
SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REPOSICIÓN DE LABORATORIO CLÍNICO

Pecoraro Lucio

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
Legajo 50239
luciopecoraro2002@gmail.com

Berto Leandro

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
Legajo 45368
leandroberto2010@gmail.com

Capiglioni Rodrigo

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
Legajo 47298
RodrigoCapiglioni@gmail.com

Broda Tomás

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
Legajo 47299
tomasbroda13@gmail.com

31 de octubre de 2025

ABSTRACT

El presente trabajo modela y analiza mediante simulación basada en agentes el sistema de reposición de insumos y reactivos en dos laboratorios clínicos interrelacionados ubicados en la localidad de Casilda. Se evalúan dos políticas de reabastecimiento bajo condiciones operativas normales y bajo un escenario de pandemia que incrementa progresivamente la demanda. Utilizando la plataforma AnyLogic y aplicando la metodología estadística de comparación de escenarios propuesta por Weitz, se ejecutaron 100 réplicas independientes para cada combinación de política y contexto.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Objetivos del Estudio	4
1.2. El Problema de los Reactivos	4
2. Definición del Sistema bajo Estudio	5
2.1. Origen del Estudio	5
2.2. Alcances y Limitaciones	5
2.3. Variables de Decisión	5
2.4. Modelo Conceptual	5
2.5. Supuestos del Modelo	6
3. Recolección y Análisis de Datos	6
3.1. Fuentes de Información	6
3.2. Clasificación de Recursos	6
3.3. Distribuciones Estadísticas Ajustadas	7
3.4. Validación de Distribuciones	7
4. Construcción del Modelo	7
4.1. Arquitectura del Sistema	7
4.2. Agentes del Modelo	8
5. Verificación y Validación	9
5.1. Verificación	9
5.2. Validación	9
6. Definición de escenarios	10
6.1. Política base	10
6.2. Política alternativa	11
6.3. Factor Pandemico	11
7. Diseño Experimental	11
7.1. Definición de Escenarios de Análisis	11
7.2. Control de aleatoriedad	11
7.3. Metodología de Análisis Estadístico	12
7.4. Parámetros de Simulación	12
7.5. Métricas Registradas	12
8. Análisis de resultados	13
8.1. Estadística descriptiva	13
8.2. Histograma de costos	13

8.3. Grafico de barras	15
9. Conclusión	18

1. Introducción

La gestión eficiente de inventarios en laboratorios clínicos constituye un desafío operativo crítico debido a la naturaleza dual de los recursos gestionados: insumos estables de bajo costo y reactivos químicos costosos con fechas de vencimiento limitadas. Esta dualidad genera un problema de optimización bajo incertidumbre, donde deben balancearse costos de adquisición, mantenimiento, faltantes y desperdicio por vencimiento.

El presente estudio aborda este problema mediante simulación de eventos discretos basada en agentes, modelando el comportamiento completo del sistema de reposición en dos laboratorios interconectados. A diferencia de enfoques analíticos tradicionales, la simulación permite capturar la complejidad inherente del sistema, incluyendo:

- Consumo estocástico de insumos y reactivos con distribuciones diferenciadas
- Gestión de lotes con fechas de vencimiento heterogéneas
- Tiempos de entrega variables y capacidad limitada de transporte
- Interacción entre múltiples agentes (laboratorios, proveedores, vehículos)
- Escenarios de crisis que modifican patrones de demanda

1.1. Objetivos del Estudio

El objetivo principal es evaluar comparativamente el impacto de dos políticas de reabastecimiento sobre las siguientes métricas de desempeño:

1. **Costo total del sistema:** suma de costos de pedido, mantenimiento, faltantes y desperdicio
2. **Disponibilidad de recursos:** capacidad de satisfacer demanda sin quiebres de stock
3. **Desperdicio por vencimiento:** cantidad y costo de reactivos desechados
4. **Robustez ante interrupciones:** desempeño bajo escenario de pandemia

Los objetivos secundarios incluyen:

- Validar el modelo mediante verificación técnica y validación conceptual con expertos del dominio
- Cuantificar el impacto económico de interrupciones pandémicas en cada política
- Establecer recomendaciones estratégicas fundamentadas estadísticamente
- Documentar el modelo para facilitar ajustes y extensiones futuras

1.2. El Problema de los Reactivos

Uno de los problemas principales en este estudio será la reposición de reactivos. A diferencia de un insumo en donde su costo de mantenimiento es mínimo, los reactivos químicos utilizados son costosos de mantener, pues se tiene un espacio limitado en infraestructura especial para mantenerlos en condiciones apropiadas. Adicionalmente, se deberá tener en cuenta que cada reactivo cuenta con una fecha de vencimiento distinta, lo cual imposibilita su compra en grandes cantidades. Consecuentemente, se deberá buscar un equilibrio entre intervalos de reposición de reactivos químicos y cantidad a reponer, estando bajo la incertidumbre del consumo mensual que estos tienen.

