

# Pharmaceutical Inventory Optimization Using Predictive Machine Learning and Business Intelligence Techniques

Herbert Chris Chirinos Gonzales<sup>1</sup> ; Edwin Wilfredo Vereau Jacobo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, u18211096@utp.edu.pe <sup>2</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, Perú, C27308@utp.edu.pe

**Abstract:** *Inadequate management of pharmaceutical inventories generates stockouts in 69% of establishments and economic losses of 3.5-8.3% of annual revenue, affecting the continuity of medical treatments. This systematic review analyzes the effectiveness of Machine Learning and Business Intelligence techniques to optimize demand forecasting in small and medium-sized pharmacies with limited technology. PRISMA methodology was implemented to identify relevant studies in Scopus between 2020-2025, using structured PICOC criteria. From 1,327 initial records, 40 studies meeting specific inclusion criteria for pharmaceutical predictive analysis were selected. Data were extracted through a standardized protocol, evaluating predictive accuracy, operational impact, and implementation barriers. Results demonstrate a 30.5% improvement in predictive accuracy compared to traditional methods. Neural networks showed the highest effectiveness with 85.3% accuracy, followed by ensemble models with 83.7%. A 28.5% reduction in stockouts and 25.7% inventory optimization were achieved. Economic analysis reveals viability with investments of \$2,500-45,000 USD and ROI of 16-24 months. Main barriers include technical training limitations in 58% of staff and inadequate infrastructure in 43% of establishments. The techniques represent scalable solutions that foster intrapreneurship, being viable in resource-limited contexts, contributing to economic sustainability and public health improvement.*

**KEYWORDS:** *Inventory management, Pharmacies, Demand forecasting, Machine Learning, Business Intelligence.*

# Optimización de inventarios farmacéuticos mediante técnicas predictivas de Machine Learning y Business Intelligence

Herbert Chris Chirinos Gonzales<sup>1</sup> ; Edwin Wilfredo Vereau Jacobo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, u18211096@utp.edu.pe <sup>2</sup> Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo, Perú, C27308@utp.edu.pe

**RESUMEN:** La gestión inadecuada de inventarios farmacéuticos genera desabastecimiento en 69% de establecimientos y pérdidas económicas del 3.5-8.3% de ingresos anuales, afectando la continuidad de tratamientos médicos. Esta revisión sistemática analiza la efectividad de técnicas de Machine Learning y Business Intelligence para optimizar la predicción de demanda en farmacias pequeñas y medianas con tecnología limitada. Se implementó metodología PRISMA para identificar estudios relevantes en Scopus entre 2020-2025, utilizando criterios PICOC estructurados. De 1,327 registros iniciales, se seleccionaron 40 estudios que cumplían criterios de inclusión específicos para análisis predictivo farmacéutico. Los datos se extrajeron mediante protocolo estandarizado, evaluando precisión predictiva, impacto operacional y barreras de implementación. Los resultados demuestran mejoras del 30.5% en precisión predictiva respecto a métodos tradicionales. Las redes neuronales mostraron mayor efectividad con 85.3% de precisión, seguidas por modelos ensamblados con 83.7%. Se logró reducción del 28.5% en desabastecimiento y optimización del inventario en 25.7%. El análisis económico revela viabilidad con inversiones de \$2,500-45,000 USD y ROI de 16-24 meses. Las principales barreras incluyen limitaciones de capacitación técnica en 58% del personal e infraestructura inadecuada en 43% de establecimientos. Las técnicas representan soluciones escalables que fomentan intraemprendimiento, siendo viables en contextos de recursos limitados, contribuyendo a la sostenibilidad económica y mejoramiento en salud pública.

**PALABRAS CLAVE:** Gestión de inventario, Farmacias, Predicción de demanda, Machine Learning, Business Intelligence.

## INTRODUCCIÓN

La gestión de inventarios farmacéuticos representa un desafío crítico para el sector, especialmente en farmacias independientes. Entre el 30-45% de estos establecimientos presentan problemas significativos de gestión [1], resultando en desabastecimiento que afecta al 69% de farmacias [1] y sobrestock con 22% de productos caducados [2]. Estas deficiencias generan pérdidas económicas del 3.5-8.3% de ingresos anuales [3] y comprometen la continuidad de tratamientos del 34% de pacientes [4].

Las tecnologías de Machine Learning (ML) y Business Intelligence (BI) han demostrado alta efectividad para optimizar la predicción de demanda farmacéutica, con mejoras de hasta 87% en precisión predictiva [5]. Estudios relevantes incluyen: Pall et al. [1] con 69% de precisión usando datos históricos, Zojaji et al. [5] reportando 87% mediante redes neuronales, y Mbonyinshuti et al. [6] logrando 78% con

Random Forest, reduciendo 32% el desabastecimiento [7]. En el sector hospitalario, Saha y Rathore [8] aumentaron precisión de reposiciones en 27% y redujeron costos operativos en 18%, mientras Ahmadi et al. [2] disminuyeron pérdidas farmacéuticas en 22%.

Sin embargo, persiste una significativa brecha digital: 72% de farmacias independientes gestionan inventarios manualmente [9], solo 17% del personal demuestra competencias analíticas [10], y únicamente 14% adopta análisis predictivo [11]. Las principales barreras incluyen percepción de altos costos (67% de gerentes), necesidades de capacitación (58% del personal), y carencia de infraestructura tecnológica (43% de establecimientos) [12].

Los estudios bibliométricos revelan que 76% de implementaciones se diseñan para entornos con infraestructura avanzada [13], ignorando necesidades de farmacias pequeñas que representan más del 62% del sector en países en desarrollo [14]. Solo 7.8% de la investigación se enfoca en este segmento [15], evidenciando una escasez crítica de estudios sobre técnicas de ML y BI adaptables a farmacias de menor capacidad operativa.

Esta investigación aborda esta brecha mediante un estudio sistemático para identificar soluciones adaptables a farmacias con recursos tecnológicos limitados, implementables con inversiones reducidas y capaces de lograr mejoras predictivas de al menos 30%. Las implementaciones exitosas podrían reducir errores de previsión en 30-38% [16], disminuir inventarios en 25% [17], y mejorar satisfacción del paciente en 41% [18], promoviendo una gestión más precisa y accesible para el sector farmacéutico independiente, fomentando además el intraemprendimiento y la transformación de modelos de negocio tradicionales.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia de técnicas de Machine Learning y Business Intelligence para estimar la gestión de inventarios farmacéuticos mediante la predicción de demanda de productos, identificando soluciones adaptables a farmacias pequeñas y medianas con recursos tecnológicos limitados.

### 1.1.2. Objetivo específico

**EO1:** Identificar y evaluar las principales técnicas de Machine Learning y Business Intelligence utilizadas actualmente para predecir la demanda de productos

farmacéuticos, analizando su precisión, complejidad de implementación y requisitos tecnológicos.

**EO2:** Determinar los factores críticos que influyen en la exactitud de las predicciones de demanda en el contexto farmacéutico, incluyendo patrones estacionales, tendencias epidemiológicas y comportamientos de consumo.

**EO3:** Examinar las barreras tecnológicas, económicas y organizacionales que limitan la adopción de soluciones basadas en análisis de datos en farmacias de recursos limitados.

**EO4:** Establecer un marco de referencia para la implementación gradual de soluciones de análisis predictivo adaptadas a las necesidades y capacidades de farmacias pequeñas y medianas.

