

## Modelos

Símbolo	Rango	Descripción
$i$	$\{1,2,\dots,I\}$	<b>Índice que representa las ubicaciones potenciales para las Unidades Móviles de Sangre (BMs) (Blood Mobiles).</b>
$j$	$\{1,2,\dots,J\}$	<b>Índice correspondiente a los Centros Locales de Donación de Sangre (LBDCs) (Local Blood Donation Centers).</b>
$r$	$\{1,2,\dots,R\}$	<b>Índice asignado a los Bancos Regionales de Sangre (RBBs)</b> (Regional Blood Banks), que funcionan como Centros de Procesamiento.
$h$	$\{1,2,\dots,H\}$	<b>Conjunto que identifica a los Hospitales</b> (grandes instituciones médicas con laboratorios de transfusión).
$k$	$\{1,2,\dots,K\}$	<b>Conjunto que se refiere a las Instalaciones de Atención Médica</b> (Healthcare Facilities, como centros de salud y clínicas privadas).
$u$	$\{1,2,\dots,U\}$	<b>Conjunto que representa las Instalaciones de Eliminación de Residuos de Sangre (BWDFs) (Blood Waste Disposal Facilities).</b>
$p$	$\{1,2,\dots,P\}$	<b>Índice que especifica los tipos de glóbulos rojos</b> (red blood cell types), como los tipos A, B, AB y O en el caso de estudio.
$t$	$\{1,2,\dots,T\}$	<b>Conjunto que denota los períodos de tiempo.</b>

## Los parametros

### Parámetros de Demanda, Capacidad y Productos

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$DMt_{ph}$	<b>Volumen de la demanda</b> de sangre tipo $p$ en el hospital $h$ durante el período $t$ .	Bolsas
$DMt_{pk}$	<b>Volumen de la demanda</b> de sangre tipo $p$ en la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	Bolsas
$PAt_{pr}$	<b>Capacidad de producción</b> de sangre tipo $p$ en el Banco Regional de Sangre (RBB) $r$ durante el período $t$ .	Bolsas
$SC_{pr}$	<b>Capacidad de almacenamiento</b> de sangre tipo $p$ en el RBB $r$ .	Bolsas
$SC_{ph}$	<b>Capacidad de almacenamiento</b> de sangre tipo $p$ en el hospital $h$ .	Bolsas
$SC_{pk}$	<b>Capacidad de almacenamiento</b> de sangre tipo $p$ en la instalación de atención médica $k$ .	Bolsas
$\alpha$	<b>Vida útil</b> de los glóbulos rojos (red blood cells).	Días

## Parámetros Financieros (Costos Fijos, Precios y Costos Operativos)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$SPtprh$	<b>Precio de venta</b> de la sangre tipo $p$ en el RBB $r$ vendida al hospital $h$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$SPtprk$	<b>Precio de venta</b> de la sangre tipo $p$ en el RBB $r$ vendida a la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$FCi$	<b>Costo fijo</b> por abrir una Unidad Móvil de Sangre (BM) en la ubicación $i$ .	IDR
$FCj$	<b>Costo fijo</b> por abrir un Centro Local de Donación de Sangre (LBDC) en la ubicación $j$ .	IDR
$OCtpr$	<b>Costo de producción</b> de sangre tipo $p$ en el RBB $r$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$EC$	<b>Costo de la emisión de carbono.</b>	IDR/kg.CO2e

### Parámetros de Costos de Adquisición (Procurement)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$PC_{tpir}$	<b>Costo de adquisición</b> para la sangre tipo $p$ de la BM $i$ para el RBB $r$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$PC_{tpjr}$	<b>Costo de adquisición</b> para la sangre tipo $p$ del LBDC $j$ para el RBB $r$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$PC_{tpjh}$	<b>Costo de adquisición</b> para la sangre tipo $p$ del LBDC $j$ para el hospital $h$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$PC_{tpjk}$	<b>Costo de adquisición</b> para la sangre tipo $p$ del LBDC $j$ para la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa

## Parámetros de Costos de Inventario y Desecho

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$ICtpr$	<b>Costo de inventario</b> para la sangre tipo $p$ almacenada en el RBB $r$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$ICtph$	<b>Costo de inventario</b> para la sangre tipo $p$ almacenada en el hospital $h$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$ICtpk$	<b>Costo de inventario</b> para la sangre tipo $p$ almacenada en la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$WCtpr$	<b>Costo por obsolescencia</b> (outdated cost) para el desecho de sangre tipo $p$ en el RBB $r$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$WCtph$	<b>Costo por obsolescencia</b> para el desecho de sangre tipo $p$ en el hospital $h$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa
$WCtpk$	<b>Costo por obsolescencia</b> para el desecho de sangre tipo $p$ en la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	IDR/bolsa

