

*Cómo citar este artículo:*

J. Arboleda-Zuñiga, and B.F. Salcedo-Moncada, "Modelo matemático para administrar el inventario del banco de sangre de un centro hospitalario", *Rev. Ing. Investig. Desarro.*, vol. 18 (2), pp. 5-14, Julio. 2018.

## MODELO MATEMÁTICO PARA ADMINISTRAR EL INVENTARIO DEL BANCO DE SANGRE DE UN CENTRO HOSPITALARIO

### Mathematical model to manage the inventory of the blood bank of a hospital center

Jairo Arboleda Zúñiga<sup>1</sup>, Bryan Fernando Salcedo Moncada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Sistemas Aplicado a la Industria (GISAI), Colombia. Email: jairo.arboleda@upb.edu.co, bryan.salcedo@upb.edu.co

*(Recibido marzo 29 de 2018 y aceptado junio 27 de 2018)*

#### Resumen

En el presente artículo se desarrolla un modelo matemático para la planeación y el control del inventario de glóbulos rojos en el banco de sangre de un centro hospitalario de nivel III ubicado en la ciudad de Santiago de Cali, este modelo es un soporte para la toma de decisiones, que permite brindar un nivel adecuado de servicio a los usuarios, reduciendo los costos de operación incurridos en el vencimiento de las unidades sanguíneas y en la adquisición a proveedores externos, contribuyendo a solucionar la problemática presente en el Valle del Cauca y algunas regiones de Colombia, donde los bancos de sangre se encuentran desabastecidos de unidades sanguíneas.

Inicialmente se caracteriza el comportamiento de la demanda de los glóbulos rojos; posteriormente, se realiza la construcción del modelo matemático, basado en programación lineal por metas donde se utilizan variables aleatorias para considerar la caducidad y sustitución por compatibilidad de las unidades sanguíneas y se da un tratamiento de restricciones flexibles a los objetivos, donde cada uno de estos tiene una penalización para agotados, obsoletos y adquisiciones externas de unidades sanguíneas.

Se logra correr el modelo de 8087 variables a través de modelado algebraico AMPL, obteniendo resultados específicos para cada grupo sanguíneo. La operatividad y resultados del modelo fueron verificados con alto grado de confiabilidad a través de la simulación discreta donde se recrearon varios escenarios. En conclusión, este modelo se constituye como una herramienta formal y estructurada para la planeación y control de la cadena de abastecimiento de sangre de otros centros hospitalarios.

**Palabras clave:** Cadena de suministro de sangre; Control de inventarios de sangre; Modelamiento matemático.

#### Abstract

In this article, a mathematical model is developed for the planning and control of the red blood cells inventory in the blood bank of a hospital center (3rd level) located in Cali, Colombia. This model pretends to provide an adequate level of service to users, reducing operating costs incurred in the expiration of blood units and in procurement from external suppliers, contributing to solve the problems present in El Valle del Cauca and some regions of Colombia, with lacks of blood banks.

At first place, the demand of red blood cells is characterized. Then, the construction of the mathematical model is made, based on linear programming by goals where random variables are used to consider the expiration and substitution for compatibility of the blood units and a treatment of flexible restrictions is given to the objectives. Each objective demands penalty for being spent, obsolete and external purchases of blood units.

It was possible to use the model of 8087 variables through AMPL algebraic modeling, obtaining specific results for each blood group. The operability and results of the model were verified with a high degree of reliability through discrete simulation where several scenarios were recreated. In conclusion, this model is a formal and structured tool for the planning and control of the blood supply linked to other hospital centers.

**Key words:** Blood supply chain, Control of blood inventories, mathematical model.

## 1. INTRODUCCIÓN

La encuesta de disponibilidad y seguridad de la sangre a nivel mundial, emitida por la Organización Mundial de la Salud (OMS), indica el índice ideal de captación sanguínea para un país, el cual debe estar entre el 1% y el 3% [1]. En el contexto colombiano en el año 2012 el índice fue del 0,159%, es decir que la captación Nacional no cumplía con los parámetros establecidos por la OMS. En el año 2014, el índice logra aumentarse para estar dentro del ideal. No obstante, más del 50% de la captación sanguínea está concentrada en los departamentos de Bogotá, Antioquia y Santander, mientras que la demanda es homogénea en todo el territorio. [2-3].