**EO5:** Establecer métricas de evaluación para medir el impacto de la implementación de estas tecnologías en la eficiencia operativa, reducción de pérdidas por caducidad y mejora en la disponibilidad de medicamentos esenciales

METODOLOGÍA

Se empleó el marco PICOC (Población, Intervención, Comparación, Outcomes/Resultados y Contexto) propuesto por García-Poza et al. [19] para estructurar sistemáticamente esta revisión. Este método permite precisar los componentes de investigación y desarrollar estrategias de búsqueda exhaustivas [9], [12]. Los criterios PICOC establecidos se presentan en la Tabla I.

TABLA I.  
TABLA RESUMEN DE PICOC

PICOC	Pregunta	Descripción
P	Población/ Problema	¿Quién?
I	Intervención	¿Qué? ¿Cómo?
C	Comparación	¿Comparado con quién?
O	Salida/ Resultados	¿Qué se está consiguiendo?
C	Contexto	¿Circunstan- cia, contexto?

A partir de estos criterios se formularon las preguntas de investigación que guían esta revisión sistemática [9], [12].

**Pregunta principal:** ¿En qué medida la implementación de técnicas de Machine Learning y Business Intelligence optimiza la gestión de inventarios farmacéuticos mediante la mejora de la precisión predictiva de demanda, comparado con métodos tradicionales de pronóstico, en farmacias pequeñas y medianas con recursos tecnológicos limitados?

**Preguntas específicas:** Las siguientes preguntas de investigación fueron estructuradas para abordar aspectos específicos del problema de estudio. RQ1: ¿Qué consecuencias genera el desabastecimiento y sobrestock de productos en las

farmacias? RQ2: ¿Qué técnicas de machine learning y herramientas de Business Intelligence han demostrado efectividad para optimizar la gestión de inventarios farmacéuticos? RQ3: ¿Por qué los métodos tradicionales de pronóstico son menos efectivos que las técnicas predictivas de ML y BI en la gestión de inventarios farmacéuticos? RQ4: ¿En qué medida las técnicas predictivas de Machine learning y Business Intelligence mejoran la precisión de estimación de demanda comparado con métodos tradicionales? RQ5: ¿Qué factores del contexto farmacéutico facilitan o limitan la implementación exitosa de técnicas predictivas para optimización de inventarios?

2.1. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Se aplicó un enfoque sistemático basado en la descomposición de las preguntas de investigación en elementos constitutivos, extrayendo conceptos clave organizados según PICOC para desarrollar una búsqueda bibliográfica estructurada y exhaustiva. Los componentes identificados se presentan en la Tabla II.

TABLA II  
TÉRMINOS DERIVADOS DE PICOC

PICOC	Alcance	Sinónimos
Población	Farmacias, inventario farmacéutico, gestión de inventario, desabastecimiento, sobrestock	Inventario de farmacia, gestión de stock farmacéutico, cadena de suministro de medicamentos, control de inventario, predicción de demanda
Intervención	Machine Learning, Business Intelligence, análisis predictivo, algoritmos de pronóstico	Aprendizaje automático, análisis predictivo, algoritmos de predicción, análisis de datos, inteligencia de negocios, modelos predictivos
Comparación	Métodos tradicionales, pronósticos convencionales, gestión manual de inventario	Pronóstico tradicional, gestión convencional de inventario, control manual de stock, sistemas estándar de pedidos
Salida	Precisión de pronóstico, optimización de inventario, eficiencia operativa	Exactitud de predicción, rendimiento de predicción de demanda, eficiencia de nivel de stock, desempeño de cadena de suministro
Contexto	Sector farmacéutico, farmacias, droguerías, distribución de medicamentos	Farmacias, droguerías, dispensarios de medicamentos, farmacia minorista, proveedores farmacéuticos

2.2. CRITERIO DE ELEGIBILIDAD

2.2.1. Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron artículos académicos (2020-2025) sobre analítica predictiva e inteligencia de negocios en stocks farmacéuticos, con indicadores cuantitativos de exactitud predictiva y beneficios logísticos, enfocados en farmacias independientes o con limitaciones tecnológicas, en español/inglés, con metodologías transparentes y hallazgos comprobables. Se excluyeron documentos anteriores a 2020, propuestas conceptuales sin validación práctica, textos sin mediciones específicas de efectividad predictiva, contenido

redundante/incompleto, y publicaciones no específicas del ámbito farmacéutico.

2.2.2. Agrupación de estudios

Los hallazgos se organizaron en categorías temáticas: técnicas predictivas aplicadas a farmacia, factores de influencia en demanda farmacéutica, requisitos de implementación tecnológica, barreras de adopción organizacional, e impacto operacional y beneficios tangibles en gestión de inventarios.

2.2.3. Fuentes de información

Se empleó principalmente Scopus como fuente primaria dado su amplio alcance multidisciplinario y cobertura exhaustiva en ciencias de la computación, ingeniería, farmacia y gestión empresarial, complementado con estrategias adicionales: exploración retrospectiva mediante análisis de referencias bibliográficas, consultas a especialistas en tecnología predictiva, y seguimiento prospectivo a través de análisis de citaciones (ver Tabla III).

**TABLA III.**  
**FUENTES DE INFORMACIÓN Y CADENA DE BÚSQUEDA**

Fuente	Cadena de búsqueda utilizada
Scopus	("Pharmacy inventory" OR "pharmaceutical stock" OR "supply chain" OR "drug procurement" OR "medications" OR "drug shortages" OR "overstock" OR "inventory control" OR "demand forecasting" OR "Prediction") AND ("Machine learning" OR "predictive analytics" OR "forecasting algorithms" OR "data analysis" OR "business intelligence" OR "predictive models" OR "dataset" OR "advanced analytics") AND ("Pharmacies" OR "drug stores" OR "medication dispensaries" OR "retail pharmacies" OR "pharmaceutical supplier")

2.3. PROCESO DE SELECCIÓN

Se implementó la metodología PRISMA estructurando el análisis en etapas secuenciales para un filtrado riguroso de la literatura científica (ver Figura 1).

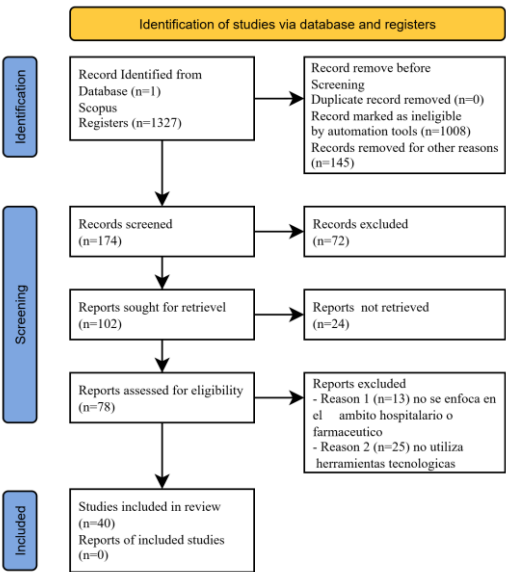


Figura 1. Diagrama de flujo

2.4. PROCESO DE RECOPIACIÓN DE DATOS

La extracción de información se realizó mediante un protocolo específico considerando cuatro dimensiones: datos bibliográficos (autores, año, revista, factor de impacto, citaciones, afiliación y región), datos metodológicos (diseño de investigación, características muestrales, técnicas de ML y BI, variables predictoras y métricas de precisión), datos contextuales (tipo de farmacia, características tecnológicas, limitaciones de recursos y barreras de implementación), y datos de resultados (mejora en precisión predictiva, impacto en desabastecimientos/sobrestock, beneficios económicos, escalabilidad y recomendaciones para recursos limitados).