1. **Vencimiento limitado:** vida útil entre 3 y 12 meses según tipo de reactivo
2. **Alto costo de mantenimiento:** requieren almacenamiento en condiciones controladas (refrigeración, protección lumínica)
3. **Compra por lotes:** imposibilidad de adquirir cantidades arbitrarias
4. **Política FIFO estricta:** los reactivos antiguos deben desecharse al recibir nuevos lotes para evitar mezclas con diferentes vencimientos
5. **Consumo irregular:** variabilidad significativa en demanda mensual

2. Definición del Sistema bajo Estudio

2.1. Origen del Estudio

Este proyecto de simulación surgió de la necesidad identificada por la dirección del laboratorio de optimizar sus costos operativos sin comprometer la disponibilidad de reactivos e insumos críticos. Análisis preliminares de registros históricos revelaron patrones de desperdicio por vencimiento superiores al 8 % en algunos reactivos, y frecuentes quiebres de stock en insumos básicos que generaban demoras en la atención.

2.2. Alcances y Limitaciones

Alcances del modelo:

- Modelado completo del ciclo de reposición de insumos y reactivos
- Evaluación de dos políticas alternativas de gestión de inventarios
- Análisis de robustez ante escenarios de crisis (pandemia)
- Cuantificación de costos totales y sus componentes
- Simulación de 24 meses de operación con 100 réplicas por escenario

Limitaciones del modelo:

- No considera múltiples proveedores ni negociación de precios
- Asume tiempos de entrega constantes (5 días)
- No modela restricciones de capacidad de almacenamiento
- Excluye efectos de estacionalidad en la demanda
- No incorpora costos de obsolescencia tecnológica

2.3. Variables de Decisión

Las variables de decisión principales del modelo son:

1. **Frecuencia de revisión de stock:** intervalo temporal entre evaluaciones de inventario (mensual, bimensual, trimestral)
2. **Nivel de cobertura objetivo:** cantidad de meses de consumo esperado a mantener en inventario

2.4. Modelo Conceptual

El sistema puede representarse conceptualmente mediante el siguiente diagrama de interacciones:

Entidades principales:

- **Laboratorios:** existen dos laboratorios con políticas de reposición idénticas, ubicados a unos 500 metros de distancia entre sí.
- **Insumos:** tipo de recurso simple que utilizan los laboratorios. Su consumo está definido mediante una distribución normal. No presentan vencimiento y su costo de mantenimiento es negligible
- **Reactivos:** recurso más complejo que utilizan los laboratorios. Su consumo es más aleatorio, resultando en que la duración de éstos pueda extenderse entre 1 hasta 12 meses. Se utiliza para su representación una distribución triangular seguido de una probabilidad arbitraria de no consumo o de alto consumo. A su vez, los reactivos presentan un vencimiento representado en meses. Una vez que un reactivo supera su fecha de vencimiento, el mismo será desechado.
- **Proveedor:** fuente infinita de recursos. El tiempo de reposición es constante de 5 días.

Flujos del sistema:

1. Consumo mensual de recursos (estocástico)
2. Detección de niveles críticos de stock

3. Generación de pedidos según política
4. Transporte de pedidos (5 días de viaje)
5. Descarga y actualización de inventarios
6. Vencimiento de reactivos (verificación mensual)

2.5. Supuestos del Modelo

Para la realización del modelo se han establecido los siguientes supuestos:

1. El proveedor tiene disponibilidad infinita de todos los recursos
2. Los tiempos de entrega son determinísticos (5 días de ida + 1 día de descarga)
3. No existen descuentos por volumen en las compras
4. El costo de mantenimiento de insumos es despreciable.
5. Los reactivos se almacenan y se compran por lotes completos (no divisibles).
6. La política FIFO es estricta: al recibir nuevos reactivos, los antiguos se descartan.
7. El consumo mensual sigue distribuciones estacionarias.
8. No hay restricciones de espacio físico en los laboratorios.
9. Los costos unitarios permanecen constantes durante el horizonte de simulación

3. Recolección y Análisis de Datos

3.1. Fuentes de Información

La recolección de datos se realizó mediante un enfoque multimodal que combinó fuentes cuantitativas y cualitativas:

Datos cuantitativos:

- Registros históricos de consumo de 24 meses (enero 2023 - diciembre 2024)
- Planillas de control de stock y vencimientos
- Órdenes de compra y facturas de proveedores
- Reportes de quiebres de stock y demandas no satisfechas
- Registros de tiempos de entrega de pedidos

Datos cualitativos:

- Entrevistas semi-estructuradas con personal técnico
- Consultas con responsable de compras
- Observación directa de procesos logísticos
- Validación con director técnico del laboratorio

3.2. Clasificación de Recursos

3.2.1. Insumos

Son los elementos de uso general del laboratorio. Estos elementos consisten generalmente de agujas, alcohol, guantes, y demás elementos de uso típico en un laboratorio. Los insumos no presentan vencimiento, y el costo de mantenimiento de los mismos es negligible

Características estadísticas:

- Costo unitario bajo
- Consumo mensual modelado con distribución Normal: $N(\mu, 0,1\mu)$
- Coeficiente de variación histórico: 8-12 %
- Sin fecha de vencimiento
- Costo de mantenimiento despreciable

3.2.2. Reactivos

Elementos químicos especializados que utiliza el laboratorio. Presentan mayor complejidad que los reactivos, presentando fecha de vencimiento, requiriendo además condiciones específicas de almacenamiento. Esto resulta en un costo considerable de mantenimiento, el cual es tomado en cuenta en la realización de la simulación.