Existe un panorama crítico en los bancos de sangre de la región del Valle del Cauca. La Cruz Roja y La Fundación Valle del Lili como principales captadores de unidades sanguíneas, se encuentran en un alto desabastecimiento. Captando entre 17 y 18 unidades diarias de 50 unidades necesarias en la Fundación Valle del Lili, al igual que en el hemocentro de la Cruz Roja, donde se reciben 50 unidades diarias de 120. Esto indica que los principales hemocentros de la región captan entre un 35% y un 42% de unidades requeridas por la demanda. Por consiguiente, las reservas de los hemocentros se están destinando para la atención de emergencias y retrasando la programación de cirugías en varias clínicas de la ciudad [4-5].

Puesto que la administración de la sangre involucra algunas complejidades como sustitución de componentes y pruebas cruzadas, la precisión de los modelos es completamente difícil de alcanzar, nuevas investigaciones en los bancos de sangre se han focalizado en desarrollar mejores sistemas de información para facilitar en forma más rápida los resultados de las pruebas y así establecer el ordenamiento de los pedidos [6].

Es así como para crear un modelo para el manejo de este tipo de inventarios es importante conocer que en la planeación y control de estos se maneja una alta complejidad debido a la variación de la demanda, la escasez y aleatoriedad de la oferta, los tiempos de entrega originados por el alistamiento, las pruebas a las unidades recolectadas, sustitución de unidades sanguíneas por compatibilidad y el almacenamiento de un producto perecedero [6].

Es por esto que el objetivo del proyecto es desarrollar un modelo para la gestión de inventarios en la cadena de suministros de glóbulos rojos de un centro hospitalario, con el fin de brindar un nivel adecuado de servicio a los usuarios, reduciendo los costos de operación incurridos por el vencimiento de las unidades sanguíneas y las adquisiciones a proveedores externos.

El desarrollo de este proyecto se encuentra enmarcado en tres fases principales, iniciando con la caracterización de la demanda, la construcción del modelo matemático mediante la programación lineal por metas y finalmente la convergencia del modelo.

Para este artículo específico, en el segundo apartado se muestran los antecedentes de la investigación, en el tercer apartado la metodología empleada, en el siguiente se explica la construcción del modelo matemático, en el cuarto se muestran los resultados y finalmente se presentan las conclusiones y referencias utilizadas.

## 2. ANTECEDENTES

Para comprender el tipo de producto que trabaja el modelo, se estudia la clasificación de los ocho tipos de sangre a partir del sistema ABO y el factor Rh, según la presencia o ausencia de antígenos reactivos en la superficie de los glóbulos rojos [7-8].

Según la política nacional de sangre del Ministerio de Protección Social, se estima que en Colombia el 60% de la población nacional pertenece al grupo sanguíneo O (O+ 56% y O- 4%), 25% al grupo A (A+ 23.5% y A- 1.5%), 10% al grupo B (B+9% y B- 1%) y 5% al grupo AB (AB+ 4.5% y AB- 0.5%). De este modo los bancos de sangre buscan mantener inventarios para cada grupo sanguíneo, marcándose como objetivo la satisfacción de la demanda sanguínea de la región, mientras evitan incurrir el vencimiento de las mismas unidades [9].

Estableciendo factores fundamentales para definir las cantidades de unidades a mantener en un inventario sanguíneo, la gestión de inventarios en los hemocentros debe reconocer en primer lugar la demanda; Como el número de unidades de sangre de cualquier tipo requerido en los centros hospitalarios (1 unidad = 450 ml aproximadamente). La escasez; Fenómeno donde la demanda supera el número de unidades de sangre

disponibles en los inventarios. Finalmente es necesario reconocer la caducidad; Momento en que una unidad sanguínea se ve descartada por exceder su vida de anaquel, por ejemplo, 42 días para los glóbulos rojos [10].

Debido a esta última condición, donde la sangre es de naturaleza perecedera, los administradores de los bancos de sangre se encuentran con que la administración de este producto es un problema de gran complejidad, donde en ocasiones se tienen excesos de las unidades de sangre que no son solicitadas y se ven agotadas aquellas de las que los pacientes necesitan [6]. Ratificando la importancia de caracterizar los patrones de demanda.