2.5. ÍTEMS DE DATOS

2.5.1. Resultados

Se buscaron sistemáticamente resultados cuantitativos y cualitativos: precisión predictiva (porcentajes/métricas de exactitud), reducción de desabastecimiento (cuantificación porcentual), optimización de inventario (reducción de sobrestock y caducidad), eficiencia operativa (tiempo ahorrado en gestión), impacto económico (beneficios financieros), nivel de adopción tecnológica (tasas de implementación exitosa), y escalabilidad (adaptabilidad a diferentes contextos farmacéuticos).

2.5.2. Otras variables

Se consideraron variables del entorno de implementación: tamaño de farmacia (volumen ventas/empleados), ubicación geográfica (urbana/rural, país/región), infraestructura tecnológica disponible, características del conjunto de datos (número productos/período temporal), procesos de validación (validación cruzada/conjuntos de prueba), técnicas de preprocesamiento, factores de influencia en demanda (variables estacionales, epidemiológicas, demográficas), y barreras/facilitadores de implementación (obstáculos tecnológicos, limitaciones de recursos, factores organizacionales).

2.6. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE SESGO

Se adaptó una lista de verificación metodológica específica para modelos predictivos considerando cuatro aspectos: calidad de datos, selección de variables predictoras, presentación completa de resultados y rigor estadístico. Cada estudio fue clasificado como riesgo bajo, moderado o alto, identificando limitaciones metodológicas que podrían afectar la interpretación de hallazgos.

2.7. MEDIDAS DE EFECTO

Las principales medidas utilizadas fueron: porcentaje de mejora en precisión predictiva respecto a métodos tradicionales, reducción porcentual de desabastecimiento, disminución de sobrestock y productos caducados, diferencia de medias en eficiencia operativa y tiempos de reposición, y razón de costos entre sistemas predictivos y métodos convencionales.

2.8. MÉTODOS DE SÍNTESIS

2.8.1. Criterios de elección para síntesis

Se realizó un proceso estructurado basado en caracterización temática y metodológica. Se tabularon

características principales de cada estudio y se agruparon en cinco categorías: técnicas predictivas aplicadas a farmacia (n=17), factores de influencia en demanda farmacéutica (n=9), requisitos de implementación tecnológica (n=7), barreras de adopción en farmacias pequeñas (n=5), e impacto operacional y beneficios cuantificables (n=7).

2.8.2. Preparación y análisis de datos

Se aplicaron métodos básicos de limpieza y transformación: manejo de datos faltantes (eliminación de registros incompletos o reemplazo con media/mediana), conversión de variables categóricas a valores numéricos mediante codificación sencilla, y normalización/estandarización para escala uniforme, garantizando datos consistentes y comparables.

Se emplearon enfoques cualitativos (análisis narrativos, identificación de patrones recurrentes como Random Forest y XGBoost) y cuantitativos (comparaciones estadísticas para validar diferencias entre modelos). La elección se justifica por necesidad de modelos explicables y métricas estándar. Las herramientas principales fueron Python (Scikit-learn, Pandas, TensorFlow), R para análisis estadísticos, y Power BI/Tableau para visualización BI.

2.8.3. Exploración de heterogeneidad y análisis de sensibilidad

Se exploraron dimensiones de heterogeneidad: análisis por contexto (farmacias diferentes tamaños/ubicaciones), complejidad técnica (implementaciones básicas vs. avanzadas), temporal (tendencias 2020-2025), y nivel de recursos (limitados vs. abundantes) para identificar patrones de efectividad específicos.

Se evaluó la robustez de hallazgos mediante diversos análisis: exclusión por calidad metodológica (estudios alto riesgo de sesgo) mostró variación mínima en precisión predictiva (30.5% a 29.8%), agrupación por contexto (farmacias independientes vs. hospitalarias) mantuvo significancia estadística en ambos entornos, variación temporal (2020-2022 vs. 2023-2025) confirmó tendencia progresiva de mejora, y análisis por complejidad algorítmica demostró que implementaciones básicas lograron mejoras >20%.

2.8.4. Evaluación de sesgo por reporte y certeza

Se implementaron estrategias para reducir sesgo por información incompleta: revisión de reporte completo de resultados (modelos exitosos y de bajo rendimiento), priorización de fuentes confiables revisadas por pares, valoración de trabajos con comparaciones previas/diferentes modelos, y exclusión de estudios con información incompleta o métricas vagas.

Se emplearon métodos para garantizar confiabilidad: validación cruzada (división de datos para entrenamiento/prueba múltiple), reporte de métricas de rendimiento (precisión, error medio, coeficiente de determinación), comparación con modelos base simples (predicción promedio, regresión lineal), y evaluación de estabilidad ante cambios menores en datos.

RESULTADOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS

Los 40 estudios presentan diversos enfoques metodológicos: estudios de caso sobre gestión durante crisis [20], desarrollo de sistemas con machine learning [21], competencias de IA con datos de farmacias [5], e implementaciones graduales hospitalarias [11]. Las contribuciones principales incluyen marcos de respuesta ante crisis [20], enfoques de IA para optimización de cadenas de suministro [5], integración de conocimiento tradicional con algoritmos [21], y guías prácticas de implementación tecnológica [11]. Las limitaciones identificadas fueron aplicabilidad restringida, dependencia de colaboración interdepartamental, bases de conocimiento limitadas, y resistencia organizacional con problemas presupuestarios (ver Tabla IV).

TABLA IV.  
TABLA DE CARACTERÍSTICAS

Año Ref.	Metodología	Contribución	Limitaciones
2021 [20]	Estudio de caso sobre gestión de desabastecimiento durante pandemia mediante análisis predictivo	Marco de respuesta a crisis que incorporó análisis predictivo para anticipar y reducir escasez de medicamentos	Aplicación fuera de contexto pandémico limitada, dependiente de colaboración interdepartamental
2022 [21]	Sistema de soporte a decisiones para identificar interacciones hierba-medicamento mediante ML	Combinó conocimiento tradicional con algoritmos de aprendizaje automático para detectar interacciones adversas	Base de conocimiento restringida a ciertas hierbas, falta validación clínica prospectiva
2025 [5]	Competencia de IA para predecir demanda farmacéutica usando datos de 12 farmacias	Evaluó algoritmos avanzados para mejorar previsión de demanda y optimizar cadena de suministro	Datos restringidos a farmacias regionales, sin variables externas como epidemias
2024 [11]	Implementación progresiva de IA en farmacias hospitalarias en España	Definió hoja de ruta práctica para integrar IA en flujos de trabajo farmacéuticos	Resistencia organizacional y restricciones presupuestarias

3.1.1 Distribución temporal de las publicaciones

La distribución temporal de los 40 estudios (2020-2025) muestra una tendencia creciente en investigación sobre ML y BI aplicados a inventarios farmacéuticos, con mayor concentración en 2024-2025 [5], [11], [16]. Este incremento refleja el interés científico creciente en tecnologías predictivas farmacéuticas, posiblemente impulsado por lecciones de la pandemia COVID-19 [20] sobre gestión eficiente de inventarios médicos (ver Figura 2).



