

REDISTRIBUCIÓN DEL ALMACÉN PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN LA
PREPARACIÓN DE PEDIDOS MEDIANTE ANÁLISIS ABC/XYZ Y DATOS
OPERATIVOS.

JAIME ANDRÉS MOLINA MORENO

Modalidad: Profundización
Estudio de caso – Enfoque cuantitativo aplicado

Asesor
Sergio Augusto Ramírez Echeverri

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

Agradecimientos

En primer lugar, quiero mostrar mi más especial agradecimiento a mi familia, igualmente a mis padres, mi madre y mi padre, por su amor incondicional y su apoyo continuo, por ser el pilar emocional que aguantó durante este proceso. Agradezco con toda mi alma a mi señora y mi hija, su comprensión, su paciencia y su apoyo en los momentos más difíciles; su ayuda ha sido una fuente incesante de motivación y de equilibrio durante este recorrido.

A continuación, quiero hacer una mención muy especial al profesor Juan Gregorio Arrieta Posada, cuya finalidad experiencia y conocimiento en la parte del estudio de almacenamiento y logística fueron claves para el encauzamiento y el desarrollo de este trabajo de grado. Su predisposición, criterio técnico y cercanía hicieron una gran diferencia en el giro de esta indagación. También agradezco al profesor Sergio Augusto Ramírez Echeverri, por su acompañamiento académico de gran valor, por su claridad metodológica y su apoyo en la continuidad del proceso.

De igual manera, agradezco a la empresa industrial objeto de estudio, la cual me permitió acceder a su información operativa con autonomía y confianza para llevar a cabo este trabajo en sus instalaciones e igualmente quiero mostrar mi agradecimiento al Gerente General, por su continuo apoyo y por entregarme los medios para esto.

Quiero agradecer al equipo operativo del Centro de Distribución sede Medellín, por su disposición, su cooperación en la validación del modelo propuesto, por compartir su conocimiento práctico, lo que enriqueció significativamente la aplicabilidad de esta investigación.

A todos, gracias por ser parte importante de este logro.

CONTENIDO

0. INTRODUCCION.....	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. JUSTIFICACION.....	12
3. OBJETIVOS.....	14
3.1. OBJETIVO GENERAL	14
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	14
4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	15
4.1. ROL DE LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN EN LA EFICIENCIA OPERATIVA.....	15
4.2. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE <i>LAYOUT</i> EN ALMACENES	15
4.3. CLASIFICACIÓN ABC APLICADA AL INVENTARIO	16
4.4. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS XYZ.....	17
4.4.1. Clasificación Típica XYZ.....	18
4.5. COMBINACIÓN ABC/XYZ.....	19
4.6. HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS APLICADAS.....	20
4.7. DISEÑO Y CONTROL DE <i>LAYOUT</i> : ESTADO DEL ARTE	21
4.8. ESTADO DEL ARTE: APLICACIONES REALES DEL MODELO ABC/XYZ	23
4.8.1. Aplicaciones en el Sector Farmacéutico.....	23
4.8.2. Aplicaciones en la Industria de Repuestos y Manufactura.....	24
4.8.3. Aplicaciones en Logística de Consumo Masivo y <i>Retail</i>	24
4.8.4. Alineación con el Presente Proyecto.	24
5. METODOLOGÍA.....	26
5.1. DISEÑO METODOLÓGICO	26
5.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	27
5.3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	29
5.4. CLASIFICACIÓN ABC/XYZ Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.....	30

5.5. REDISTRIBUCIÓN DEL <i>LAYOUT</i>	31
5.6. ANÁLISIS DE INDICADORES LOGÍSTICOS DERIVADOS.....	33
5.6.1. Análisis de Líneas por Pedido.	33
5.6.2. Tiempo Promedio de <i>Picking</i> Diario.	34
5.6.3. Comparativo entre Pedidos Solicitados y Procesados.	34
5.6.4. Distribución entre Almacenamiento y <i>Cross Docking</i>	35
5.6.5. Simulación de Escenarios de Mejora Operativa.	35
5.7. VALIDACIÓN OPERATIVA Y CONSISTENCIA DEL MODELO.....	36
6. RESULTADOS	38
6.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL INVENTARIO.....	38
6.2. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN ABC/XYZ	39
6.3. ANÁLISIS DE INDICADORES LOGÍSTICOS	41
6.3.1. Tipología de Pedidos Solicitados por Número de Líneas.....	41
6.3.2. Comparativo entre Pedidos Solicitados y Procesados.	42
6.3.3. Simulación de Escenarios Operativos.	44
6.3.4. Análisis de Almacenamiento vs <i>Cross Docking</i>	45
6.4. VISUALIZACIÓN DEL <i>LAYOUT</i>	47
6.4.1. <i>Layout</i> Actual Distribución por Clasificación ABC/XYZ.....	47
6.4.2. <i>Layout</i> Redistribuido Reorganización Técnica.....	49
6.4.3. Impacto Cuantitativo de la Redistribución.	51
6.5. ARCHIVOS EXPORTADOS Y UTILIDAD OPERATIVA	52
6.6. SÍNTESIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES.....	54
7. CONCLUSIONES.....	56
8. RECOMENDACIONES	58
8.1. RECOMENDACIONES OPERATIVAS	58
8.2. RECOMENDACIONES TÁCTICAS.....	58