El patrón de demanda más simple es el de demanda perpetua, la cual se mantiene por largos periodos de tiempo con pequeñas fluctuaciones en rangos pequeños. La demanda estacional es aquella donde se esperan picos en determinados periodos de tiempo, como la venta de artículos navideños. El patrón de demanda errático, se caracteriza por grandes fluctuaciones en el tiempo, pasando de periodos de cero demandas a grandes picos, diferenciándose de los demás por no poder predecirse [11]. En estudios previos se ha podido comprobar como la demanda de unidades sanguíneas es altamente variable, ajustándose a un comportamiento errático [12].

La alta variabilidad o incertidumbre de esta demanda supone un reto para ofrecer soluciones específicas para problemas de la región como es el caso o de la misma industria. Existen investigaciones recientes donde a partir de modelos Bayesianos se logra definir las cantidades a ordenar, almacenar y reducir los costos de inventario, logrando ofrecer un escenario en donde se esté preparado para los cambios abruptos de la demanda en el tiempo [13].

La investigación a nivel de demanda irregular, realizada en un banco de sangre de Alemania, donde la Programación Dinámica de Markov (MDP), combinada con simulación, demostró que disminuyendo la dimensión y aplicando el análisis combinado, se pueden definir reglas de reposición para mejorar el servicio; estas reglas lograron mostrar resultados cercanos al óptimo, y a través de un análisis de sensibilidad, se pudieron controlar los agotados y los costos de producción para la administración del inventario de plaquetas [14].

Tomando como ejemplo el banco de sangre hospital clínico de Barcelona, se logró desarrollar un modelo estocástico que simula la operación con un número finito de días, esto permitió que se analizaran diversos factores que influyen en las tasas de escasez y de obsolescencia, factores como la media y el coeficiente de variación de la demanda CVD, resaltando este último como el mejor parámetro para determinar el desempeño de un banco de sangre [15].

En la Ciudad de la Habana, en el Instituto Superior de Medicina Militar, con el objetivo de calcular el inventario mínimo de glóbulos y plasmas, se construyó un modelo útil para evitar la caducidad de unidades sanguíneas y así incrementar su eficiencia, logrando disminuir los envíos regulares de unidades sanguíneas desde los centros abastecedores [16].

En materia de redes que consoliden la cadena de suministro de sangre a través de grandes centros regionales, cabe resaltar a Chile, por medio del Centro de Sangre de Concepción, esta organización abastecedora de sangre surte a más de 20 establecimientos hospitalarios de salud del sur del país. Replicándose en otras regiones del país, esta red cubre la necesidad de los hospitales del territorio Nacional [17].

En la actualidad las investigaciones en la administración de bancos de sangre, ha estado dirigida a la garantía del suministro de sangre en toda la red y la mejora de los modelos de pronósticos. Un ejemplo de ello es la demostración de que la centralización de los inventarios en la cadena de suministro sanguínea es un factor clave de acuerdo a modelos de redes de programación lineal entera mixta [18]. La teoría de restricciones también toma fuerza en modelos donde se relacionan la caducidad, escasez y aleatoriedad para determinar la causa raíz de la problemática [19]. El carácter perecedero y uso por sustitución de este producto también es abordado mediante modelos de análisis multicriterio donde mediante la tasa de surtido es posible manejar estas dos condiciones [20].

Finalmente, también es importante evaluar la red de abastecimiento de sangre, existe un estudio dirigido a su evaluación mediante modelos genéricos de simulación, que sugieren el uso de diversos escenarios para los nodos de abastecimiento [21].

### 3. METODOLOGÍA

Esta investigación se puede definir como un proyecto que utiliza diversas metodologías de la investigación de operaciones aplicadas al subsistema de control de inventarios de la cadena de suministro de sangre. Permitiendo al centro hospitalario de estudio, disponer de las herramientas necesarias para la toma de decisiones más apropiadas referentes a la administración del sistema. El desarrollo de este proyecto se realiza en las siguientes etapas.

#### 3.1 Caracterización de la demanda de los glóbulos rojos por tipo de sangre

3.1.1 Para un primer análisis de demanda se tomaron los registros históricos de las transfusiones diarias realizadas en el centro de salud durante el año 2016. Con un tamaño de muestra de 294 días para los grupos sanguíneos; O+, O-, A+, A-, B+, AB+. Mientras que para los grupos sanguíneos B- Y AB- se tomaron 384 datos, debido a su alta variabilidad.

3.1.2 Para un segundo análisis, se consolida la muestra anterior de datos de forma mensual; la razón obedece a disponer de una ventana de tiempo para la elaboración de los pedidos, los cuales no se pueden hacer de forma diaria, contribuyendo así, a la reducción del costo de ordenamiento.