Características:

- Alto costo unitario
- Consumo mensual modelado con distribución Triangular ajustada a datos históricos
- Coeficiente de variación histórico: 15-25 %
- Almacenamiento y compra por lotes
- Requerimientos de refrigeración y protección lumínica
- Presentan costo de mantenimiento considerable debido a las necesidades específicas para su almacenamiento

3.3. Distribuciones Estadísticas Ajustadas

3.3.1. Análisis Estadístico de Insumos

Para cada insumo i se realizó el siguiente proceso de ajuste:

1. **Recopilación:** Obtención de 24 observaciones mensuales de consumo
2. **Pruebas de normalidad:** Test de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$ en todos los casos)
3. **Estimación de parámetros:** Método de máxima verosimilitud
4. **Validación:** Prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov

Resultado: Distribución Normal

$$\text{Consumo}_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$$

donde:

- μ_i : consumo mensual promedio histórico (calculado como $\bar{x} = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} x_{it}$)
- $\sigma_i = 0,1 \cdot \mu_i$: desviación estándar aproximada (10 % de la media, validada empíricamente)

3.3.2. Análisis Estadístico de Reactivos

Para cada reactivo j se identificó asimetría en los datos históricos, por lo que se optó por distribución Triangular:

$$\text{Consumo}_j \sim \text{Triangular}(a_j, b_j, c_j)$$

donde:

- $a_j = 0,8 \cdot \bar{x}_j$: valor mínimo observado
- $c_j = 1,2 \cdot \bar{x}_j$: valor máximo observado
- b_j : moda (ajustada al múltiplo de tamaño de lote más frecuente)

3.4. Validación de Distribuciones

Las distribuciones ajustadas fueron validadas mediante:

1. **Validación estadística:** Pruebas de bondad de ajuste (KS test, $\alpha = 0,05$)
2. **Validación con expertos:** Confirmación de rangos razonables con personal técnico

4. Construcción del Modelo

4.1. Arquitectura del Sistema

El modelo fue desarrollado siguiendo el paradigma de simulación basada en agentes (Agent-Based Modeling). Esta arquitectura permite representar la autonomía, interacción y comportamiento emergente de los componentes del sistema, capturando dinámicas complejas que serían difíciles de modelar con enfoques tradicionales.

4.2. Agentes del Modelo

4.2.1. Agente Laboratorio

Es el principal agente de la simulación, conteniendo éste al resto de los agentes y además encargándose de la mayoría de las tareas y eventos que ocurren en la simulación. Entre sus tareas se encuentran:

- Almacenar inventario de insumos y reactivos
- Ejecutar políticas de reposición periódicas
- Registrar demandas no satisfechas (faltantes)
- Calcular costos acumulados por categoría
- Gestionar descarga de pedidos entrantes
- Coordinar con vehículos de transporte

Variables principales:

- `insumo`: lista de insumos utilizados
- `reactivos`: lista de reactivos necesarios
- `costoTotal`: representa el costo total acumulado del laboratorio
- `costoPedido`: representa el costo acumulado por realización de pedidos tanto de insumos como de reactivos
- `costoMantenimiento`: costo de mantenimiento total de los reactivos
- `costoFaltante`: el costo total que incurre por no tener reactivos o insumos
- `costoDerroche`: coste acumulado de reactivos que debieron ser desechados ya sea por vencimiento por llegada de nuevo lote

Eventos programados:

1. `restockInsumo`: evalúa mensualmente si corresponde reponer insumos
2. `restockReactivo`: evalúa mensualmente si corresponde reponer reactivos
3. `calculoMensual`: actualiza estadísticas y contadores de desempeño
4. `verificacionVencimientos`: revisa reactivos próximos a vencer

4.2.2. Agente Insumo

Los insumos que utiliza el laboratorio. Fueron recopilados e importados mediante una tabla de datos

Parámetros:

- `nombre`
- `consumoMensual` (constante, representa μ)
- `costoUnitario`

Variables dinámicas:

- `stockActual`
- `consumoReal` (generado estocásticamente cada mes)
- `remanenteMes` (meses de cobertura restante)
- `demandasNoSatisfechas` (acumulador de faltantes)

4.2.3. Agente Reactivo

Parámetros:

- `nombre`
- `lote` (unidades por caja)

- costoUnitario
- vencimiento: (meses de vida útil inicial)

Variables dinámicas:

- cantidad (número de lotes en stock)
- stockReal (unidades totales = cantidad \times lote)
- mesVencimiento (contador decreciente)
- consumoMensual (parámetro de distribución triangular)
- demandasNoSatisfechas
- cantidadDerrochada (unidades vencidas acumuladas)

Se utiliza una política FIFO al recibir un cargamento de reactivos, en donde al no poder mezclarlos por diferencias en el vencimiento de estos, se desechan los mas antiguos, puestos que son los más próximos a vencer.