8.3 RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS.....	59
REFERENCIAS	60
ANEXOS	63

LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Esquemas de Diseño de <i>Layout</i> en Centros de Distribución.....	16
Fig 2. Curva de Pareto para Clasificación ABC de Referencias.	17
Fig 3. Dispersión de Referencias Según su CV, con Líneas Guía para X, Y y Z.	19
Fig 4. Comparación entre Layout sin Segmentación Estratégica y Redistribución Basada en Clasificación ABC.....	23
Fig 5. Flujo Metodológico Aplicado en el Proyecto.	27
Fig 6. Distribución ilustrativa por clasificación ABC/XYZ.....	31
Fig 7. Redistribución ilustrativa del <i>layout</i> logístico con bloques de estantería.	33
Fig 8. Distribución ABC/XYZ por Valor Económico.....	40
Fig 9. Distribución ABC/XYZ por Frecuencia de Salida.....	40
Fig 10. Distribución de Pedidos Solicitados Según Número de Líneas.	42
Fig 11. Comparativo Diario: Pedidos Solicitados Vs Pedidos Procesados.	43
Fig 12. Distribución de Referencias por Modalidad Operativa (Cantidad).....	46
Fig 13. Distribución del Valor Económico por Modalidad Operativa.	47
Fig 14. <i>Layout</i> Actual Clasificación ABC/XYZ por Valor.....	48
Fig 15. <i>Layout</i> Actual Clasificación ABC/XYZ por Frecuencia.	49
Fig 16. <i>Layout</i> Redistribuido Enfoque: Clasificación ABC/XYZ por Valor.	50
Fig 17. <i>Layout</i> Redistribuido Enfoque: Clasificación ABC/XYZ por Frecuencia.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz Combinada ABC/XYZ: Interpretación Logística y Políticas Recomendadas	20
Tabla 2. Archivos Procesados y Propósito	28
Tabla 3. Interpretación Logística de las Categorías ABC/XYZ.....	30
Tabla 4. Indicadores Generales del Inventario y Operación Logística.....	39
Tabla 5. Clasificación De Referencias Bajo Modelos ABC y XYZ	41
Tabla 6. Distribución Porcentual de Pedidos Solicitados Según Número de Líneas	42

Tabla 7. Indicadores de Cobertura y Desempeño Operativo.....	43
Tabla 8. Resultados de la Simulación de Escenarios Operativos.....	45
Tabla 9. Distribución entre Almacenamiento y <i>Cross Docking</i>	46
Tabla 10. Distancia Promedio por Tipo de Pedido y Mejoras tras la Redistribución	52
Tabla 11. Archivos Exportados desde el Modelo.....	53
Tabla 12. Anexos.....	63

Resumen

Este trabajo de tesis propone un método para mejorar la eficiencia logística en empresas del sector industrial, a partir de minimizar los recorridos operativos y aumentar la productividad en la preparación de pedidos. A tal fin, la solución planteada es un análisis ABC/XYZ sobre datos históricos extraídos del sistema ERP de la empresa objeto de estudio, que tienen en cuenta, tanto el valor económico de las referencias, como su frecuencia de movimiento. Dicho tratamiento fue automatizado a través de una plantilla en Python, ejecutada en Google Colab, que permite calcular métricas como el tiempo medio por *picking*; el número de líneas por pedido y la distribución de referencias adoptando diferente modalidad operativa (almacenamiento o *cross docking*). El núcleo de la propuesta es la redistribución técnica del *layout* de almacenamiento, de forma tal que éstas se ubiquen en zonas de alta accesibilidad y se reduzcan los metros recorridos por pedido. Se simulan diferentes escenarios de mejora de la eficiencia operativa para predecir los crecimientos en la capacidad diaria sin incrementar el personal. Como resultado se obtiene una reducción del 13,7% en las distancias promedio por pedido y una reducción por encima del 50% del coste por operación en aquellos escenarios de mejora del 30%. El modelo propuesto es replicable, trazable y con un alto grado de compatibilidad con herramientas de gestión del tipo WMS, y aporta resultados tangibles para optimizar los procesos logísticos relativos a centros de distribución.

Palabras clave: *Logística de almacenes, análisis ABC/XYZ, eficiencia operativa, preparación de pedidos, layout de almacenamiento, análisis de datos, Google Colab, Python, centros de distribución, optimización logística.*

0. INTRODUCCION

Los centros de distribución (CEDIs) cumplen funciones estratégicas de consolidación, organización y manejo de inventario, influyendo directamente en la preparación de pedidos y en la calidad del servicio [1]. De ahí su importancia e incidencia notable en la competitividad logística de las empresas, más aún, cuando se trata de escenarios con alta variabilidad de referencias y con tiempos de respuesta exigentes [2].

A medida que la cartera de productos aumenta, también lo hace la complejidad del sistema de almacenamiento, lo que trae consigo limitaciones en la priorización de posicionamientos, en la rotación de inventario y en la producción de rutas de *picking* eficientes [3]. Para solucionar estos problemas, resultan pertinentes las metodologías de segmentación como la clasificación ABC y el análisis XYZ, las cuales han demostrado ser útiles en la toma de decisiones logísticas [4], [5]. La clasificación ABC utiliza el principio de Pareto como base y tiene como objetivo ordenar las referencias en función del impacto acumulado en variables como son el valor económico o la frecuencia de movimiento. Por su parte, el análisis XYZ permite evaluar la estabilidad de la demanda de acuerdo con el coeficiente de variación y clasificar así las referencias, dependiendo de su comportamiento operativo [4], [5]. La combinación de ambos modelos permite construir una matriz logística que contribuye a la asignación estratégica de ubicaciones, al diseño del *layout* y a la definición de políticas diferenciadas de control de inventario [3].

