

Modelos

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

Los parámetros

Parámetros de Demanda, Capacidad y Productos

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
DM_{ph}	Volumen de la demanda de sangre tipo p en el hospital h durante el período t .	Bolsas
DM_{pk}	Volumen de la demanda de sangre tipo p en la instalación de atención médica k durante el período t .	Bolsas
PA_{pr}	La capacidad de producción de sangre tipo p en el Banco Regional de Sangre (RBB) r durante el período t .	Bolsas
SC_{pr}	Capacidad de almacenamiento de sangre tipo p en el RBB r .	Bolsas
SC_{ph}	Capacidad de almacenamiento de sangre tipo p en el hospital h .	Bolsas
SC_{pk}	Capacidad de almacenamiento de sangre tipo p en la instalación de atención médica k .	Bolsas
α	Vida útil de los glóbulos rojos (red blood cells).	Días

Parámetros Financieros (Costos Fijos, Precios y Costos Operativos)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
SP_{tprh}	Precio de venta de la sangre tipo p en el RBB r vendida al hospital h durante el período t .	IDR/bolsa
SP_{tprk}	Precio de venta de la sangre tipo p en el RBB r vendida a la instalación de atención médica k durante el período t .	IDR/bolsa
FC_i	Costo fijo por abrir una Unidad Móvil de Sangre (BM) en la ubicación i .	IDR
FC_j	Costo fijo por abrir un Centro Local de Donación de Sangre (LBDC) en la ubicación j .	IDR
OC_{tpr}	Costo de producción de sangre tipo p en el RBB r durante el período t .	IDR/bolsa
EC	Costo de la emisión de carbono.	IDR/kg.CO ₂ e

Parámetros de Costos de Adquisición (Procurement)

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
$PCtpir$	Costo de adquisición para la sangre tipo p de la BM i para el RBB r durante el período t .	IDR/bolsa
$PCtpjr$	Costo de adquisición para la sangre tipo p del LBDC j para el RBB r durante el período t .	IDR/bolsa
$PCtpjh$	Costo de adquisición para la sangre tipo p del LBDC j para el hospital h durante el período t .	IDR/bolsa
$PCtpjk$	Costo de adquisición 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
IC_{tpr}	Costo de inventario para la sangre tipo p almacenada en el RBB r durante el período t .	IDR/bolsa
IC_{tph}	Costo de inventario para la sangre tipo p almacenada en el hospital h durante el período t .	IDR/bolsa
IC_{tpk}	Costo de inventario para la sangre tipo p almacenada en la instalación de atención médica k durante el período t .	IDR/bolsa
WC_{tpr}	Costo por obsolescencia (outdated cost) para el desecho de sangre tipo p en el RBB r durante el período t .	IDR/bolsa
WC_{tph}	Costo por obsolescencia para el desecho de sangre tipo p en el hospital h durante el período t .	IDR/bolsa
WC_{tpk}	Costo por obsolescencia 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
$XCtpir$	Costo logístico de sangre tipo p desde BM i hasta RBB r durante t .	IDR/km/bolsa
$XCtpjr$	Costo logístico de sangre tipo p desde LBDC j hasta RBB r durante t .	IDR/km/bolsa
$XCtpjh$	Costo logístico de sangre tipo p desde LBDC j hasta hospital h durante t .	IDR/km/bolsa
$XCtprr'$	Costo logístico de transbordo de sangre tipo p desde RBB r hasta RBB r' durante t .	IDR/km/bolsa
$XCtpru$	Costo logístico de desecho de sangre tipo p desde RBB r hasta BWDF u durante t .	IDR/km/bolsa
$XCtphu$	Costo logístico 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
EP_{tpr}	Tasa de emisión de producción de sangre tipo p en RBB r durante t .	kg.CO2e/bolsa
El_{tpr}	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo p en RBB r durante t .	kg.CO2e/bolsa
El_{tph}	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo p en hospital h durante t .	kg.CO2e/bolsa
El_{tpk}	Tasa de emisión de almacenamiento de sangre tipo p en instalación k durante t .	kg.CO2e/bolsa
EX_{tpir}	Tasa de emisión de transporte de sangre tipo p desde BM i hasta RBB r durante t .	kg.CO2e/km/bolsa
$EX_{tpr r'}$	Tasa de emisión de transbordo de sangre tipo p desde RBB r hasta RBB r' durante t .	kg.CO2e/km/bolsa
CAP_t	Límite de carbono (Carbon cap) para el período t .	kg.CO2e

coeficiente clave en las funciones objetivo

Símbolo	Descripción	Unidades y Fuentes
ρ	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 (XDt - Distribución y Transbordo)

Símbolo	Descripción	Unidades
$XDtpir$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde la Unidad Móvil de Sangre (BM) i al RBB r en el período t .	Bolsas
$XDtpjr$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde el Centro Local de Donación de Sangre (LBDC) j al RBB r durante el período t .	Bolsas
$XDtpjh$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde el LBDC j al hospital h durante el período t .	Bolsas
$XDtpjk$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde el LBDC j a la instalación de atención médica k durante el período t .	Bolsas
$XDtp rh$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde el RBB r al hospital h durante el período t .	Bolsas
$XDtp rk$	Volumen de sangre tipo p distribuido desde el RBB r a la instalación de atención médica k durante el período t .	Bolsas
$XDtp rr'$	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 (XDt - Desecho)

Símbolo	Descripción	Unidades
$XDtp_{ru}$	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
$XDtp_{hu}$	Volumen de desecho de sangre p enviado desde el hospital h a la BWDF u en el período t .	Bolsas
$XDtp_{ku}$	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 \times cantidad \times 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 \times distancia \times factor de emisión.

4. Función objetivo combinada (Weighted Sum Method)

Los tres objetivos se normalizan y se combinan así:

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

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 (α)

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

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

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