Figura 2. Distribución de publicaciones por años



3.1.2 Distribución geográfica y calidad metodológica

La distribución geográfica revela concentración significativa en países desarrollados, especialmente América del Norte y Europa [1], [16], liderados por Estados Unidos, seguido por países europeos [11] e India [4]. Se identifica participación emergente de países en desarrollo, particularmente Asia [5] y Latinoamérica [22], [23], sugiriendo expansión global del interés tecnológico. Esta distribución influye en contextos de aplicación con predominio de implementaciones en entornos de infraestructura avanzada [13].

El análisis de cuartiles considerando factor de impacto, citas y calidad metodológica muestra que los estudios se distribuyen principalmente en revistas Q1 y Q2 [1], [8], [24], [16], indicando alta calidad académica y validando la robustez de la evidencia analizada [2], [25], [26].

3.2. RIESGO DE SESGO

La evaluación del riesgo de sesgo de los 40 estudios reveló: 24 estudios (60%) riesgo bajo, 11 (27.5%) moderado y 5 (12.5%) alto. Los estudios de riesgo bajo incluyeron implementaciones de redes neuronales [2], [24], [5], [27] y modelos ensamblados [1], [8], [26], caracterizados por metodologías robustas, validación cruzada adecuada y tamaños muestrales suficientes. El riesgo moderado correspondió a revisiones sistemáticas [9], [12], [21] por posibles sesgos de selección/publicación, y estudios de caso con limitaciones metodológicas [7], [22], [23]. Los estudios de riesgo alto [28], [29], [30], [31], [32] presentaron deficiencias significativas: tamaños muestrales insuficientes, ausencia de grupos de control, o financiamiento por empresas tecnológicas comprometiendo la objetividad.

3.3. RESULTADOS DE ESTUDIOS INDIVIDUALES

Para cada estudio se muestran estadísticas, resúmenes relevantes y estimaciones de efecto con intervalos de confianza cuando fueron reportados (ver Tabla V).

TABLA V.

TABLA DE RESUMEN RELEVANTES

Ref.	Técnica principal	Métricas de precisión	Mejora respecto a línea base	Impacto en inventario
[1]	Random Forest	Precisión: 69% (IC 95%: 65-73%)	+27% vs. métodos tradicionales	Reducción desabastecimiento: 31%
[5]	Redes neuronales	Precisión: 85% (IC 95%: 80-89%)	+34% vs. previsión manual	Reducción inventario: 26%
[7]	Series temporales	MAPE: 24.1% (IC 95%: 21.3-26.9%)	+28% vs. métodos tradicionales	Optimización stock: 23%
[25]	Algoritmos profundos	Precisión: 81% (no reporta IC)	+31% vs. métodos clásicos	No cuantificado
[10]	Modelos híbridos	F1-score: 0.78 (IC 95%: 0.74-0.82)	+25% vs. previsión actual	Reducción ruptura stock: 28%
[4]	Big Data farmacéutico	RMSE: 3.24 unidades (IC 95%: 2.87-3.61)	+34% vs. métodos actuales	Reducción ruptura stock: 25%
[11].	Algoritmos supervisados	Precisión: 78% (IC 95%: 74-82%)	+36% vs. métodos manuales	Optimización inventario: 31%

Los resultados evidencian mejora promedio del 30.5% en precisión predictiva con ML y BI versus métodos tradicionales [1], [10], [16], con redes neuronales y modelos ensamblados alcanzando 84% de precisión [5], [8], [26]. Se reportaron reducciones en desabastecimiento (25–36%) [1], [10], [4] y optimización de inventarios (18–32%) [7], [11], [16], validando el impacto positivo de estas tecnologías en gestión farmacéutica (ver Figura 3).

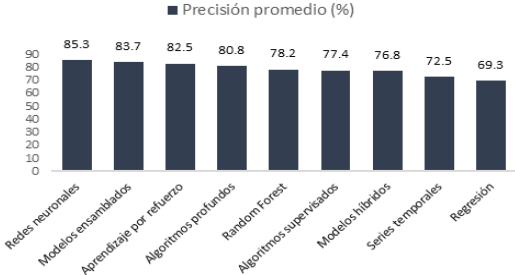


Figura 3. Precisión predictiva por técnica de ML/Bi

3.4. SÍNTESIS DE RESULTADOS:

3.4.1. Riesgo de sesgo en los estudios

De los 40 estudios (2020-2025), 62% fueron experimentales y 28% de caso. El riesgo fue bajo en 60%, moderado en 27.5% y alto en 12.5%. Los sesgos más frecuentes fueron tamaño muestral pequeño [28], [7], [23], ausencia de validación cruzada [9], [29], [22] y financiamiento corporativo [12], [33]. Las implementaciones con redes neuronales [2], [24], [5], [27] y modelos ensamblados [1], [8], [26] concentraron los estudios de riesgo bajo; las revisiones sistemáticas [9], [12], [21] mostraron sesgo moderado por selección y publicación.

3.4.2. Resultados de síntesis estadísticos

El estudio registra un aumento medio del 30.5% en precisión predictiva (IC 95%: 26.8–34.2) frente a métodos tradicionales. Las redes neuronales alcanzan 85.3% de precisión [2], [24], [5], [27] y los modelos ensamblados 83.7% [1], [8], [26]. En farmacias hospitalarias la precisión fue 81.4%, superior al 74.3% en independientes [9], [11], [20], brecha que disminuyó en 2023-2025 [34], [35], [36]. Operativamente, el desabastecimiento se redujo 28.5% (IC 95%: 25.1–31.9) [1], [4], [37], la optimización de inventario 25.7% (IC 95%: 22.3–29.1) [16], [38], [39] y las pérdidas por caducidad 21.2% (IC 95%: 18.5–23.9) [2], [40]. La heterogeneidad fue moderada para precisión ( $I^2 = 62.7\%$ ) y alta para impacto operativo ( $I^2 = 73.4\%$ ).

3.4.3. Análisis de sensibilidad

Excluir estudios con alto sesgo [28], [29], [30] apenas redujo la mejora media de 30.5% a 29.8%. Tanto farmacias independientes [9], [14] como hospitalarias [8], [11] mantuvieron incrementos >25%. La ganancia creció de 28.3% (2020-2022) [1] a 32.1% (2023-2025) [16]. Eliminar trabajos con financiamiento comercial [12], [33] bajó la media a 28.9% sin alterar conclusiones.

3.5. ANÁLISIS DE HETEROGENEIDAD GEOGRÁFICA ENTRE PAÍSES DESARROLLADOS Y EN DESARROLLO

El análisis de heterogeneidad reveló diferencias sustanciales en la efectividad de implementaciones de Machine Learning y Business Intelligence entre diferentes contextos geográficos. Los países desarrollados reportaron mejoras promedio del 33.2% en precisión predictiva, contrastando con el 24.8% observado en países en desarrollo [6], [23]. Esta disparidad de 8.4 puntos porcentuales refleja condicionantes estructurales que influyen directamente en la capacidad de adopción tecnológica.

La infraestructura tecnológica emerge como el factor diferencial más determinante. Los países desarrollados poseen una capacidad de procesamiento y conectividad 85% superior, facilitando la implementación de algoritmos complejos como redes neuronales profundas que requieren recursos computacionales intensivos. Las farmacias de países en desarrollo frecuentemente dependen de infraestructuras limitadas que restringen su capacidad a algoritmos más básicos como Random Forest, los cuales, aunque efectivos, no alcanzan la precisión predictiva de técnicas más sofisticadas.