El presente trabajo de grado responde a la necesidad de mejorar el sistema de almacenamiento del CEDI sede Medellín de una empresa industrial colombiana. A pesar de que la operación cuenta con un sistema ERP para registrar las ubicaciones, las ventas y los movimientos diarios, no contaba al iniciar el año 2025 con una metodología formal, fundamentada en datos, que permitiese actualizar la estructura del *layout* con criterios técnicos. Ante esta situación, se formuló el objetivo de disminuir los metros promedio recorridos por pedido y aumentar la cantidad de pedidos atendidos diariamente, sin modificar la infraestructura física ni ampliar el número de personas disponibles.

El análisis se realizó a partir de datos históricos obtenidos directamente del sistema ERP institucional desde enero de 2024 hasta abril de 2025. Para realizarlo, se implementó una plantilla computacional en Python [6], utilizando bibliotecas como *pandas* y *numpy* [7], ejecutándose en el entorno colaborativo Google *Colab* [8]. Esta herramienta facilitó la

automatización de los cálculos, las clasificaciones ABC/XYZ, así como las visualizaciones del comportamiento logístico y la distribución física del almacén.

Aparte de la segmentación de las referencias, se tomaron como ítems más relevantes indicadores operativos como el promedio de líneas por pedido, el tiempo estimado por operación de *picking*, la distribución por tipo de pedido y la proporción de las referencias almacenadas en comparación con aquellas gestionadas de acuerdo con el *cross docking*. De acuerdo a los resultados, se diseñó una redistribución técnica del *layout*, priorizando referencias muy críticas (AX, AY) más próximas a las zonas de preparación, así como el libre posicionamiento de referencias críticas (CZ, BZ) más distantes -por ubicaciones periféricas [9].

La validación de la propuesta se realizó con el equipo operativo del centro de distribución, proceso en el cual se confrontó el modelo técnico con el conocimiento empírico del personal operativo. Esta validación de las recomendaciones, así como su concreción, permitió la modificación de algunas de ellas y reforzar la viabilidad práctica de dicho proyecto de rediseño. Como resultado se obtiene una disminución de hasta un 13,7% de la distancia media de cada pedido y la posibilidad de procesar el mismo volumen diario de trabajo, pero con menor número de operarios por jornada, lo que implica una disminución de los costes unitarios por operación.

Cabe anotar que la metodología ha sido utilizada en otras situaciones, es fácil de replicar y de actualizar con nuevas aportaciones, por lo que resulta útil para centros de distribución que deseen mejorar sus procesos de preparación de pedidos.

La investigación se estructura en la modalidad de profundización, de dirección cuantitativa-aplicada y dentro de los parámetros que define Universidad EAFIT para investigar en ingeniería [10]. Se aplican las normas de citación IEEE y se tiene en cuenta el correspondiente formato institucional [11], [12].

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los centros de distribución (CEDI), el rendimiento que alcanzan los procesos de preparación y envío de los pedidos depende fundamentalmente de la organización física de la actividad. Si la disposición del inventario es crítica, la asignación de ubicaciones inadecuada y se carece de criterios técnicos para la asignación de referencias, pueden generarse recorridos superfluos, mayores tiempos de preparación y un aprovechamiento ineficiente del recurso humano [1], [2].

El uso de herramientas computacionales como *python* y *google colab* permite automatizar, tanto el procesamiento de grandes volúmenes de datos, como la generación de clasificaciones, simulaciones y visualizaciones logísticas con bajo coste de trazabilidad [6], [8]. Para ese contexto técnico, incluso decisiones como la redistribución del inventario se pueden basar en evidencias reales en lugar de criterios empíricos.

Diversos estudios han demostrado que la combinación de herramientas como la ABC y el análisis XYZ, aplicadas a datos históricos, permite definir el portafolio de referencias en función de su criticidad logística o tipo de comportamiento operativo [4], [5]. La segmentación de las referencias es crucial para rediseñar el *layout* de un almacén a partir de criterios de tipo técnico y objetivos, toda vez que se debe decidir si el criterio a seguir será ubicar en las zonas de alta accesibilidad las referencias de mayor impacto, o si, por el contrario, se ubicarán allí las referencias de menor rotación [9].

El presente trabajo plantea un modelo técnico que permita reducir los metros recorridos por los operarios y aumentar la cantidad de pedidos que se procesan diariamente mediante el rediseño del *layout* del CEDI a partir de la combinación análisis ABC/XYZ, el cálculo de los indicadores logísticos que se derivan de ellos o bien la simulación de distintos escenarios operativos.

En lo que respecta al CEDI de la sede Medellín de una empresa industrial colombiana, la organización actual del inventario responde a criterios empíricos, es decir, que no ha sido estructurada con base en datos, ni estudio alguno. Aunque el sistema ERP institucional prevea el registro de las posiciones físicas de los productos, es necesario la implementación de una metodología técnica que contemple variables tales como la frecuencia de movimiento, el valor económico de las referencias o la estabilidad operativa de las mismas, ya que estas son

fundamentales para optimizar los recorridos internos y, en general, el proceso de preparación de pedidos [3].

El trabajo de preparación de pedidos se desarrolla con un equipo de seis operarios dedicados al *picking* y los cuales han de procesar a diario un volumen de más de 200 pedidos de muy diversas referencias. Pese a que existen herramientas básicas como el ERP, la carencia de un WMS o sistemas formales de priorización logística trae como consecuencia una asignación aleatoria de ubicaciones, determinada en gran medida por el saber empírico de las personas. Esto da lugar a recorridos internos muy largos, aglomeración de tráfico en puntos determinados y sobrecarga operativa en periodos de alta demanda. Esta situación conlleva, además, problemas de tipo operativo como el embotellamiento de zonas de preparación, la dificultad para consolidar productos de baja rotación y una dependencia excesiva del conocimiento tácito del equipo operativo. Todas estas situaciones tienen efectos sobre la eficiencia del *picking*, disminuyen la capacidad diaria de atención de pedidos y generan un aumento en el coste por operación.