3.1.3 Se realizan ajustes del comportamiento de demanda a la función de distribución, usando *STAT:FIT* (Aplicativo del software *Promodel*) y el software estadístico *Minitab*.

#### 3.2 Construcción del Modelo Matemático para Programación y Control del Inventario de Sangre en el Centro Hospitalario. Basado en Programación lineal por Metas

3.2.1 De manera inicial se determinan las variables de estudio, las cuales incluyen; Demanda, caducidad, sustitución de unidades (pruebas cruzadas) y adquisición externa.

3.2.2 Posteriormente se construye el modelo mediante programación lineal por metas, donde los objetivos son tratados como restricciones flexibles de forma que cada uno de ellos va a tener una posible desviación o penalidad, tratando de conseguir que estas sean las menores posibles.

#### 3.3 Corrida del Modelo en AMPL (*Mathematical Programming Language*)

Este lenguaje permite aplicar el método preventivo, a partir de la programación lineal por metas, donde se agregan restricciones simples para garantizar que las soluciones de alta prioridad no se degraden (Manual de AMPL).

#### 3.4 Análisis de Resultados Computacionales

3.4.1 Pruebas de validación y operatividad del modelo propuesto.

3.4.2 Análisis final de convergencia de los resultados de la demanda y del modelo matemático con parámetros aleatorios mediante una simulación discreta.

### 4. DISEÑO DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN POR METAS

#### 4.1 Justificación del Modelo

El modelo a desarrollar debe representar una alternativa de solución para el problema de planeación y control del sistema de inventarios de sangre del centro médico de estudio. Es fundamental que el modelo considere la condición perecedera de los componentes sanguíneos y garantice el nivel establecido de satisfacción de la demanda, también es importante que en la elaboración del modelo sea considerada la sustitución de los diferentes tipos de sangre del componente glóbulos rojos. Para ello se utiliza un modelo de naturaleza multicriterio con varios objetivos, soportado en la Programación Lineal por Metas, donde se dará un tratamiento de restricciones flexibles a los objetivos, donde cada uno de estos tendrá una penalización que deberá ser la mínima posible.

#### 4.2 Entrada

Son los datos que alimentan el sistema, estos hacen referencia a los registros históricos (294 – 384) de las transfusiones diarias realizadas en el centro de salud.

##### 4.2.1 Notación.

*I*: Tipos de sangre donada

*J*: Tipo de sangre demandada

*T*: Fecha de disponibilidad de la sangre

*U*: Fecha de utilización de la sangre

##### 4.2.2 Parámetros.

$Do_{it}$  = Cantidad de unidades de sangre donada del tipo *i* disponible en fecha *t*.

$D_{ju}$  = Demanda o necesidades de sangre tipo j para ser utilizada en procedimiento de fecha u.

#### 4.2.3 Penalizaciones (P).

$P_{ij}$  = Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j

$P_i$  = Penalización por vencimiento de sangre donada tipo i ( $u-t > 42$  días)

$P_j$  = Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días)

#### 4.2.4 Variables de decisión.

$X_{ijtu}$ : Cantidad de unidades de glóbulos rojos (GR) de donación tipo i, disponibles en el periodo t, para ser utilizadas en procedimientos donde se requiere el tipo j en la fecha de procedimiento u (unidades GR tipo i / periodo t).

$Y_{ju}$ : Cantidad de sangre adquirida a proveedor externo del tipo j para para ser utilizada en el procedimiento en la fecha u (unidades GR tipo j).

$VARIACUM_{ij}$ : Variable de estado para establecer el uso propio o por sustitución de una cantidad de unidades de glóbulos rojos de donación tipo 1 que son utilizadas en procedimientos donde se requiere el tipo j (unidades GR tipo i).

#### 4.2.5 Cálculo de penalizaciones

$P_{ij}$  = Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j. Donde se calcula la probabili-

dad de que un evento m (probabilidad de que la sangre requerida sea del tipo j), dado un evento n (probabilidad de que una donación sea del tipo de sangre i).

$P_i$  = Penalización por vencimiento de sangre ( $u-t > 42$  días). Esta penalización es calculada teniendo en cuenta la vida útil de los glóbulos rojos y la distribución de frecuencia de la demanda encontrada en el estudio; a medida que más se impacte la demanda con componentes vencidos, mayor será la penalización.