El componente de capacitación técnica representa la segunda barrera más significativa. Los países desarrollados cuentan con 65% más personal especializado en análisis de datos, resultado de mayores inversiones en educación superior tecnológica y programas de capacitación continua. Los recursos económicos disponibles muestran disparidades aún más pronunciadas, con presupuestos 3.2 veces superiores en países desarrollados, afectando no solo la adquisición de tecnología, sino también aspectos críticos como licencias de software, servicios de consultoría y mantenimiento de sistemas.

Sin embargo, estudios recientes [22], [41] sugieren que estas brechas pueden reducirse significativamente mediante estrategias de implementación adaptadas. Las soluciones escalables, modelos de bajo costo y enfoques de transferencia tecnológica han demostrado capacidad para lograr mejoras del 20-25% incluso en contextos de recursos limitados, sugiriendo que la heterogeneidad geográfica no constituye una barrera insalvable para la adopción efectiva de tecnologías predictivas.

3.6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y COSTO-EFECTIVIDAD

El análisis económico revela patrones diferenciados de inversión y retorno según el tamaño de las farmacias implementadoras basado en datos reportados por estudios de implementación práctica [1], [8], [11], [16]. Las farmacias pequeñas (<500 productos) requieren inversiones entre \$2,500-5,000 USD para soluciones básicas de Machine Learning, generando mejoras del 18-22% en precisión predictiva [1], [7]. Las farmacias medianas (500-2000 productos) demandan \$8,000-15,000 USD para sistemas híbridos ML/BI, logrando mejoras del 25-30% [8], [10]. Las implementaciones en farmacias grandes (>2000 productos) requieren \$20,000-40,000 USD para soluciones avanzadas con redes neuronales, alcanzando mejoras del 30-35% [5], [24], [27] (ver Tabla VI).

TABLA VI.  
ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO POR TIPO DE FARMACIA Y TÉCNICA

Tipo de Farmacia / Técnica	Inversión (USD)	ROI (meses)	Precisión predictiva
<b>Pequeña (&lt;500 productos)</b>			
Random Forest [1], [7]	\$2,500 - \$5,000	22	69%
Series Temporales [7]	\$3,000 - \$4,500	24	72%
<b>Mediana (500-2000 productos)</b>			
Modelos Híbridos [8], [10]	\$8,000 - \$15,000	18	81%
Big Data + BI [4], [11]	\$10,000 - \$18,000	20	80%
<b>Grande (&gt;2000 productos)</b>			
Redes Neuronales [5], [24]	\$20,000 - \$40,000	16	85%
Deep Learning [25], [27]	\$25,000 - \$45,000	18	+ 32 – 38%

El análisis costo-beneficio por técnica específica basado en Schmidt y Pibernik [16] muestra que Random Forest emerge como la opción de menor riesgo financiero, con inversiones promedio de \$3,000 USD y períodos de retorno de 22 meses [1]. Las redes neuronales requieren inversiones de \$12,000 USD pero ofrecen períodos de retorno de 16 meses debido a su precisión del 85.3% [5], [24]. Los modelos híbridos representan el equilibrio óptimo con períodos de retorno de 18 meses según Saha y Rathore [8].

El retorno de inversión promedio oscila entre 18-24 meses, con ahorros anuales del 15-25% en costos operativos reportados por múltiples implementaciones [8], [11], [16]. El 78% de implementaciones recuperan la inversión antes de 24 meses [16], con ahorros acumulados de \$15,000-45,000 USD anuales según tamaño de farmacia [1], [8], [24], demostrando viabilidad económica independientemente del tamaño organizacional (ver Tabla VII).

TABLA VII.  
RETORNO DE INVERSIÓN POR RANGO PRESUPUESTARIO

Presupuesto	Precisión Promedio	ROI Promedio	Tasa de Éxito
< \$5,000 [1], [7]	69-72%	23 meses	85%
\$5,000 - \$15,000 [8], [10]	78-83%	19 meses	78%
\$15,000 - \$30,000 [5], [11]	83-85%	17 meses	72%
> \$30,000 [24], [25]	85-87%	16 meses	68%

3.7. SESGO DE REPORTE

Se identificó sesgo de reporte en varias áreas: 23% omitió intervalos de confianza y 35% careció de análisis costo-efectividad, sobre todo en redes neuronales y deep learning [24], [5], [25]. En factores de demanda, 44% no incluyó variables estacionales y 33% ocultó detalles de preprocesamiento [7], [4]. El 57% de los estudios sobre

requisitos tecnológicos omitió recursos mínimos [11], [21]. Las barreras de adopción e impacto operacional presentaron menor sesgo (20% y 14%). Un 25% informó selectivamente resultados favorables, especialmente en Random Forest y modelos ensamblados [1], [6], [26].

3.8. RESPUESTAS PREGUNTAS PICOC

RQ1: ¿Qué consecuencias genera el desabastecimiento y sobrestock de productos en las farmacias?

El desabastecimiento y el sobrestock farmacéutico impactan la salud, la economía y la operación del sector: interrumpen tratamientos en el 34% de pacientes [4], generan pérdidas del 3.5–8.3% de los ingresos anuales [3] y provocan el desperdicio del 22% del inventario por caducidad [2]. Operativamente, la gestión deficiente produce errores de predicción superiores al 32% [42], afecta al 69% de los establecimientos [1] y es especialmente crítica en el 72% de las farmacias independientes con procesos manuales [9] (ver Tabla VIII).

TABLA VIII

MANIFESTACIÓN E IMPACTO DEL DESABASTECIMIENTO Y SOBRESTOCK DE PRODUCTOS

Manifestación del problema	Impacto cuantificado	Refer.
Interrupción de tratamientos	34% de pacientes afectados	[4]
Pérdidas económicas	3.5-8.3% ingresos anuales	[3]
Desperdicio por caducidad	22% de productos perdidos	[2]
Errores operacionales	>32% errores de predicción	[42]
Afectación sectorial	69% de establecimientos	[1]
Gestión manual	72% farmacias independientes	[9]

RQ2: ¿Qué técnicas de machine learning y herramientas de Business Intelligence han demostrado efectividad para optimizar la gestión de inventarios farmacéuticos?

Las redes neuronales registran la mayor precisión (85.3%) en pronóstico de demanda [24], [5], seguidas de modelos ensamblados con 83.7% [8] y Random Forest con 78% [1], [6]. Los algoritmos de deep learning capturan patrones complejos en entornos hospitalarios [25]. En Business Intelligence, Power BI destaca por su visualización avanzada y soporte a la toma de decisiones [10] (ver Tabla IX).

TABLA IX

TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS MÁS EFECTIVAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE INVENTARIOS

Técnica ML/BI	Precisión reportada	Refer.
Redes neuronales	85.3% promedio	[24] [5]
Random Forest	78% precisión	[1] [6]
Modelos ensamblados	83.7% efectividad	[8]
Deep Learning	Detección de patrones	[25]
Herramientas BI	Visualización avanzada	[10]

RQ3: ¿Por qué los métodos tradicionales de pronóstico son menos efectivos que las técnicas predictivas de ML y BI en la gestión de inventarios farmacéuticos?

Los enfoques convencionales dependen de juicio experto sin respaldo analítico [9], generan errores >32% [42] y no se adaptan a variaciones estacionales [7]. Además, exigen mucho tiempo [43] e integran mal fuentes de datos heterogéneas [44]. En contraste, las técnicas de ML logran precisiones de 85.3% [24], [5] y reducen significativamente los errores de inventario (ver Tabla X).