La solución propuesta no requiere realizar inversiones en infraestructura ni en tecnologías de punta, sino utilizar de manera estructurada los datos disponibles en el sistema ERP, así como el uso de principios logísticos probados en la literatura científica. Con ello pretendemos demostrar que, con decisiones fundamentadas por los datos, priorización técnica del inventario y un modelo que puede ser replicado en otros centros de distribución que compartan similares características, se puede lograr una operación más eficaz.

Pregunta de investigación: ¿Cómo puede reducirse la distancia promedio recorrida en el *picking* y aumentar la productividad operativa mediante el rediseño del *layout* basado en datos logísticos?

2. JUSTIFICACION

Las instalaciones de almacenamiento cumplen una función relevante respecto a la competitividad logística, especialmente en referencias de gran heterogeneidad y con gran exigencia en tiempos de respuesta, los CEDIs se usan para agrupar mercancía, mejorar los flujos internos, así como para garantizar el cumplimiento de los estándares de servicios [1], [13].

En operaciones industriales con portafolios extensos es habitual que las decisiones acerca de la ubicación de productos se fundamenten en criterios históricos o empíricos y ello puede ser válido, pero limita la trazabilidad, la eficacia de la operación y su capacidad de adaptación a la variabilidad de la demanda [2], [14]. La ausencia de políticas estructuradas de clasificación y reubicación puede llevar a recorridos excesivos, congestionamientos en zonas estratégicas, *picking* aún más altos de lo deseado e, inclusive, dificultades en la consolidación de las referencias menos salientes [3], [15].

La literatura científica avala la utilización de modelos de segmentación como el ABC y el XYZ como base de fortalecimiento del sistema de almacenamiento. El modelo ABC es una forma de clasificar productos de acuerdo con su importancia acumulativa, ya sea por valor, frecuencia o volumen. El análisis XYZ, por su parte, es un modelo para clasificar productos en función de la estabilidad de la demanda y usa como criterio principal el coeficiente de variación (CV) [4], [5], [16]. La combinación de ambos permite determinar políticas diferenciadas de ubicación, reabastecimiento, rotación, frecuencia de revisión, e incluso estrategias de eliminación de obsoletos [17], [18].

Distintos trabajos han verificado que la combinación ABC/XYZ, aplicada sobre datos reales, mejora los indicadores relativos a la productividad del *picking*, la exactitud del inventario y la disminución de costos de transporte interno [19], [20]. Además, facilita la priorización de las zonas logísticas en función de la criticidad operativa, siendo muy útil en contextos de crecimiento de la demanda o de restricción de espacio físico [21].

Este trabajo utiliza el modelo ABC/XYZ como herramienta analítica y de mejora, aplicándolo tanto por frecuencia, como por valor de las salidas por ventas con el fin de analizar el inventario desde dos aspectos que se complementan: operativa y económicamente. La clasificación se implementó a través de la plantilla realizada en Python [6], que se ejecutó en *Google Colab* [8], utilizando librerías como *pandas*, *numpy* o *matplotlib*, todo ello para poder automatizar el análisis y generar visualizaciones dinámicas [7]. Este tipo de solución

computacional ha sido promovida como buena práctica en proyectos logísticos apoyados por herramienta de ciencia de datos [22], [23].

A diferencia de los planteamientos estáticos, la plantilla ha sido concebida para ser actualizada y para que permita ajustar los datos en tiempo real a medida que éstos cambian. Además, se agruparon métricas complementarias de interés como, por ejemplo: número medio de líneas por pedido, tiempo estimado de *picking* por jornada, análisis de distribución de tipos de pedido, reparto de las distintas referencias en función de la forma de operar, en términos del almacenamiento o del *cross docking*.

Los resultados fueron validados con el equipo operativo con el fin de contrastar la salida técnica del modelo con el conocimiento empírico del equipo, generando un proyecto aplicable, consensuado y replicable en otras sedes de la organización. Esta validación cruzada entre datos y experiencia ha sido referida como una estrategia eficaz para garantizar la sostenibilidad de los modelos logísticos en la realidad [24], [25].

Finalmente, esta propuesta responde a los principios de investigación aplicada establecidos por la Universidad EAFIT [10], y se ajusta a los retos actuales de la ingeniería logística moderna, combinando metodologías cuantitativas y herramientas digitales. El modelo puede ser implementado en cualquier centro de distribución que maneje alta variedad de referencias y necesite robustecer los procesos de toma de decisiones operativas.

En conclusión, este proyecto genera valor al probar que la mejora de la eficiencia operativa de un centro de distribución se puede conseguir, reduciendo recorridos y aumentando productividad, mediante una metodología replicable, económica y técnicamente validada.