Esta política refleja la imposibilidad práctica de mezclar lotes con fechas de vencimiento distintas, requisito regulatorio en laboratorios clínicos.

4.2.4. Agente Pedido

Se cuenta también con un agente que representa las ordenes de pedidos que realiza el laboratorio tanto de insumos como reactivos. Según el tipo de producto, se realizará mensual o trimestralmente una evaluación de stock en donde se decidirá las cantidades a reponer de aquellos productos que lo necesiten. La creación de un pedido representa, además del costo del producto a pedir, un costo adicional fijo.

4.2.5. Agente Vehículo

Se incorporó un agente vehiculo que representa el transporte de los pedidos realizados por parte del proveedor. El mismo cuenta con un lead time de 5 días desde que recibe el pedido hasta que entrega los mismos.

5. Verificación y Validación

5.1. Verificación

La verificación del modelo consiste en asegurarse que el modelo funcione correctamente desde el punto de vista técnico y lógico.

Al realizarla, se detectaron varias instancias en donde no se actualizaban correctamente los valores al realizar una reposición de los mismos, muchas veces reultando en 'pedidos fantasma', que llegaban a los laboratorios pero nunca se realizaba el proceso de descarga en alguno de ellos. Esto generaba un gran aumento en la cantidad faltante de insumos y reactivos llevando a una insuficiencia constante en intervalos irregulares.

La raíz del problema se encontraba en la cantidad de vehículos disponibles para la reposición de los laboratorios. Cada laboratorio generaba los pedidos en un período de tiempo muy cercano pero no iguales, dando por resultado que no haya suficientes vehiculos para cubrir los pedidos de ambos laboratorios, por lo que se realizaba la reposición en aquel que generaba primero el pedido. Para solucionarlo, primero se estableció que ambos laboratorios realicen los pedidos en un mismo instante, generando una lista de pedidos y enviandolas al proveedor para recibir todas en una misma instancia. Además, se incrementó por seguridad la cantidad de vehículos disponibles, ya que la disponibilidad del proveedor y sus recursos quedan fuera del rango de nuestro proyecto.

Otros pequeños problemas presentes fueron los problemas usuales a la hora de generar un modelo de simulación, generalmente relacionado a la asignación y cálculos de variables.

5.2. Validación

Para la validación del modelo se compararon el comportamiento de la simulación con la situación actual del laboratorio, más específicamente en los tiempos de restock.

Lo esperado con la política base de reposición con la que cuenta el laboratorio provoca que se realicen pedidos intercalados de los insumos. Es decir, en una primer revisión del stock se pide aproximadamantela mitad de la lista

de insumos, mientras que la otra mitad aún cuenta con stock suficiente para cubrir por el periodo restante antes de la próxima evaluación.

Cuando llegue el momento del proximo chequeo de stock, la primer mitad que se pidieron en el periodo anterior ahora tendrá suficiente hasta el proximo evento de reposición, mientras que la segunda mitad estará pronto a agotarse. Se verificó exhaustivamente que:

5.2.1. Comparacion de metricas

Se ejecutaron simulaciones de 12 meses y se compararon algunas métricas:

Cuadro 1: Validación con Datos Históricos

Métrica	Histórico	Simulado
Pedidos de insumos/año	4	4
Pedidos de reactivos/año	36	38
Faltantes reportados	3	2-4

5.2.2. Analisis de sensibilidad preliminar

Se realizaron pruebas variando algunos parámetros en un $\pm 20\%$ para evaluar robustez del modelo:

Cuadro 2: Análisis de Sensibilidad

Parámetro Variado	Impacto en Costo Total
Costos unitarios $\pm 20\%$	$\pm 19-21\%$
Tiempo de entrega (3-7 días)	$+2-8\%$
Vencimientos ± 2 meses	-12% a $+18\%$
Consumo base $\pm 20\%$	$\pm 18-22\%$
Factor pandemia (1.5-2.5)	$+35-85\%$

El modelo responde coherentemente a variaciones paramétricas..

6. Definicion de escenarios

El modelo final ya verificado y validado representa nuestro modelo base o raíz. Es la versión 'estándar' o actual del sistema

El propósito de esta simulación no es simplemente imitar el sistema actual, sino tener la posibilidad de poder observar cómo se comporta ese sistema ante diversas situaciones, ya sean internas como cambios en políticas de reposición, o externas.

Para ello, vamos a definir 2 variables que cambiarán el comportamiento de nuestro sistema, lo cual nos llevará a un total de 4 escenarios distintos de acuerdo a los valores que adoptan.