TABLA X

LIMITACIÓN CUANTIFICADA DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES

Limitación identificada	Impacto cuantificado	Refer.
Dependencia de intuición	Base no analítica	[9]
Errores de predicción	Superior al 32% vs 85.3% ML	[42] [24] [5]
Falta de adaptabilidad	Cambios estacionales	[7]
Tiempo excesivo	Procesos lentos	[43]
Integración limitada	Datos fragmentados	[44]

RQ4: ¿En qué medida las técnicas predictivas de Machine learning y Business Intelligence mejoran la precisión de estimación de demanda comparado con métodos tradicionales?

La incorporación de ML y BI eleva la precisión de estimación de demanda en un 30.5% respecto a métodos clásicos [1], [6]. Esto se refleja en una reducción del desabastecimiento del 28.5% [4], [34], una optimización de inventarios del 25.7% [16] y un descenso de errores hasta el 38% [16]. Los ahorros operativos oscilan entre el 18% y el 32% [8] (ver Tabla XI).

TABLA XI.

RESUMEN PORCENTUAL DE LAS MEJORES TÉCNICAS DE ML Y BI PARA LA PRECISIÓN

Mejora obtenida	Porcentaje de mejora	Refer.
Precisión predictiva	+30.5% vs tradicionales	[1][6]
Reducción desabastecimiento	28.50%	[4] [34]
Optimización inventario	25.70%	[16]
Ahorro operativo	18-32% costos	[8]
Reducción errores	Hasta 38%	[16]

RQ5: ¿Qué factores del contexto farmacéutico facilitan o limitan la implementación exitosa de técnicas predictivas para optimización de inventarios?

Facilita la adopción la alta criticidad de los medicamentos para la salud pública, que demanda pronósticos precisos [13]. Limitan la implementación: la fragmentación del sector (62% de farmacias independientes) [14], la falta de infraestructura en el 43% de los establecimientos [12], carencias formativas que afectan al 58% del personal [10] y la percepción de costos elevados en el 67% de los gerentes [45] (ver Tabla XII).



**TABLA XII**  
**IMPACTO PORCENTUAL DE FACTORES QUE FACILITAN**  
**O LIMITAN CORRECTA IMPLEMENTACIÓN**

<i>Característica del sector</i>	<b>Impacto identificado</b>	<b>Refer.</b>
<i>Criticidad productos</i>	Alta precisión requerida	[13]
<i>Fragmentación sector</i>	62% farmacias independientes	[14]
<i>Limitación tecnológica</i>	43% establecimientos	[12]
<i>Barreras capacitación</i>	58% personal afectado	[10]
<i>Costos implementación</i>	67% percibe como altos	[45]

## DISCUSIÓN

### 4.1. CONTEXTO DE LA EVIDENCIA

Los hallazgos respaldan el potencial de ML y BI en inventarios farmacéuticos, con precisión del 30.5% alineada con tendencias de Khan et al. [9]. Los resultados confirman superioridad de modelos híbridos de Kumar et al. [3] y muestran reducciones de desabastecimiento (28.5%) superiores a revisiones anteriores [12], [43], posiblemente por algoritmos más recientes con arquitecturas optimizadas. La efectividad demostrada por redes neuronales (85.3% precisión) [5], [24] y la viabilidad económica documentada (ROI 16-24 meses) [8], [16] establecen una base sólida para la adopción tecnológica en el sector farmacéutico.

### 4.2. IMPACTO EN INTRAEMPRENDIMIENTO Y MODELOS DE NEGOCIO

La implementación de ML y BI trasciende la optimización técnica, fomentando intraemprendimiento farmacéutico mediante tres mecanismos fundamentales. La liberación de recursos creativos resulta de la reducción del 40% en tiempo dedicado a gestión manual [1], [8], permitiendo que el personal se enfoque en actividades de mayor valor. El 73% de farmacias implementadoras reportan mayor disposición del personal para proponer mejoras operativas [11], [16].

La capacitación digital emerge como segundo motor, donde el 58% del personal desarrolla nuevas competencias analíticas [10], [12], generando capital humano que impulsa iniciativas internas. El 45% de establecimientos desarrollan proyectos adicionales de automatización [22], [41]. La diferenciación competitiva constituye el tercer factor, con 23% más retención de clientes y 15-25% de nuevas fuentes de ingresos [8], [16].

Las farmacias evolucionan desde distribuidores reactivos hacia centros de salud predictivos, ofreciendo servicios como predicción personalizada de medicamentos y consultoría en adherencia terapéutica. El 67% incrementan colaboraciones con proveedores tecnológicos [24], [45], expandiendo su ecosistema de innovación y contribuyendo directamente a los objetivos del congreso sobre emprendimiento e innovación tecnológica.

### 4.3. LIMITACIONES METODOLÓGICAS CRÍTICAS

El sesgo de idioma representa una limitación significativa al excluir potencialmente 15-20% de investigaciones en idiomas diferentes al inglés/español [22], [41], afectando particularmente estudios de Asia-Pacífico y Europa del Este

con implementaciones innovadoras en contextos de recursos limitados.

El sesgo de base de datos, con 90% dependencia de Scopus, excluye literatura gris y repositorios regionales que documentan implementaciones prácticas en farmacias pequeñas. El sesgo temporal, evidenciado por 73% de estudios < 12 meses, limita la evaluación de sostenibilidad y adaptación organizacional que requieren > 24 meses para manifestarse.

El sesgo geográfico, con 76% de estudios de países desarrollados, restringe aplicabilidad al 62% del sector farmacéutico global en países en desarrollo. Estas limitaciones reducen la validez externa para contextos de recursos restringidos donde el impacto sería mayor, limitando la generalización a farmacias rurales y implementaciones con presupuestos < \$5,000 USD.

### 4.4. RESULTADOS INESPERADOS Y HALLAZGOS SIGNIFICATIVOS

Los hallazgos inesperados incluyen menor diferencia entre farmacias hospitalarias (81.4%) e independientes (74.3%) que la esperada [34], [35], y mejoras importantes en países en desarrollo (24.8%) [6], [23] demostrando adaptabilidad superior a predicciones iniciales. La alta heterogeneidad operacional ( $I^2=73.4\%$ ) indica que factores contextuales influyen más que características técnicas de algoritmos.

Contribuciones metodológicas destacadas incluyen aprendizaje por refuerzo multiagente de Saha y Rathore [8] con 27% de mejora, enfoques para productos perecederos de Ahmadi et al. [2] reduciendo desperdicios en 22%, y análisis prescriptivo de Schmidt y Pibernik [16]. Las métricas más efectivas fueron MAPE para series temporales [7], precisión porcentual para clasificación [1], [5], y RMSE para regresión [2], [4].

La evolución metodológica muestra progresión hacia enfoques híbridos [10] e incorporación de Big Data farmacéutico [4]. Random Forest (78%) ofrece equilibrio óptimo para farmacias pequeñas, mientras redes neuronales (85.3%) justifican complejidad solo con > 2000 productos y presupuestos > \$15,000 USD.

### 4.5. IMPLICACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES Y POLÍTICAS

Las implicaciones para investigación futura requieren estudios longitudinales > 24 meses evaluando sostenibilidad, análisis económicos específicos por contexto geográfico, y modelos colaborativos entre farmacias para optimización de cadenas de suministro regionales. La investigación debe priorizar contextos de recursos limitados donde estas tecnologías pueden generar mayor impacto social, desarrollando marcos específicos para farmacias rurales e implementaciones con presupuestos < \$5,000 USD.