3. OBJETIVOS

En esta investigación se estudia un caso práctico logístico en el CEDI (Centro de Distribución) de Medellín (Colombia) perteneciente a una empresa que opera en el sector industrial colombiano, con el propósito de determinar el posible impacto de una redistribución del *layout* en un centro logístico industrial, a partir de la clasificación ABC/XYZ y análisis de datos logísticos, sobre la cualificación del proceso de preparación de pedidos. El trabajo se realiza a partir de datos reales, tomados del propio sistema ERP corporativo, que serán tratados mediante herramientas informáticas para detectar oportunidades de mejora, valorar el impacto de los recorridos actuales y proyectar escenarios bajo distintas modalidades de *layout*.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la contribución del análisis de datos y de la segmentación ABC/XYZ, en la mejora operacional del proceso de preparación de pedidos, a partir de una redistribución del *layout*

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Recolectar y sistematizar los históricos de ventas, *picking* y *layout* del centro de distribución con el fin de configurar una base operativa confiable para el análisis.
- Aplicar una clasificación ABC/XYZ para calcular indicadores logísticos relevantes como líneas promedio por pedido, tiempos estimados por operación, cobertura diaria, proporción de referencias administradas por almacenamiento o *cross docking*.
- Diseñar y evaluar la redistribución técnica del *layout* a partir de criterios técnicos.
- Simular diferentes escenarios operativos para estimar mejoras en productividad interna y recorridos internos.
- Entregar recomendaciones logísticas aplicables, con base en los resultados que aporten a los procesos de toma de decisiones del centro de distribución.

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

La eficiencia aplicada a los centros de distribución supone tener un buen conocimiento, tanto del cuerpo teórico de los principios logísticos que regulan el comportamiento de los stocks y el diseño del *layout*, como de las herramientas de análisis que proporcionan información para la evaluación y la proyección de las mejoras. Este capítulo presenta los aspectos teóricos y el estado del arte relacionados con la clasificación por ABC/XYZ, el diseño físico de almacenes, y las metodologías utilizadas en los entornos logísticos similares.

A este fin, se revisa en la literatura científica reciente, diversas aplicaciones del modelo aplicado en esta investigación, así como las teorías que sustentan el análisis. Se incluyen, además, esquemas y gráficos que representan las decisiones logísticas basadas en datos.

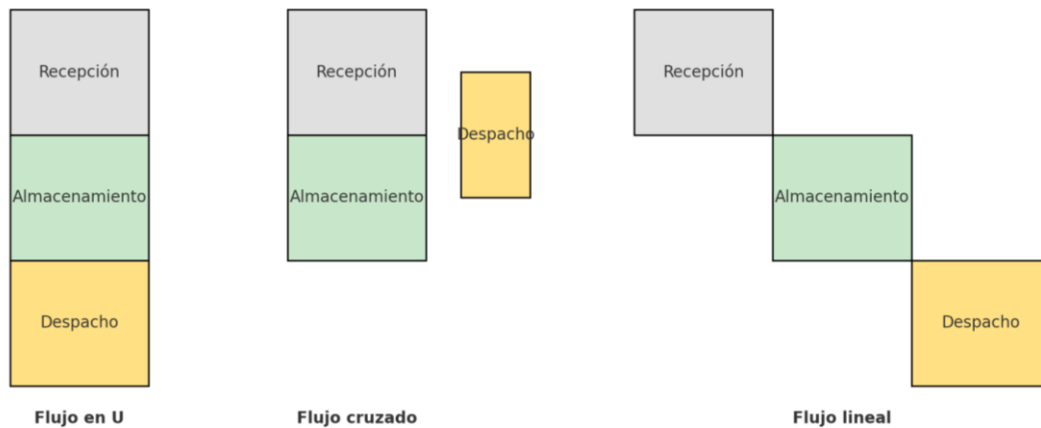
4.1. ROL DE LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN EN LA EFICIENCIA OPERATIVA

Los centros de distribución (CEDI) tienen una función muy importante en la cadena de suministro, porque son los responsables del inventario, de la preparación de pedido y de hacer el seguimiento del flujo de mercancía [1], [2]. En la gran mayoría de las empresas industriales, factores físicos de diseño del CEDI y lógicas de almacenamiento, como la ocupación del espacio y el cumplimiento de los niveles de performance con un alto grado de diversidad de referencias, serán determinantes para el desempeño diario de las operaciones de *picking* [3], como ocurre evidentemente.

4.2. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE *LAYOUT* EN ALMACENES

El diseño del *layout* logístico establece la organización física de las zonas operativas: la de almacenamiento, la de preparación, la de recepción y la de despacho. Su diagramación condiciona los recorridos internos, los puntos de estrangulación y la rapidez con que se puede tratar un pedido. Hay varios esquemas típicos, el de “U” o de flujo cruzado, lineal o radial, que son seleccionados en función del tipo de operación, volumen, rotación y espacio disponible [13], [14], [15].

Fig 1. Esquemas de Diseño de *Layout* en Centros de Distribución.



Esquemas de layout típicos en centros de distribución: flujo en U, flujo cruzado y flujo lineal. Cada diseño afecta los recorridos internos y la eficiencia del picking. Elaboración propia.

En la situación analizada, la disposición del almacén responde al modelo de *layout* de flujo cruzado, donde hay espacios fijos, zonas dispuestas de cierta forma para cada una de las actividades relacionadas con el ingreso, la preparación y el despacho. La redistribución de las referencias debe considerar no solo su rotación, sino la situación relativa a estos nodos logísticos.

4.3. CLASIFICACIÓN ABC APLICADA AL INVENTARIO

La clasificación ABC es una técnica utilizada en la gestión de inventarios para organizar las referencias en función de su impacto acumulado sobre una variable decisiva - valor económico, frecuencia de salida, volumen físico [4], [5] - que, fundamentada en el principio de Pareto, otorga el peso específico que demuestra que una pequeña fracción de los ítems suele suponer la mayor parte del valor total gestionado [16].