$P_j$  = Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días).

Esta penalización es calculada teniendo en cuenta el criterio de la administración del banco de sangre que considera que la adquisición de sangre a través de proveedor externo es cuatro (4) veces más crítica que el vencimiento de la vida útil de los componentes sanguíneos almacenados.

#### 4.3. Formulación del Modelo

4.3.1 Función Objetivo. Es la suma de las tres penalizaciones; Penalización por uso de sangre donada tipo i en usuario con sangre tipo j, Penalización por vencimiento de sangre ( $u-t > 42$  días), Penalización por adquisición a proveedor externo de la sangre demandada tipo j ( $u-t > 42$  días). Ver ecuación 1.

4.3.2 Restricciones. El modelo está sujeto a la satisfacción de la demanda, el balance de unidades sanguíneas, el uso de sangre por sustitución y de restricciones lógicas. Ver ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Función Objetivo: Min. Penalizaciones

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \text{TIPOD}} \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{t \in \text{FECHAD}} \sum_{u \in \text{FECHAU}} (X_{ijtu} * P_{ij}) \text{ (Penalización por uso de sangre) } + \\ & \sum_{i \in \text{TIPOD}} \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{t \in \text{FECHAD}} \sum_{u \in \text{FECHAU}, u > t + 42} (X_{ijtu} P_i) \text{ (Penalización por vencimiento de sangre) } \\ & + \sum_{j \in \text{TIPOR}} \sum_{u \in \text{FECHAU}} Y_{ju} * P_j \text{ (Penalización por adquisición de sangre a prov. ext.)} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

Satisfacción de la demanda

$$\sum_{i \in TIPOD} \sum_{t \in FECHAD, t > u - 42} X_{ijtu} + Y_{ju} = D_{ju} \quad \forall j \in TIPOR, u \in FECHAU \quad (2)$$

Balance de sangre

$$\sum_{j \in TIPOR} \sum_{u \in FECHAU, u \geq t} X_{ijtu} \leq DO_{it} \quad \forall i \in TIPOD, t \in FECHAD \quad (3)$$

Uso de sangre

$$\sum_{t \in FECHAD, t > u - 42} \sum_{\substack{u \in FECHAU, u \geq t \\ \in TIPOR}} X_{ijtu} = VARIACUM_{ij} \quad \forall i \in TIPOD, j \in TIPOR \quad (4)$$

Restricciones lógicas

$$\begin{aligned} X_{ijtu} &\geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T, u \in U \\ X_{ijtu} &\in \text{Enteros} \\ Y_{ju} &\geq 0 \quad \forall j \in J, u \in U \\ Y_{ju} &\in \text{Enteros} \end{aligned} \quad (5)$$

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Comportamiento de la Demanda

De acuerdo a la caracterización de la demanda diaria se obtienen que los ocho grupos sanguíneos presentan una alta variabilidad, ajustándose a un comportamiento de demanda errático para cada grupo sanguíneo. Los glóbulos rojos AB- y B- presentan el mayor grado de variabilidad en la demanda con un CVD > 12. Los grupos A-, AB+, B+ y O- presentan un CVD entre 1.3 y 4.7 y en los tipos de sangre A+ y O+, un CVD de 1.13 y 0.94 respectivamente, destacándose el O+ como el de menor variabilidad. Ver figura 1 como ejemplo de la variabilidad de la demanda diaria de los GR del grupo sanguíneo O+.

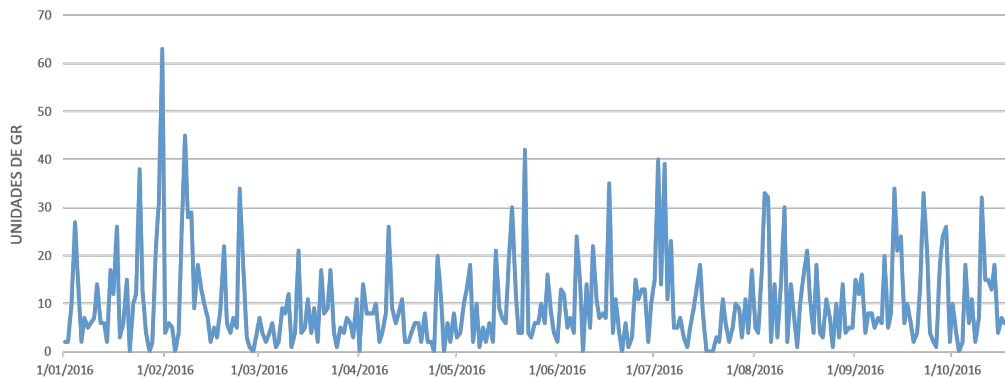


Figura 1. Comportamiento de la demanda de glóbulos rojos de tipo de sangre O+.