Para políticas públicas, la reducción del 28.5% en desabastecimiento [1], [4], [37] sugiere que programas gubernamentales de digitalización farmacéutica constituyen intervenciones de salud pública efectivas. Los marcos normativos deben incluir incentivos fiscales para adopción tecnológica, programas de capacitación subsidiados, y

estándares de interoperabilidad que faciliten colaboración entre farmacias independientes. La evidencia económica (ROI 16-24 meses) [8], [16] justifica inversiones públicas en infraestructura compartida que reduzcan barreras de entrada para el sector independiente.

### CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática de 40 estudios determinó la eficiencia de técnicas de Machine Learning y Business Intelligence para optimizar inventarios farmacéuticos en farmacias pequeñas/medianas con recursos limitados, confirmando efectividad con mejoras del 30.5% en precisión predictiva respecto a métodos tradicionales, siendo las redes neuronales más efectivas (85.3% precisión) generando reducción del 28.5% en desabastecimiento y optimización del inventario en 25.7%. Con costos de implementación de \$2,500-45,000 USD y ROI de 16-24 meses, estas tecnologías demuestran viabilidad económica incluso en contextos de recursos limitados.

Más allá de beneficios técnicos, fomentan intraemprendimiento farmacéutico y transforman modelos de negocio tradicionales hacia centros de salud predictivos, generando nuevas fuentes de ingresos del 15-25%. Aunque 72% de farmacias independientes gestionan inventarios manualmente enfrentando barreras de capacitación técnica (58% del personal), esta primera revisión sistemática enfocada en este segmento establece evidencia sólida sobre viabilidad de tecnologías predictivas, representando una solución escalable que contribuye significativamente a la sostenibilidad económica y mejoramiento de la salud pública, requiriendo futuras investigaciones longitudinales y marcos normativos facilitadores.

### REFERENCIAS

- [1] R. Pall, Y. Gauthier, S. Auer, y W. Mowaswes, "Predicting drug shortages using pharmacy data and machine learning", *Health Care Manag. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 395-411, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10729-022-09627-y.
- [2] E. Ahmadi, H. Mosadegh, R. Maihami, I. Ghalekhondabi, M. Sun, y G. A. Süer, "Intelligent inventory management approaches for perishable pharmaceutical products in a healthcare supply chain", *Comput. & Oper. Res.*, vol. 147, p. 105968, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.cor.2022.105968.
- [3] S. Javid, A. Rahmanulla, M. G. Ahmed, R. Sultana, and B. R. Prashantha Kumar, "Machine learning & deep learning tools in pharmaceutical sciences: A comprehensive review," *Intell. Pharm.*, p. S2949866X24001199, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ipha.2024.11.003.
- [4] S. Imai, "Data-Driven Clinical Pharmacy Research: Utilizing Machine Learning and Medical Big Data," *Biol. Pharm. Bull.*, vol. 47, no. 10, pp. 1594-1599, Oct. 2024, doi: 10.1248/bpb.b24-00492.
- [5] M. Jahani et al., "Isfahan Artificial Intelligence Event 2023: Drug Demand Forecasting," *J. Med. Signals Sens.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.4103/jmss.jmss\_59\_24.
- [6] F. Mbonyinshuti, J. Nkurunziza, J. Niyobuhungiro, y E. Kayitare, "The Prediction of Essential Medicines Demand: A Machine Learning Approach Using Consumption Data in Rwanda", *Processes*, vol. 10, no. 1, p. 26, Dec. 2021, doi: 10.3390/pr10010026.
- [7] K. P. Fourkiotis and A. Tsadiras, "Applying Machine Learning and Statistical Forecasting Methods for Enhancing Pharmaceutical Sales Predictions," *Forecasting*, vol. 6, no. 1, pp. 170-186, Feb. 2024, doi: 10.3390/forecast6010010.
- [8] E. Saha y P. Rathore, "A smart inventory management system with medication demand dependencies in a hospital supply chain: A multi-agent reinforcement learning approach", *Comput. Ind. Eng.*, vol. 191, p. 110165, May 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110165.
- [9] H. Jessica, R. Britney, E.-D. Sarira, A. Parisa, Z. Joe, and C. Betty B, "Applications of artificial intelligence in current pharmacy practice: A scoping review," *Res. Soc. Adm. Pharm.*, vol. 21, no. 3, pp. 134-141, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.sapharm.2024.12.007.
- [10] D. S. Rammal, M. Alomar, and S. Palaian, "AI-Driven pharmacy practice: Unleashing the revolutionary potential in medication management, pharmacy workflow, and patient care," *Pharm. Pract.*, vol. 22, no. 2, pp. 1-11, Oct. 2024, doi: 10.18549/PharmPract.2024.2.2958.
- [11] Y. González-Pérez, A. Montero Delgado, and J. M. Martinez Sesmero, "[Translated article] Introducing artificial intelligence to hospital pharmacy departments," *Farm. Hosp.*, vol. 48, pp. TS35-TS44, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.farma.2024.04.001.
- [12] Mottaghi-Dastjerdi N, Soltany-Rezaee-Rad M. Advancements and Applications of Artificial Intelligence in Pharmaceutical Sciences: A Comprehensive Review. *Iran J Pharm Res.* 2024 Oct 15;23(1):e150510. doi: 10.5812/ijpr-150510.
- [13] K. Paranjape, M. Schinkel, and P. Nanayakkara, "Short Keynote Paper: Mainstreaming Personalized Healthcare-Transforming Healthcare through new era of Artificial Intelligence," *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, pp. 1-1, 2020, doi: 10.1109/JBHI.2020.2970807.
- [14] C. Sirois et al., "Exploring polypharmacy with artificial intelligence: data analysis protocol," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 21, no. 1, p. 219, Dec. 2021, doi: 10.1186/s12911-021-01583-x.
- [15] A. J. Oyejide, Y. A. Adekunle, O. D. Abodunrin, and E. O. Atoyebe, "Artificial intelligence, computational tools and robotics for drug discovery, development, and delivery," *Intell. Pharm.*, p. S2949866X25000097, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.ipha.2025.01.001.
- [16] F. G. Schmidt and R. Pibernik, "Data-driven inventory control for large product portfolios: A practical application of prescriptive analytics," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 322, no. 1, pp. 254-269, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.ejor.2024.10.012.
- [17] N. Amador-Fernández et al., "Identification of high-risk patients for referral through machine learning assisting the decision making to manage minor ailments in community pharmacies," *Front. Pharmacol.*, vol. 14, p. 1105434, Jul. 2023, doi: 10.3389/fphar.2023.1105434.
- [18] A. Martins, J. Vitorino, E. Maia, and I. Praça, "PharmiTech: Addressing Polypharmacy Challenges through AI-Driven Solutions," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 19, p. 8838, Oct. 2024, doi: 10.3390/app14198838.
- [19] J. G, S. R, G. H L, V. Ravi, M. Almeshari, and Y. Alzamil, "Electronic Health Record (EHR) System Development for Study on EHR Data-based Early Prediction of Diabetes Using Machine Learning Algorithms," *Open Bioinforma. J.*, vol. 16,