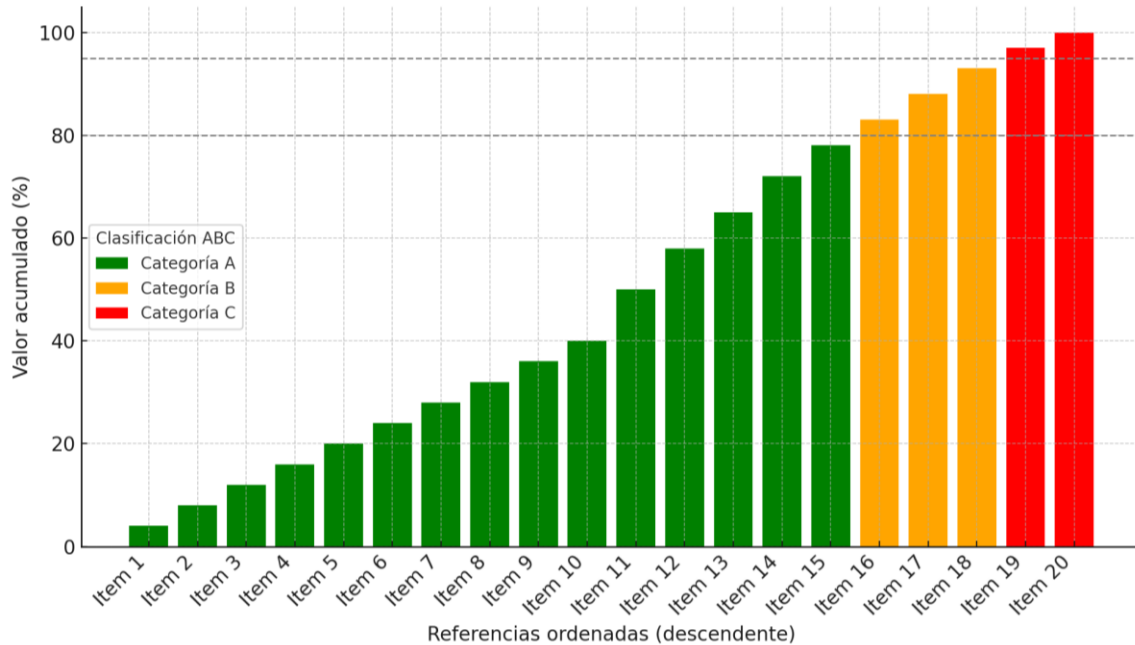
La clasificación se lleva a cabo generalmente en función de las siguientes categorías:

- Categoría A. Ítems de gran importancia que suponen el 70 - 80 % del valor acumulado, siendo sólo un 10 - 20 % del total de referencias.
- Categoría B. Ítems de impacto intermedio (15 - 25 % valor) con volumen representativos de referencias.

- Categoría C. Ítems de baja importancia (5 - 10 % del total valor) que pueden representar hasta el 50 % o más del total de ítems en inventario.

Esta segmentación de los ítems permite una toma de decisiones diferenciada en lo que respecta a la ubicación, a la frecuencia de revisión, al nivel de servicio y la controlabilidad de las operaciones. Por ejemplo, las referencias tipo A se localizan generalmente en zonas de alto acceso, en zonas de alta rotación y con mayor control, mientras que las referencias tipo C pueden ser revisadas de forma menos frecuente y se localizan en zonas perimetrales [17].

Fig 2. Curva de Pareto para Clasificación ABC de Referencias.



Visualización de la distribución acumulada del valor de las referencias ordenadas desde la mayor hasta la de menor impacto. Se representan cortes estándar de clasificación ABC por medio de las líneas guía, el límite para A supone hasta el 80 %, para B está entre 80-95 %, y el umbral de clasificación C se ubica por encima del 95 %. Fuente: elaboración propia a partir de datos de simulación.

4.4. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS XYZ

El análisis XYZ es una técnica estadística aplicada en la gestión de inventarios para determinar la clasificación de los productos según la estabilidad de la propia demanda, en el tiempo. Si la clasificación ABC se da para el análisis con características que establecen el impacto acumulativo de los ítems (por valor, volumen, frecuencia de paso, etc.), el análisis XYZ permite identificar los productos con comportamiento estable, variable o errático. Importante para la definición de las políticas o procedimientos de ubicación, abastecimiento, conteo cíclico y rotación [2], [4], [5]. La base del modelo XYZ es el coeficiente de variación (CV), y el mismo se define como:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Donde:

- σ es la desviación estándar del número de unidades despachadas por día.
- μ es igual al promedio diario de despachos.

El indicador CV es sensible al comportamiento relativo y permite establecer comparaciones entre referencias de diferentes niveles de movimiento, ya que un CV bajo indica estabilidad y un CV alto variabilidad o irregularidad en la salida [16], [18].

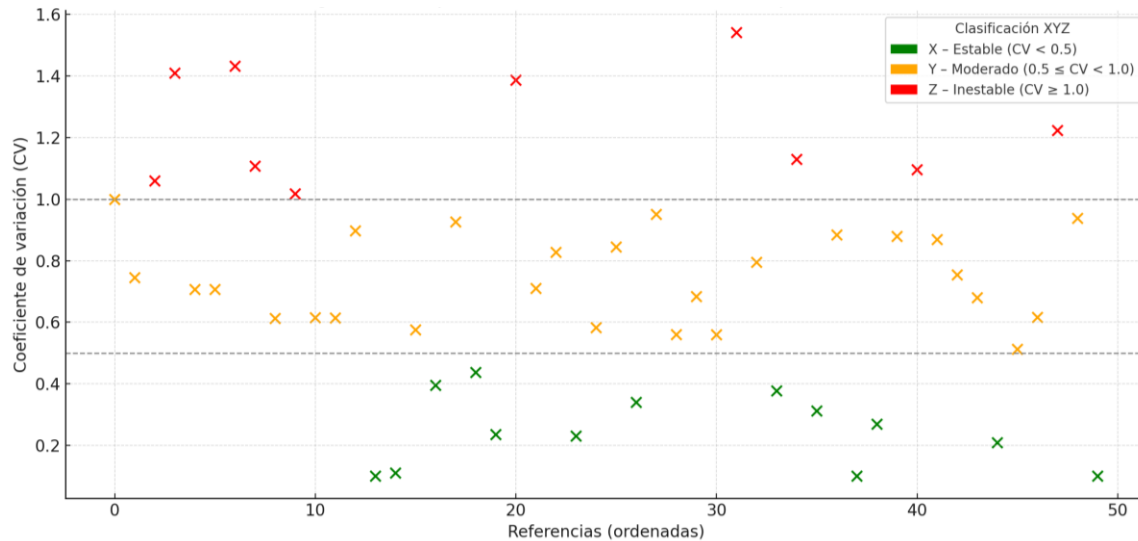
4.4.1. Clasificación Típica XYZ.

