, Balu G., Pekny J.F, Reklaitis G.V., Eversdyk D. (2008) Integrated safety stock management for multi-stage supply chain under production capacity constraints. *Computer and Chemical Engineering*, 32, 2570-2581.
- Kelle P., Woosley J., Schneider H. (2012) Pharmaceutical supply chain specifics and inventory solutions for a hospital case. *Operational Research for Health Care*, 1, 54-63.
- Lapierre S. D., Ruiz A.B (2007) Scheduling logistic activities to improve hospital supply systems. *Science Direct*, 34, 624-641.
- Liao HC (2009). Using GA to dispatch the obtaining quantity for minimizing the total cost based on consideration of patient safety in HSCM. *Expert Systems with Applications*, 36, 11358-11362.
- Maestre Torreblanca J.M, Tejera B.I., Fernández García M.I., del Prado Llergo J.R., Cantarero T.A., Fernández Camacho E. (2012). Análisis y minimización del riesgo de rotura de stock aplicado a la gestión de farmacia hospitalaria. *Farmacia hospitalaria*, 36(3), 130-134.
- Nenes G., Panagiotidou S., Tagaras G (2010). Inventory management of multiple items with irregular demand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 205, 313-324.
- Priyan S., Uthayakmar R. (2014). Optimal inventory management strategies for pharmaceutical company and hospital supply chain in fuzzy-stochastic environment. *Operations Research for health Care*, 3, 177-190.
- Rachmania I.N., Basri M.H. (2013) Pharmaceutical inventory management issues in hospital supply chains, 3(1), 1-5.
- Yang I.T., Chou J.S (2011). Multiobjective optimization for manpower assignment in consulting engineering firms. *Applied Soft Computing*, 11, 1183-1190.