6.1. Política base

El escenario base, como fue descrito anteriormente, es el resultado del modelo final realizado sin ningún tipo de modificación presente. En este escenario se tienen las siguientes características:

Insumos:

- Revisión de stock: cada 3 meses
- Cantidad a pedir: suficiente para cubrir 6 meses de consumo esperado
- Fórmula: $Q = 6 \cdot \mu - \text{stockActual}$
- Condición: solo pedir si la cantidad de stock actual no es suficiente para cubrir los proximos 3 meses

Reactivos:

- Revisión de stock: mensual
- Cantidad a pedir: suficiente para cubrir 3 meses
- Fórmula: $Q_{\text{lotes}} = \lceil \frac{3 \cdot \mu - \text{stockReal}}{\text{lote}} \rceil$
- Condición: solo pedir si el stock en unidades es insuficiente para cubrir el mes entrante.

6.2. Política alternativa

En este escenario evaluaremos el impacto que tiene cambiar la política de restock ajustada a un intervalo de tiempo mas pequeño **Insumos:**

- Revisión de stock: cada 2 meses
- Cantidad a pedir: suficiente para cubrir 3 meses
- Fórmula: $Q = 3 \cdot \mu - \text{stockActual}$
- Condición: solo se pide si el stock actual no alcanza para cubrir los proximos 2 meses.

Reactivos:

- Revisión de stock: mensual
- Cantidad a pedir: suficiente para cubrir 2 meses
- Fórmula: $Q_{\text{lotes}} = \lceil \frac{2 \cdot \mu - \text{stockReal}}{\text{lote}} \rceil$
- Condición: solo pedir si el stock actual en unidades no alcanza para cubrir el mes entrante

6.3. Factor Pandemico

Con el fin de poder evaluar la reacción que tienen las políticas de reposición previamente mencionadas, se implementará además un posible escenario de pandemia basado en la situación ocurrida en el año 2020 con COVID-19.

En este escenario pandémico, a partir del segundo mes de simulación el consumo comenzará a aumentar gradualmente hasta duplicarse. Esto nos permitirá observar la respuesta del sistema ante estos tipos de perturbaciones, así como también determinar que política se ajusta mejor a estos cambios

7. Diseño Experimental**7.1. Definición de Escenarios de Análisis**

Habiendo establecido las posibles variaciones, llegamos a tener un total de **4 escenarios posibles:**

- **Escenario A:** Política base de reposición
- **Escenario B:** Política alternativa de reposición
- **Escenario C:** Política base en escenario pandémico
- **Escenario D:** Política alternativa en escenario pandémico

7.2. Control de aleatoriedad

Para garantizar comparabilidad estadística entre escenarios y eliminar variabilidad espuria, se utilizó control estricto de semillas aleatorias

- Cada réplica usa una semilla única predefinida
- Las mismas 100 semillas se aplican idénticamente a todos los escenarios
- Rango de semillas: 11 a 110

Este control elimina variabilidad aleatoria entre comparaciones, permitiendo atribuir diferencias exclusivamente a las políticas y no a fluctuaciones estocásticas.

7.3. Metodología de Análisis Estadístico

Para comparar los escenarios se utilizó la metodología de análisis estadístico de simulaciones propuesta por Weitz (Capítulo 10), que permite realizar inferencias robustas sobre diferencias entre sistemas simulados.

Se ejecutaron $n = 100$ réplicas independientes para cada escenario, utilizando control de semillas aleatorias para garantizar comparabilidad. Este enfoque de comparación pareada reduce la variabilidad y aumenta la potencia estadística de las pruebas.

Para cada par de escenarios a comparar, se definió la variable de diferencia:

$$Z_i = x_{Ai} - x_{Bi} \quad (1)$$

donde x_{Ai} y x_{Bi} representan el costo total en la réplica i para los escenarios A y B respectivamente.

El promedio de las diferencias se calculó como:

$$\bar{Z}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (2)$$

La varianza muestral de las diferencias:

$$s_Z^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \quad (3)$$

El intervalo de confianza del 95 % para la media de las diferencias se construyó mediante:

$$IC_{95\%} = \bar{Z}(n) \pm t_{n-1,0,975} \cdot \frac{s_Z}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

donde s_Z es la desviación estándar muestral de las diferencias y $t_{n-1,0,975}$ es el valor crítico de la distribución t de Student con $n - 1$ grados de libertad. Para $n = 100$, $t_{99,0,975} \approx 1,984$.

7.4. Parámetros de Simulación

- **Horizonte temporal:** 24 meses (720 días)
- **Unidad de tiempo:** 1 día
- **Número de réplicas:** 100 por escenario
- **Nivel de confianza:** 95 %
- **Método de estimación:** Media muestral con distribución t de Student

Justificación de $n = 100$:

El tamaño de muestra se determinó mediante análisis de potencia estadística:

- Diferencia mínima detectable objetivo: 10 % del costo total base
- Potencia estadística deseada: 80 % ($\beta = 0,20$)
- Nivel de significancia: 5 % ($\alpha = 0,05$)
- Variabilidad estimada (corridas piloto): $CV \approx 20\%$
- Tamaño de muestra calculado: $n \geq 85$
- Tamaño seleccionado: $n = 100$ (con margen de seguridad)