### Parámetros de Costos de Logística (Costo de Transporte por Unidad/Distancia)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$XCtpir$	<b>Costo logístico</b> de sangre tipo $p$ desde BM $i$ hasta RBB $r$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa
$XCtpjr$	<b>Costo logístico</b> de sangre tipo $p$ desde LBDC $j$ hasta RBB $r$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa
$XCtpjh$	<b>Costo logístico</b> de sangre tipo $p$ desde LBDC $j$ hasta hospital $h$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa
$XCtprr'$	<b>Costo logístico de transbordo</b> de sangre tipo $p$ desde RBB $r$ hasta RBB $r'$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa
$XCtpru$	<b>Costo logístico</b> de desecho de sangre tipo $p$ desde RBB $r$ hasta BWDF $u$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa
$XCtphu$	<b>Costo logístico</b> de desecho de sangre tipo $p$ desde hospital $h$ hasta BWDF $u$ durante $t$ .	IDR/km/bolsa

## Parámetros de Distancia

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$dir$	Distancia desde BM $i$ hasta RBB $r$ .	km
$djr$	Distancia desde LBDC $j$ hasta RBB $r$ .	km
$drh$	Distancia desde RBB $r$ hasta hospital $h$ .	km
$drr'$	Distancia entre RBB $r$ y RBB $r'$ (para transbordo).	km
$dru$	Distancia desde RBB $r$ hasta BWDF $u$ .	km

### Parámetros de Emisiones de Carbono (Tasa de Emisión por Actividad)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$EPtpr$	Tasa de emisión de producción de sangre tipo $p$ en RBB $r$ durante $t$ .	kg.CO2e/bolsa
$EItpr$	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo $p$ en RBB $r$ durante $t$ .	kg.CO2e/bolsa
$EItph$	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo $p$ en hospital $h$ durante $t$ .	kg.CO2e/bolsa
$EItpk$	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo $p$ en instalación $k$ durante $t$ .	kg.CO2e/bolsa
$EXtpir$	Tasa de emisión de transporte de sangre tipo $p$ desde BM $i$ hasta RBB $r$ durante $t$ .	kg.CO2e/km/bolsa
$EXtprr'$	Tasa de emisión de transbordo de sangre tipo $p$ desde RBB $r$ hasta RBB $r'$ durante $t$ .	kg.CO2e/km/bolsa
$CAPt$	Límite de carbono (Carbon cap) para el período $t$ .	kg.CO2e

## **coeficiente clave en las funciones objetivo**

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades y Fuentes</b>
$\rho$	Coeficiente de ponderación utilizado para calcular la Tasa Total de Satisfacción, priorizando la demanda de hospitales (TSH) sobre la demanda de las instalaciones de atención médica (TSK).	Coeficiente (porcentaje)

**En el caso de estudio, se estableció que  $\rho=80\%$**

## Variables de Decisión (Decision Variables)

### Variables Continuas (Flujo, Producción, Inventario y Desecho)

Símbolo	Descripción	Unidades
$PRtpr$	Cantidad de sangre tipo $p$ producida en el Banco Regional de Sangre (RBB) $r$ durante el período $t$ .	Bolsas
$IRtpr$	Nivel de inventario de sangre tipo $p$ almacenada en el RBB $r$ durante el período $t$ .	Bolsas
$IHtph$	Nivel de inventario de sangre tipo $p$ almacenada en el hospital $h$ durante el período $t$ .	Bolsas
$IHtpk$	Nivel de inventario de sangre tipo $p$ almacenada en la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	Bolsas
$WOtpr$	Volumen de sangre obsoleta (outdated blood) tipo $p$ en el RBB $r$ durante el período $t$ .	Bolsas
$WOtph$	Volumen de sangre obsoleta tipo $p$ en el hospital $h$ durante el período $t$ .	Bolsas
$WOtpk$	Volumen de sangre obsoleta tipo $p$ en la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	Bolsas

### Variables de Flujo de Distribución (XD<sub>t</sub> - Distribución y Transbordo)

Símbolo	Descripción	Unidades
$XD_{tpir}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde la Unidad Móvil de Sangre (BM) $i$ al RBB $r$ en el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tpjr}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde el Centro Local de Donación de Sangre (LBDC) $j$ al RBB $r$ durante el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tpjh}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde el LBDC $j$ al hospital $h$ durante el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tpjk}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde el LBDC $j$ a la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tprh}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde el RBB $r$ al hospital $h$ durante el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tprk}$	Volumen de sangre tipo $p$ distribuido desde el RBB $r$ a la instalación de atención médica $k$ durante el período $t$ .	Bolsas
$XD_{prr'}$	Volumen de transbordo de sangre tipo $p$ distribuido desde el RBB $r$ a otro RBB $r'$ durante el período $t$ .	Bolsas