Como se ha expuesto en la revisión de la literatura, la clasificación XYZ normalmente se entiende con los siguientes escalones:

- Categoría X: $CV < 0.5 \rightarrow$ comportamiento estable
- Categoría Y: $0.5 \leq CV < 1.0 \rightarrow$ variabilidad intermedia
- Categoría Z: $CV \geq 1.0 \rightarrow$ comportamiento inestable o errático

La clasificación XYZ permite generar políticas distintas en función del riesgo logístico asumido por cada tipo de referencia. Por ejemplo, el tipo de productos X se puede priorizar para almacenamiento accesible o reaprovisionamiento continuo; mientras que el tipo de productos Z puede llegar a ser revisado con una frecuencia más puntual o incluso consolidado por baja trazabilidad [3], [17], [19]. Distintos autores han mostrado que la aplicación del análisis XYZ, en logística industrial, farmacéutica o de consumo masivo, son útiles para mejorar la planificación del inventario, reducir la probabilidad de costes adicionales por exceso de inventario o caducidad del mismo y facilitar decisiones de racionalización del portafolio [20], [21]. En el caso objeto de estudio, el CV se calculó para cada referencia con los datos diarios registrados desde el mes de enero del 2024 hasta el mes de abril del 2025. Con el objetivo de garantizar una base estadística mínima, se consideraron solo las referencias con movimientos registrados en un lapso temporal de tres días movimientos. Posteriormente, se asoció la categoría XYZ a cada referencia válida para la construcción de la matriz ABC/XYZ, que serviría de base para la criticidad logística y el rediseño de la configuración del sistema de almacenamiento.

Fig 3. Dispersión de Referencias Según su CV, con Líneas Guía para X, Y y Z.



Visualización del comportamiento estadístico de las referencias según su coeficiente de variación (CV). Se identifican tres zonas correspondientes a las categorías X, Y y Z, utilizadas para clasificar la estabilidad de las salidas. Fuente: elaboración propia a partir de datos simulados.

4.5. COMBINACIÓN ABC/XYZ

La combinación de los modelos ABC y XYZ da lugar a una matriz logística de 9 celdas, donde cada referencia es clasificada de acuerdo a dos dimensiones: el impacto acumulado (valor o frecuencia) y la estabilidad operativa (coeficiente de variación). Efectivamente, esta matriz permite tomar decisiones de gestión de inventarios, de diseño del *layout* y de asignación de políticas de control logístico [2], [3], [4].

La matriz ABC/XYZ es una cuadrícula 3×3 que da lugar a las 9 categorías combinatorias: AX, AY, AZ, BX, BY, BZ, CX, CY y CZ que reflejan un distinto nivel de criticidad logística que es gestionada con estrategias adaptadas al comportamiento real del inventario [5], [17].

Tabla 1. Matriz Combinada ABC/XYZ: Interpretación Logística y Políticas Recomendadas

<i>Categoría</i>	<i>Interpretación</i>	<i>Política logística recomendada</i>
<i>AX</i>	Alta rotación y estable	Ubicación prioritaria, acceso rápido, alta reposición
<i>AY</i>	Alta rotación con variabilidad	Control intermedio, monitoreo frecuente
<i>AZ</i>	Alta rotación e inestable	Mayor atención y control riguroso
<i>BX/BY</i>	Rotación media	Ubicación secundaria, revisión periódica
<i>BZ</i>	Media rotación y errática	Bajo volumen, consolidación o monitoreo
<i>CX</i>	Baja rotación, pero estable	Ubicación periférica, baja prioridad
<i>CY</i>	Baja rotación y variable	Revisión eventual, consolidación
<i>CZ</i>	Baja rotación y alta inestabilidad	Candidatas a eliminación, reubicación o consignación

Fuente: elaboración propia con base en literatura técnica sobre clasificación de inventario [3], [5], [17].

Esta segmentación específica, impacta sobre la dotación de espacio que no es igual para todas las ubicaciones, sino que responde a unos determinados criterios numéricos y ajustados a cada referencia. Estudios recientes exponen que la utilización de esta matriz consigue mejorar el rendimiento en los recorridos internos, reducción de los tiempos de *picking* y definición de las zonas de consolidación, de alta demanda o de productos con menor movimiento [18], [19], [20].

En caso objeto de estudio y con el fin de observar las diferentes perspectivas complementarias, la matriz ABC/XYZ se aplicó desde las perspectivas del valor económico y de la frecuencia de salida. Esta doble clasificación hizo posible plantear una propuesta de *layout* basada en un criterio logístico, donde los elementos AX y AY han de encontrarse en las ubicaciones más cercanas a la preparación, desplazando los elementos CZ a zonas extremas o de baja intervención.