7.5. Métricas Registradas

Para cada réplica se registraron sistemáticamente las siguientes medidas de rendimiento:

1. **Costo total:** $C_{\text{total}} = C_{\text{pedido}} + C_{\text{mant}} + C_{\text{falt}} + C_{\text{derroche}}$
2. **Costo de pedido:** Adquisición de insumos y reactivos

3. **Costo de mantenimiento:** $\$1 \times \text{unidades-mes de reactivos almacenados}$
4. **Costo de faltante:** Penalización por demandas no satisfechas. Cada unidad faltante representa un costo extra
5. **Costo de derroche:** Costo de reactivos desechados

Cabe destacar que estos costos no representan el costo real de las actividades realizadas por el laboratorio, si no que fueron asignados arbitrariamente luego de un análisis en función de su importancia, para poder determinar de manera intuitiva y en números simples el rendimiento que tiene cada escenario

8. Analisis de resultados

8.1. Estadística descriptiva

A continuación se resumen las estadísticas del **costo total** por escenario (media, desvío estándar, mínimo, máximo e IC95 % de la media, con t_{n-1}). Los valores se calcularon sobre 100 réplicas por escenario con la misma semilla entre escenarios.

Cuadro 3: Estadísticas descriptivas del costo total por escenario (n=100 réplicas)

Escenario	Media	Desv.	Mín	Máx	IC95 % de la media
A: Base	\$917,623	\$157,398	\$668,383	\$1,630,368	[\$886,392, \$948,855]
B: Alternativo	\$1,105,617	\$141,043	\$850,535	\$1,557,692	[\$1,077,487, \$1,133,748]
C: Pandemia	\$2,325,189	\$367,645	\$1,718,002	\$3,604,558	[\$2,252,240, \$2,398,137]
D: Pandemia + Alt.	\$2,624,408	\$314,468	\$2,027,728	\$3,439,496	[\$2,561,688, \$2,687,128]

Observaciones:

- El **Escenario A** presenta el menor costo promedio bajo condiciones normales.
- El **Escenario B** incrementa costos en aproximadamente 20 % respecto a la política base, pero con menor variabilidad, indicando mayor estabilidad operativa.
- El **Escenario C** incrementa substancialmente los costos, alcanzando \$2,325,189 en promedio, con la mayor variabilidad absoluta.
- El **Escenario D** exhibe los costos más altos pero con mejor control de variabilidad relativa, sugiriendo mayor robustez ante interrupciones severas.

8.2. Histograma de costos

8.2.1. Escenario A

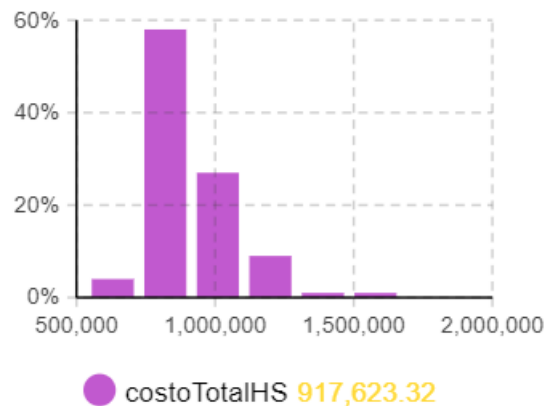


Figura 1: Histograma del costo total — Escenario A: Base

La distribución del costo total bajo la política base muestra una concentración principal en el rango \$800,000–\$1,000,000. Se observa una asimetría positiva, con una cola derecha extendida que alcanza valores máximos de \$1,630,368. Esta asimetría indica que, aunque la mayoría de las simulaciones resultan en costos cercanos a la mediana, existe riesgo de escenarios atípicos con costos significativamente superiores. La diferencia entre media y mediana evidencia el impacto de estos valores extremos.

8.2.2. Escenario B

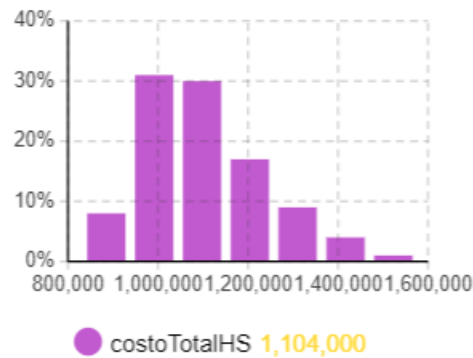


Figura 2: Histograma del costo total — Escenario B: Alternativo

Análisis Escenario B (Alternativo): La política alternativa genera una distribución más simétrica y concentrada. El histograma muestra una forma más suave y equilibrada, con la mayor densidad en el rango \$1,000,000–\$1,200,000. Aunque esta política incrementa costos promedio, reduce significativamente la variabilidad, proporcionando resultados más predecibles. Los valores extremos son menos pronunciados, indicando menor exposición a escenarios adversos.