### Variables de Flujo de Desecho (XD<sub>t</sub> - Desecho)

Símbolo	Descripción	Unidades
$XD_{tpru}$	Volumen de desecho de sangre $p$ enviado desde el RBB $r$ a la Instalación de Eliminación de Residuos de Sangre (BWDF) $u$ en el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tphu}$	Volumen de desecho de sangre $p$ enviado desde el hospital $h$ a la BWDF $u$ en el período $t$ .	Bolsas
$XD_{tpku}$	Volumen de desecho de sangre tipo $p$ enviado desde la instalación de atención médica $k$ a la BWDF $u$ en el período $t$ .	Bolsas

### Variables Binarias (Asignación y Operación de Instalaciones)

Estas variables determinan la configuración de la red en cada período de tiempo.

Símbolo	Descripción
$y_{ti}$	Variable binaria que indica si la Unidad Móvil de Sangre (BM) $i$ está asignada en el período $t$ ; es igual a 1 si está asignada, y 0 en caso contrario.
$y_{tj}$	Variable binaria que indica si el Centro Local de Donación de Sangre (LBDC) $j$ está asignado en el período $t$ ; es igual a 1 si está asignado, y 0 en caso contrario.
$y_{tr}$	Variable binaria que indica si el Banco Regional de Sangre (RBB) $r$ está operando en el período $t$ ; es igual a 1 si está operando, y 0 en caso contrario.

## Función Objetiva

Este modelo MILP para la Cadena de Suministro de Sangre es multi-objetivo y busca equilibrar tres metas:

1. Maximizar el beneficio total
2. Maximizar la tasa de cumplimiento del servicio
3. Minimizar las emisiones totales de carbono

**Primer objetivo: Maximizar el Beneficio Total (MaxTP)**

El beneficio se calcula como:

$$\text{MaxTP} = TR - (TC1 + TC2 + TC3 + TC4 + TC5 + TC6 + TC7)$$

Donde:

**Ingresos (TR):**

Suma de todas las ventas desde los bancos regionales (RBB) a:

- hospitales (h)
- centros de salud (k)

$$TR = \sum_{p,r,h,t} (SP_{prh} \cdot XD_{prh}) + \sum_{p,r,k,t} (SP_{prk} \cdot XD_{prk})$$

**Costos (TC1 a TC7):**

- TC1: costos fijos de operación de BM y LBDC
- TC2: costos de adquisición desde BM y LBDC
- TC3: costo de producción en los RBB
- TC4: costo de inventario en RBB, hospitales y centros
- TC5: costo por sangre vencida (desperdicio)

- TC6: costo de transporte y transbordo
- TC7: costo por emisiones de carbono

*(Todo expresado como sumas del tipo costo × cantidad × distancia cuando aplica.)*

## 2. Segundo objetivo: Maximizar el Nivel de Servicio (MaxTLS)

*El servicio mide cuánta demanda se satisface.*

$$\mathbf{MaxTLS} = TSH + TSK$$

*TSH: cumplimiento de hospitales*

$$TSH = \rho \sum_{p,j,h,t} \frac{XD_{pjh} + XD_{prh}}{DM_{ph}}$$

*TSK: cumplimiento de centros de salud*

$$TSK = (1 - \rho) \sum_{p,j,k,t} \frac{XD_{pjk} + XD_{prk}}{DM_{pk}}$$

## 3. Tercer objetivo: Minimizar las Emisiones Totales (MinTE)

$$\mathbf{MinTE} = TEP + TES + TED$$

*Emisiones de producción (TEP):*

$$TEP = \sum_{p,r,t} EP_{pr} \cdot PR_{pr}$$

*Emisiones de almacenamiento (TES):*

$$TES = \sum_{p,r,t} EI_{pr} \cdot IR_{pr} + \sum_{p,h,t} EI_{ph} \cdot IH_{ph} + \sum_{p,k,t} EI_{pk} \cdot IK_{pk}$$

*Emisiones del transporte (TED):*

*Suma de todos los flujos × distancia × factor de emisión.*

#### **4. Función objetivo combinada (Weighted Sum Method)**

*Los tres objetivos se normalizan y se combinan así:*

$$\text{Max } Z = w_1 \left( \frac{\hat{Z}_{Pro}}{Z_{Pro}} \right) + w_2 \left( \frac{T\hat{L}S}{TLS} \right) - w_3 \left( \frac{\hat{TE}}{TE} \right)$$