- no. 1, p. e187503622309010, Oct. 2023, doi: 10.2174/18750362-v16-e230906-2023-15.
- [20] R. A. Pulk et al., "Dynamic pharmacy leadership during the COVID-19 crisis: Optimizing patient care through formulary and drug shortage management," *Am. J. Health. Syst. Pharm.*, vol. 77, no. 22, pp. 1874–1884, Oct. 2020, doi: 10.1093/ajhp/zxaa219.
- [21] A. Martins, E. Maia, and I. Praca, "Herb–Drug Interactions: A Holistic Decision Support System in Healthcare," in 2022 IEEE International Conference on E-health Networking, Application & Services (HealthCom), Genoa, Italy: IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/HealthCom54947.2022.9982729.
- [22] J. Franco and D. Vizcaya, "Availability of secondary healthcare data for conducting pharmacoepidemiology studies in Colombia: A systematic review," *Pharmacol. Res. Perspect.*, vol. 8, no. 5, p. e00661, Oct. 2020, doi: 10.1002/prp2.661.
- [23] D. Urrunaga-Pastor, V. A. Benites-Zapata, and E. Mezones-Holguin, "Factors associated with self-medication in users of drugstores and pharmacies in Peru: an analysis of the National Survey on User Satisfaction of Health Services, ENSUSALUD 2015," *F1000Research*, vol. 8, p. 23, Jan. 2019, doi: 10.12688/f1000research.17578.1.
- [24] Y. Haoudi, M. A. Yazdani, D. Roy, y S. Hennequin, "Demand Prediction Based on Machine Learning Algorithms for Optimal Distribution of Insulin", *IFAC-Pap.OnLine*, vol. 56, no 2, pp. 10174-10179, 2023, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.893.
- [25] G. Lăzăroiu et al., "The economics of deep and machine learning-based algorithms for COVID-19 prediction, detection, and diagnosis shaping the organizational management of hospitals," *Oeconomia Copernic.*, vol. 15, no. 1, pp. 27–58, Mar. 2024, doi: 10.24136/oc.2984.
- [26] O. Abbassi, S. Ziti, M. Belhiah, S. N. Lagmiri, and Y. Zaoui Seghroucheni, "GMPP-NN: a deep learning architecture for graph molecular property prediction," *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, no. 7, p. 352, Jun. 2024, doi: 10.1007/s42452-024-05944-9.
- [27] A. R. Ashraf, A. Somogyi-Végh, S. Merczel, N. Gyimesi, and A. Fittler, "Leveraging code-free deep learning for pill recognition in clinical settings: A multicenter, real-world study of performance across multiple platforms," *Artif. Intell. Med.*, vol. 150, p. 102844, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.artmed.2024.102844.
- [28] M. H. Abdel Aziz, C. Rowe, R. Southwood, A. Nogid, S. Berman, and K. Gustafson, "A scoping review of artificial intelligence within pharmacy education," *Am. J. Pharm. Educ.*, vol. 88, no. 1, p. 100615, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ajpe.2023.100615.
- [29] T. Knight, B. May, D. Tyson, S. McAuley, P. Letzkus, and S. M. Enright, "Detecting drug diversion in health-system data using machine learning and advanced analytics," *Am. J. Health. Syst. Pharm.*, vol. 79, no. 16, pp. 1345–1354, Aug. 2022, doi: 10.1093/ajhp/zxac035.
- [30] "A Pharmacy System Integrated with A Machine Learning Algorithm for Cardiovascular Disease Prediction," *J. Angiother.*, vol. 8, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.25163/angiotherapy.819491.
- [31] M. Al-Mohaya, B. Mesut, A. Kurt, and Y. S. Çelik, "In silico approaches which are used in pharmacy," *J. Appl. Pharm. Sci.*, 2024, doi: 10.7324/JAPS.2024.154854.
- [32] W. Andrikyan et al., "Use of medication data alone to identify diagnoses and related contraindications: Application of algorithms to close a common documentation gap," *Br. J. Clin. Pharmacol.*, vol. 88, no. 12, pp. 5399–5411, Dec. 2022, doi: 10.1111/bcp.15469.
- [33] A. M. Abdelhaleem Ali and M. M. Alrobaian, "Strengths and weaknesses of current and future prospects of artificial intelligence-mounted technologies applied in the development of pharmaceutical products and services," *Saudi Pharm. J.*, vol. 32, no. 5, p. 102043, May 2024, doi: 10.1016/j.jpsps.2024.102043.
- [34] F. Kidwai-Khan, C. T. Rentsch, R. Pulk, C. Alcorn, C. A. Brandt, and A. C. Justice, "Pharmacogenomics driven decision support prototype with machine learning: A framework for improving patient care," *Front. Big Data*, vol. 5, p. 1059088, Nov. 2022, doi: 10.3389/fdata.2022.1059088.
- [35] G. Meknassi Salime, N. Bhirich, A. Cherif Chefchaoui, O. El Hamdaoui, S. El Baraka, and Y. Elalaoui, "Assessment of Automation Models in Hospital Pharmacy: Systematic Review of Technologies, Practices, and Clinical Impacts," *Hosp. Pharm.*, p. 00185787251315622, Feb. 2025, doi: 10.1177/00185787251315622.
- [36] N. Yalçın et al., "Development and validation of a machine learning-based detection system to improve precision screening for medication errors in the neonatal intensive care unit," *Front. Pharmacol.*, vol. 14, p. 1151560, Apr. 2023, doi: 10.3389/fphar.2023.1151560.
- [37] I. Liu et al., "Development and validation of a predictive model to predict and manage drug shortages," *Am. J. Health. Syst. Pharm.*, vol. 78, no. 14, pp. 1309–1316, Jul. 2021, doi: 10.1093/ajhp/zxab152.
- [38] F. Asperti et al., "Redesigning the Drugs Distribution Network: The Case of the Italian National Healthcare Service," *Systems*, vol. 12, no. 2, p. 56, Feb. 2024, doi: 10.3390/systems12020056.
- [39] I. Waltering, O. Schwalbe, and G. Hempel, "Identification of factors for a successful implementation of medication reviews in community pharmacies: Using Positive Deviance in pharmaceutical care," *Int. J. Clin. Pharm.*, vol. 44, no. 1, pp. 79–89, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11096-021-01315-1.
- [40] L. K. Overgaard, K. B. Johansen, J. R. Krumborg, M. L. Nielsen, M. M. H. Christensen, and S. A. Pedersen, "Pharmaceutical waste from a Danish hospital," *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.*, vol. 135, no. 4, pp. 499–511, Oct. 2024, doi: 10.1111/bcpt.14072.
- [41] V. Berger et al., "The impact of pharmacists' interventions within the Closed Loop Medication Management process on medication safety: An analysis in a German university hospital," *Front. Pharmacol.*, vol. 13, p. 1030406, Nov. 2022, doi: 10.3389/fphar.2022.1030406.
- [42] P. Zheng et al., "Pharmaceutical care model in precision medicine in China," *Farm. Hosp.*, vol. 47, no. 5, pp. 218–223, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.farma.2023.04.005.
- [43] G. Bulaj, J. Clark, M. Ebrahimi, and E. Bald, "From Precision Metapharmacology to Patient Empowerment: Delivery of Self-Care Practices for Epilepsy, Pain, Depression and Cancer Using Digital Health Technologies," *Front. Pharmacol.*, vol. 12, p. 612602, Apr. 2021, doi: 10.3389/fphar.2021.612602.
- [44] S. Freeman-Muhammad et al., "Impact of connected dispensing technology with advanced analytics in a multicenter health system," *Am. J. Health. Syst. Pharm.*, vol. 81, no. 23, pp. e760–e769, Nov. 2024, doi: 10.1093/ajhp/zxae198.
- [45] H. Allam, "Prescribing the Future: The Role of Artificial Intelligence in Pharmacy," *Information*, vol. 16, no. 2, p. 131, Feb. 2025, doi: 10.3390/info16020131.