8.2.3. Escenario C

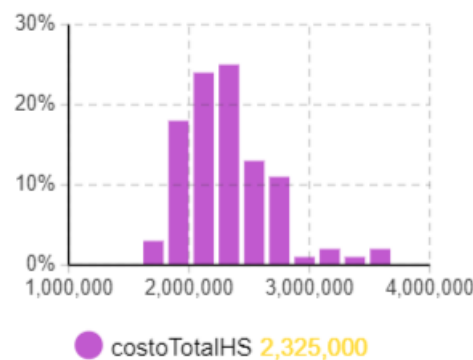


Figura 3: Histograma del costo total — Escenario C: Pandemia

El escenario pandémico revela el impacto de disrupciones severas sobre la política base. La distribución muestra altas dispersiones con costos distribuidos ampliamente entre \$1,700,000 y \$3,600,000. La forma de la distribución mantiene sesgo positivo, pero con una cola derecha aún más extensa, alcanzando máximos de \$3,604,558. Esta alta variabilidad indica que la política base carece de robustez ante incrementos súbitos de demanda: mientras algunas réplicas logran contener costos cerca de \$2,000,000, otras experimentan colapsos operativos con costos superiores a \$3,000,000. La concentración modal en \$2,000,000–\$2,500,000 sugiere que la política puede responder adecuadamente en escenarios pandémicos moderados, pero es altamente vulnerable a variaciones estocásticas extremas.

8.2.4. Escenario D

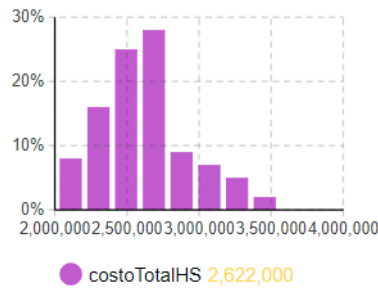


Figura 4: Histograma del costo total — Escenario D: Pandemia + Alternativo

La combinación de pandemia con política alternativa produce la distribución más estable y controlada bajo condiciones extremas. A pesar de exhibir el costo promedio más alto, la distribución es notablemente más simétrica y concentrada que el Escenario C. El histograma muestra una forma casi normal con mayor densidad en \$2,400,000–\$2,800,000. El rango de variación es significativamente menor: mínimo de \$2,027,728 vs \$1,718,002 del Escenario C, y máximo de \$3,439,496 vs \$3,604,558. Esta compresión del rango indica que la política alternativa proporciona mayor robustez y predictibilidad durante crisis, reduciendo la probabilidad de colapsos operativos costosos. Aunque incrementa costos en promedio respecto a mantener la política base durante la pandemia, este sobre costo puede interpretarse como una prima de seguro que mitiga riesgos de escenarios particularmente agresivos.

8.3. Grafico de barras

A continuación se realiza una descomposición de los costos para los resultados obtenidos de los costos en cada escenario

8.3.1. Escenario A

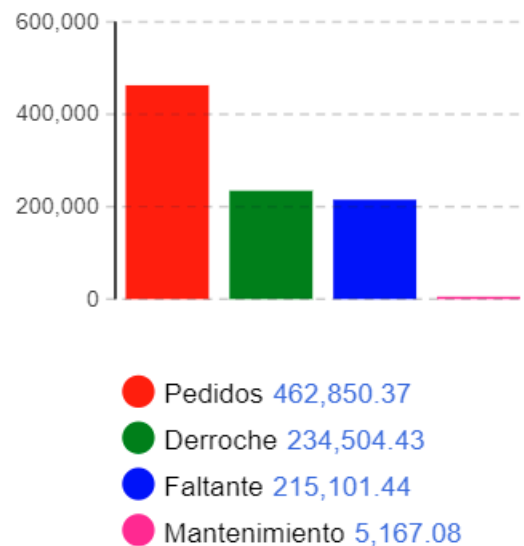


Figura 5: Componentes del costo — Escenario A: Base

El análisis de componentes revela que los costos de pedido dominan la estructura de costos bajo condiciones normales, reflejando la naturaleza de las adquisiciones de reactivos especializados. Los costos de derroche ocupan el segundo lugar, evidenciando pérdidas significativas por vencimiento de reactivos bajo la política trimestral de revisión o por descarte de los mismos por la política FIFO.

Los costos de faltantes representan \$215,101, indicando quiebres de stock moderados pero recurrentes que comprometen la continuidad operativa. El costo de mantenimiento es mínimo, indicando la rotación activa de reactivos resultando en que no haya una cantidad excesiva de estos en almacenamiento.

8.3.2. Escenario B

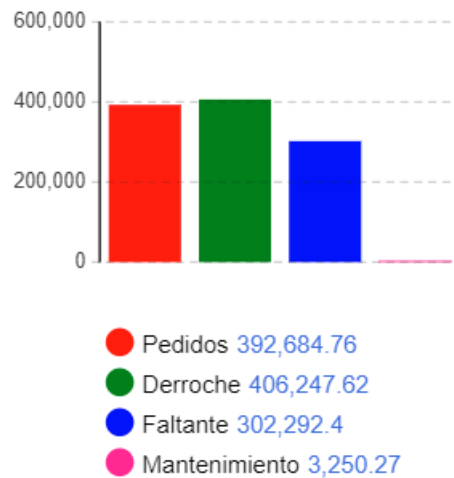


Figura 6: Componentes del costo — Escenario B: Alternativo

La política alternativa redistribuye los costos de forma casi equitativa, reduciendo en gran medida el costo de realización de pedidos y mantenimiento, pero aumentando notablemente los costos de derroche y faltante.