*Donde:*

- *w1, w2, w3 son los pesos (suman 1)*
- *ZPro, TLS, TE son valores iniciales normalizados del caso base*
- *ZPro, TLS, TE son los valores reales (óptimos) de beneficio, tasa de servicio y emisiones usados para la normalización.*

*Para el estudio real:*

$$w1=0.5, \quad w2=0.3, \quad w3=0.2$$

#### **1. Restricciones de Balance de Inventario y Flujo**

*Garantizan que el flujo de sangre se conserve en toda la red.*

### **(1.1) Balance en Bancos Regionales (RBB)**

Para cada tipo  $p$ , banco  $r$  y periodo  $t$ :

$$IR_{t-1,p,r} + \sum_i XD_{t,p,i,r} + \sum_j XD_{t,p,j,r} = IR_{t,p,r} + \sum_h XD_{t,p,r,h} + \sum_k XD_{t,p,r,k} + \sum_{r' \neq r} XD_{t,p,r,r'}$$

**Interpretación:**

*Inventario previo + sangre recibida = inventario actual + sangre enviada a hospitales/centros + transbordos.*

### **Balance en Hospitales**

$$IH_{t-1,p,h} + \sum_j XD_{t,p,j,h} + \sum_r XD_{t,p,r,h} = IH_{t,p,h} + DM_{t,p,h}$$

### **Balance en Centros de Salud**

$$IK_{t-1,p,k} + \sum_j XD_{t,p,j,k} + \sum_r XD_{t,p,r,k} = IK_{t,p,k} + DM_{t,p,k}$$

## **2. Restricciones de Producción y Capacidad**

### **Definición de la producción en el RBB**

$$PR_{t,p,r} = \sum_i XD_{t,p,i,r} + \sum_j XD_{t,p,j,r}$$

**Interpretación:** todo lo que entra al banco equivale a lo producido.

## **Capacidad máxima del RBB**

$$\sum_p PR_{t,p,r} \leq y_{t,r} \cdot \sum_p PA_{t,p,r}$$

**Interpretación:** el banco solo produce si está operativo.

## **3. Restricciones de Capacidad de Inventario**

### **Inventario máximo en RBB**

$$IR_{t,p,r} \leq SC_{t,p,r}$$

### **Inventario máximo en Hospitales**

$$IH_{t,p,h} \leq SC_{t,p,h}$$

### **Inventario máximo en Centros de Salud**

$$IK_{t,p,k} \leq SC_{t,p,k}$$

## **4. Restricciones de Desecho y Vida Útil (FIFO)**

### **Cálculo del desecho en RBB**

$$WO_{t,p,r} = \sum_u XD_{t,p,r,u}$$

### Cálculo del desecho en Hospitales

$$WO_{t,p,h} = \sum_u XD_{t,p,h,u}$$

### Cálculo del desecho en Centros

$$WO_{t,p,k} = \sum_u XD_{t,p,k,u}$$

### FIFO – Vida útil ( $\alpha$ )

$$WO_{t,p,r} \geq IR_{t-\alpha,p,r} - (\text{uso desde } t-\alpha \text{ hasta } t)$$

**Interpretación:** solo se desecha sangre que supera la vida útil.

## 5. Restricciones de Asignación / Operación

Garantizan que las instalaciones solo funcionen si están “activas”.

### Activación de Unidades Móviles (BM)

$$\sum_t y_{t,i} \geq 1 \quad \forall i$$

### Activación de Centros Locales (LBDC)

$$\sum_t y_{t,j} \geq 1$$

### **Activación de Bancos Regionales (RBB)**

$$\sum_t y_{t,r} \geq 1$$

**Interpretación:** cada instalación debe estar operativa al menos un periodo.

### **6. Restricción Ambiental (Límite de Carbono)**

$$TEP_t + TES_t + TED_t \leq CAP_t$$

**Interpretación:** la cadena no puede emitir más carbono que el límite permitido.

### **7. Dominio de Variables**

#### **Flujo, producción, inventario, desecho**

$$XD_{t,p,\cdot} \geq 0, \quad PR_{t,p,r} \geq 0, \quad IR_{t,p,r} \geq 0, \quad IH_{t,p,h} \geq 0, \quad IK_{t,p,k} \geq 0, \quad WO_{t,p,\cdot} \geq 0$$

#### **(7.2) Variables binarias**

$$y_{t,i}, y_{t,j}, y_{t,r} \in \{0, 1\}$$