Al caracterizar la demanda de manera mensual, el resultado es diferente, los grupos sanguíneos A+, A- y O- presentan un comportamiento estacional con picos mayoritariamente en los meses de febrero y junio. Lo grupos sanguíneos B-, AB- y AB+, mantienen su comportamiento errático, y los grupos B+ y O+, se comportan de manera uniforme. Este estudio es necesario, sin olvidar el carácter perecedero de este tipo de producto.

### 5.2 Ajustes de distribución de probabilidad

Al realizar las pruebas de bondad de ajuste, tanto con el estadístico de prueba chi cuadrado como el K-S (Kolmogorov – Smirnov). Se evidencia que los datos no siguen una distribución de Poisson ni otra conocida, por lo cual, se realiza una distribución

empírica por medio de la función de la transformada inversa, la cual toma como base la generación de números aleatorios para periodos de demanda de máximo 15 días (Debido al carácter perecedero del producto). Esta distribución empírica permitirá plantear una simulación discreta (Excel), recreando múltiples escenarios para medir la operatividad del modelo y conocer la demanda proyectada para el centro hospitalario de referencia.

### 5.3 Resultados del Modelo Computacional

Finalmente, el modelo de programación por metas fue desarrollado a través de AMPL, se logra correr el modelo de 8087 variables a través del neos-server Gurobi, solucionador gratuito para diferentes tipos de modelos matemáticos, destacado por la rapidez en la obtención de resultados [22]. Obteniendo los siguientes resultados computacionales:

En primer lugar, se describen algunos resultados obtenidos referente a la programación de unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre que deben estar disponibles en el periodo  $t$  para ser utilizadas en transfusiones en el periodo  $u$ . Es decir, el modelo describe cuantas unidades sanguíneas deben estar disponibles al finalizar la semana (día 7, día 14, día 21, etc.) para que estas unidades puedan ser utilizadas en el día  $u$ , dentro de la semana inmediatamente siguiente en un horizonte de 48 días. Donde al finalizar la primera semana,  $t = 7$ , deben estar disponibles 5 unidades de GR A+ para ser utilizadas en el periodo  $u = 12$ . Ver en la tabla 1. La programación para glóbulos rojos A+.

**Tabla 1.** Programación de unidades de GR A+ para ser usadas en unidades demandadas de GR A+

u/t	1	7	14	21	28	35	42	49
1	2							
2	17							
3	4							
4	3							
5	12							
6	1							
7		2						
10		10						
11	3	3						
12		5						
13		2						
14		1	2					
15		16						
6			24					
17			5					
18			5					
19			7					
21				2				
22				2				
23				4				
24				8				
25				1				
26				12				
28					4			
29					10			
30					10			
32					2			
35						2		
36						19		
37					2			
38						4		
39						2		
40						1		
41					2			
45						6		
46						7		
47						4		
48						4		

A continuación, se presenta el resultado del uso por sustitución de las unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre donada y demandada. Ver tabla 2.

**Tabla 2.** Unidades de glóbulos rojos sustituidas

Tipo de donación	Tipo de sangre demandada	Cantidad de unidades sustituidas	Total de unidades usadas	% de Sustitución de unidades
O-	O+	49	555	9%
O+	A+	29	266	11%

Para satisfacer la demanda de glóbulos rojos presentada durante el horizonte de tiempo establecido, hubo necesidad de adquirir 108 unidades de glóbulos rojos al proveedor externo, siendo el tipo O- el más solicitado con 49% de las adquisiciones y el tipo B+ con 42% de las adquisiciones.

En la tabla 3, se describen los resultados obtenidos referentes a las unidades de glóbulos rojos por tipo de sangre y periodo que deben adquirirse a proveedores externos.