8.3.3. Escenario C

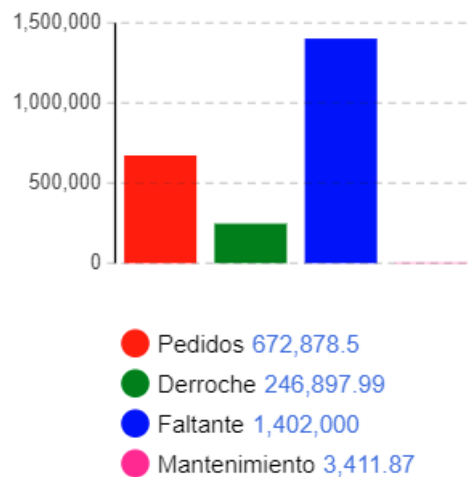


Figura 7: Componentes del costo — Escenario C: Pandemia

El escenario pandémico transforma radicalmente la estructura de costos, con los faltantes emergiendo como el factor dominante. Este incremento respecto al escenario base evidencia el colapso operativo esperado de la política trimestral ante demanda creciente: los intervalos largos de revisión impiden respuesta ágil, generando quiebres de stock. Consecuentemente los costos por realización de pedidos aumentan, reflejando adquisiciones de emergencia más frecuentes y voluminosas. Notablemente, el costo por derroche disminuye relativamente no por eficiencia mejorada sino el alto consumo de los reactivos, los cuales causan un faltante antes que puedan vencerse.

8.3.4. Escenario D

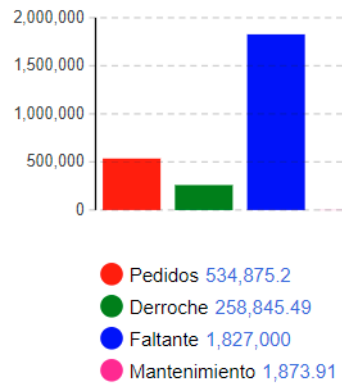


Figura 8: Componentes del costo — Escenario D: Pandemia + Alternativo

Cuando se somete al sistema con política de reposición alternativa a un escenario pandémico, se nota un gran impacto en el costo por faltante de reactivos, acompañado por una disminución del costo de pedidos y mantenimiento. Esto nos indica que la política alternativa no responde adecuadamente a incrementos graduales altos de demanda. Podríamos concluir que la política de reposición alternativa solo será satisfactoria si se reduce el costo de no poder satisfacer la demanda, pues presenta menor costo de pedido y de mantenimiento. Dicha decisión dependerá del laboratorio y su tolerancia a demandas no satisfechas.

9. Conclusión

El modelo desarrollado permitió analizar de forma controlada y cuantitativa el comportamiento del sistema de reposición de insumos y reactivos en distintos escenarios operativos. La comparación entre políticas mostró diferencias significativas en costo total, variabilidad y sensibilidad a cambios en la demanda, lo que evidencia que el desempeño del sistema depende no solo de la política aplicada, sino también del contexto en el que opera.

En condiciones normales, la política actual demostró ser eficiente en términos de costo promedio, mientras que la política alternativa ofreció resultados más estables con menor dispersión. Bajo condiciones de pandemia, ambos esquemas experimentaron incrementos notables de costos y faltantes, lo que indica que el sistema, tal como está diseñado, es sensible a interrupciones prolongadas en la demanda.

Estos resultados no buscan definir una única solución óptima, sino aportar evidencia que permita comprender los compromisos entre costo, previsibilidad y capacidad de respuesta. La elección de una política de reposición depende, en última instancia, de los criterios y prioridades del laboratorio.

Finalmente, la simulación basada en agentes se consolidó como una herramienta válida y replicable para evaluar decisiones operativas en entornos reales. El modelo desarrollado queda disponible para futuras extensiones, como incorporación de múltiples proveedores, restricciones de almacenamiento o políticas dinámicas de reabastecimiento.

Referencias

- [1] Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America.
- [2] Documentación oficial de AnyLogic
- [3] Weitz, R. (Capítulo 10). Comparación estadística entre escenarios de simulación
- [4] Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- [5] Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-Event System Simulation*(5th ed.). Pearson
- [6] Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling* (3rd ed.). Wiley
- [7] Nahmias, S., & Olsen, T. L. (2015). *Production and Operations Analysis* (7th ed.). Waveland Press
- [8] Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (6th ed.). Pearson
- [9] Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Zupick, N. B. (2015). *Simulation with Arena* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- [10] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley
- [11] Notas y registros internos del laboratorio clínico de Casilda (2023-2025).