**Tabla 3.** Unidades de glóbulos rojos adquiridos a proveedor externo

G.R/Periodo	AB+	A-	B+	O-
2			2	8
3	2		2	
4			8	3
7		2	2	
9				7
10			1	
11		2		
12		2		4
13				1
15			3	
16				12
17			3	
26			2	
28	1			
35			18	
39			1	
44				6
45				12
46			4	
Total	3	6	46	53

Finalmente, el Valor de la Función Objetivo fue: 819,07. Es necesario aclarar que este modelo para la planeación y el control de inventarios de GR, no presenta objetivos numéricos, dado que esta información no fue suministrada como punto de partida por el centro hospitalario.

Con el fin de validar la convergencia de los resultados del modelo se describen las demandas simuladas durante 8 corridas en ciclos de 50 días. Ver tabla 4.

**Tabla 4.** Convergencia en resultados del modelo con demandas simuladas

Ciclos de demanda diaria simulada	Valor FO	% GR adquirido a proveedor	%GR Sustituídos	%GR No sustituídos
1	564,19	6,4	24,7	68.9
2	487,03	8,8	29,1	62.1
3	958,61	22,6	7,8	69.6
4	487,23	10	31	59
5	706,73	17,1	26,7	56.2
6	710,24	18	16,9	65.1
7	819,61	17,4	12,7	69.9
8	817,8	14,1	8,7	77.2

Validada la operatividad del modelo, mediante la simulación discreta, tomando como base la programación de unidades de la tabla 2 y replicándose para cada grupo sanguíneo, se considera el carácter perecedero de los glóbulos rojos, para obtener como resultado final las unidades específicas a ordenar por el centro hospitalario en el periodo  $t$ , para ser utilizados en los próximos quince días. Ver tabla 5.

**Tabla 5.** Cantidad de unidades sanguíneas a solicitar

Grupo Sanguíneo	Unidades a ordenar
A-	5
A+	78
B-	2
B+	14
AB-	1
AB+	3
O-	8
O+	64



## CONCLUSIONES

El estudio desarrollado indica que las unidades de glóbulos rojos demandadas por el hospital presentan un comportamiento errático, corroborado con los altos grados de coeficiente de variación de la demanda, que van desde un CVD de 0,94 para el grupo sanguíneo O+ hasta un CVD de 19,6 para el grupo AB-, confirmando así la complejidad para su administración.

El modelo matemático utilizando la Programación Lineal por Metas, trata la naturaleza multicriterio y compleja del problema de abastecimiento de sangre producido por la variabilidad de la demanda, la escasez, aleatoriedad de la oferta y el almacenamiento de un producto perecedero. Obteniendo una herramienta de soporte para la toma de decisiones que logre garantizar la satisfacción de la demanda, evitando a la vez la caducidad de los componentes sanguíneos y el desabastamiento.

Es necesario reconocer que el modelo puede mejorarse considerando algunas variables no tenidas en cuenta y que complejizan aún más el diseño y la solución presentada. No obstante, se logra dar al hemocentro una forma de abastecer el centro hospitalario con una cantidad de ordenamiento específica para periodos de tiempos de dos semanas.

Los resultados obtenidos en este proyecto pueden servir como referente para hemocentros de centros hospitalarios colombianos de nivel III y IV, pero se debe aclarar que no puede ser usado para obtener respuestas exactas debido al alto grado de variabilidad de los factores como la demanda, los índices bajos de donación en la región y la aleatoriedad de los tipos de sangre, sumado al carácter perecedero del producto en estudio.

Es importante destacar que la utilización de técnicas de ingeniería industrial, como los modelos matemáticos, análisis estadísticos basados en el coeficiente de variación de la demanda, investigación de operaciones y simulación discreta pueden llegar a plantear soluciones a problemáticas que afectan toda la comunidad de una región como es el uso adecuado de un recurso vital.

El modelo desarrollado en esta investigación podría ser usado a futuro como un insumo para la implementación

de un sistema de información integral y modular que permita acceder a la información en tiempo real, logrando la integración y coordinación de todos los bancos de sangre y los hemocentros a nivel regional y nacional.

## REFERENCIAS

- [1] OMS, Organización Mundial de la Salud (2017, Jun 22). Disponibilidad y seguridad de la sangre a nivel mundial, [Online]. Disponible en: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blood-safety-and-availability>
- [2] INS, Instituto Nacional de Salud (2013, Dic 31). Informe de Red Nacional de Bancos de Sangre y Servicios Transfusionales del Instituto Nacional de Salud, [Online]. Disponible en <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/IA/INS/ins-informe-anual-red-sangre-2014.pdf>
- [3] The World Bank (2017). Total population, [Online]. Disponible en <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- [4] El País.com.co. (2017, Dic 12). Alerta por disminución de reservas de sangre en hemocentros de Cali, [online]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/valle/hemocentros-de-cali-en-alerta-por-disminucion-en-reservas-de-sangre.html>
- [5] El País.com.co. (2018, Ene 12). Preocupación por baja donación de sangre en Cali, [online]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/cali/preocupacion-por-baja-donacion-de-sangre-en.html>
- [6] J. Arboleda, "Modelo de inventarios para la administración de la cadena de suministro en el banco de sangre de una clínica de la ciudad de Santiago de Cali", tesis de Maestría, Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2013.
- [7] M. Lichtman, J. Prchal, K. Kaushansky, M. Levi, L. Burns y J. Armitage, "Transfusión medicine", en *Williams Hematology*, Mcgraw Hill: Estados Unidos, 2000, pp. 1647-1659.
- [8] B. Brown, "Basic laboratory Techniques" En *Hematology: Principles and procedures*, Lea & Febiger: Estados Unidos, 1999, pp. 16-32.
- [9] República de Colombia, Ministerio de Protección Social (2011, Dic 26) Política Nacional de Sangre, [Online]. Disponible en: <https://www.invima.gov.co/politicas/177-politica-nacional-de-sangre.html>
- [10] R. Ballou, "Decisiones sobre políticas de inventarios," en *Logística Administración de la cadena de suministro*, E. Quintanar, Pearson Education: México, 2004, pp. 412-423.

- [11] C. Vidal, "Introducción a los pronósticos de demanda," en *Fundamentos de gestión de inventarios*, Universidad del Valle – Facultad de ingeniería, Universidad del Valle: Colombia, 2005, pp. 33-46.
- [12] B.F. Salcedo Moncada, M. Ramírez Fernández y J. Arboleda, "Pronóstico de componentes sanguíneos en un hemocentro de la ciudad de Santiago de Cali", In VIII Encuentro de investigación formativa, Universidad Pontificia Bolivariana, Palmira, Colombia, 2017, pp. 107-118.
- [13] M. Valencia, J. Correa y F. Díaz, "Modelo de inventarios que utiliza el modelo lineal dinámico bayesiano para el pronóstico de demanda", *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 15, no. 1, pp. 39-47, julio 2015. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.3937>
- [14] K. Katsliak y S. Brailfor, "Using simulation to improve the blood supply chain", *The Journal of the Operational Research Society Oxford*, vol. 58, no. 2, pp. 219-228, diciembre 2007. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602195>
- [15] A. Pereira, "Blood inventory management in the type and screen área", *Vox Sanguinis*, vol. 89, no. 4, pp. 245-250, octubre 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.14230410.2005.0070.x>
- [16] V. Fano y A. Longres, "Inventario mínimo de componentes sanguíneos en un servicio de hemoterapia de la ciudad de La Habana", *Revista Cubana de medicina militar*, vol. 27, no. 1, pp. 39-43, 1998.
- [17] J. Arboleda, "Mathematical and stochastic models for inventory control in blood banks: Literature Review" *Inventum*, vol. 12, no. 22, pp. 53-65, junio 2017.
- [18] Z. Hosseinifard y B. Abbasi, "The inventory centralization impacts on sustainability of the blood Supply chain", *Computers & Operations research*, vol. 89, no. C, pp. 206-212, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.014>
- [19] A. Hendarianpour, "Mathematical Modeling for Integrating Production – Routing Inventory Perishable Goods: A Case Study of Blood Products en Iranian Hospitals", en *Dynamics in Logistics*, M. Freitag, H. Kotzab, J. Pannek, Dynamics in Logistics LDIC 2018. Lecture Notes in Logistics: Germany, 2018, pp. 125-136. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74225-0_16)
- [20] L. Duong, L. Wood, & W. Wang, "A multi-criteria inventory management system for perishable & substitutable products", *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 66-76, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.012>
- [21] J. Blake y M. Hardy, "A generic modelling framework to evaluate network blood management policies: The Canadian Blood Services experience", *Operations Research for Health Care*, vol. 3, no. 3, pp. 116-128, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2014.05.002>
- [22] Gurobi Optimization. (2018, May 1). Using AMPL with Gurobi, [online]. Disponible en: <http://www.gurobi.com/products/modeling-languages/ampl>