4.6. HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS APLICADAS

En los últimos tiempos, gracias a los avances de herramientas computacionales de código abierto, el desarrollo de soluciones logísticas sustentadas en análisis de datos es un hecho relevante. Lenguajes como Python, asociados a entornos colaborativos como *Google Colab*, permiten la construcción de modelos complejos de clasificación y visualización de la logística a bajo coste y alta replicabilidad [6], [8], [22].

Python ha tenido una buena trayectoria en el marco de proyectos de analítica de logística ya que es un código amigable para los usuarios y presenta un ecosistema robusto de librerías científicas. En este proyecto se han utilizado:

- Pandas: para estructurar y transformar los datos.
- Numpy: para la aplicación de funciones estadísticas.
- Matplotlib y seaborn: para graficar resultados y visualizar la distribución de las citas.
- Openpyxl: para exportar resultados a Excel.

Google Colab como plataforma de desarrollo en la nube permite que los análisis sean compartidos, llevados a cabo, documentados por distintos perfiles de usuarios sin requerir una licencia de uso comercial y, sobre todo, no requiere realizar instalaciones. Este entorno de trabajo, además, nos da la posibilidad de anotar el código paso a paso, enlazar gráficos interactivos, mantener una bitácora del análisis, factores bien valorados en contextos de toma de decisiones operativas [8], [26].

Estudios recientes dan cuenta de que la aplicación de estas herramientas ha sido positiva para el rendimiento de tareas como la planificación de rutas, la revisión de inventarios, el pronóstico de la demanda, y la redistribución de recursos en almacenes [22], [27]. En el caso de Python, lo han adoptado empresas logísticas como DHL, Maersk o Amazon para desarrollar soluciones internas de analítica avanzada y visualizar KPIs automáticamente [28]. En el caso objeto de estudio, se diseñó una plantilla completa en Python, mediante Excel, que permite desde la carga de archivos de ventas, hasta la exportación de la propuesta de redistribución del *layout*. La plantilla fue ejecutada en *Google Colab* y puede ser actualizada periódicamente con nuevos datos extraídos del ERP para que exista trazabilidad, adaptabilidad y continuidad operativa del modelo sin depender de soluciones propietarias.

4.7. DISEÑO Y CONTROL DE *LAYOUT*: ESTADO DEL ARTE

El *layout* de la instalación de un almacén determina la configuración física de las áreas de almacenamiento, de preparación, de entrada y de salida, además de ser un componente estructural clave en la actividad logística de una operación. Un buen diseño puede minimizar los recorridos, reducir los tiempos de *picking*, así como gestionar adecuadamente el uso del espacio existente y permitir una buena rotación del inventario. [1], [13], [24].

Existen diferentes tipos de *layout* (flujo en “U”, flujo cruzado, radial, lineal, entre otros) y su elección depende del tipo de operación que lleve a cabo la instalación, del número de referencias, de la frecuencia de movimiento y de las restricciones de espacio que existan. [15], [29]. En condiciones industriales caracterizadas por una coexistencia de muchos productos y una alta rotación de ellos, *layouts* que situaban zonas de preparación adyacentes

a las entradas o a sectores intermedios, se evidencia los tiempos de alistamiento y la necesidad de disminuir la congestión interna [20].

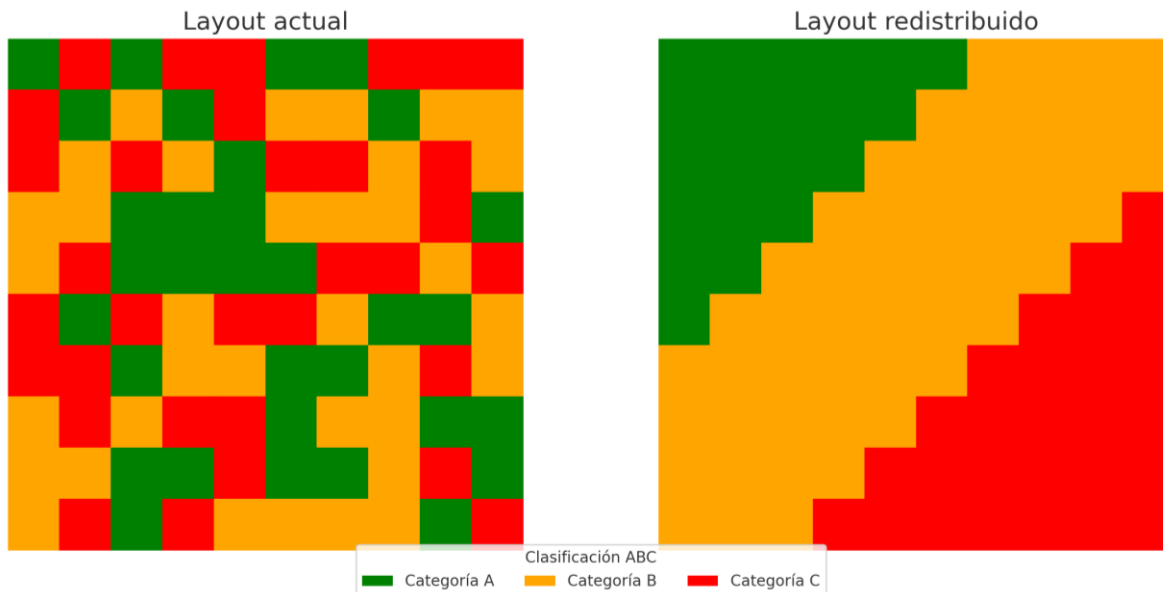
El diseño del *layout* debe integrar la clasificación del producto por nivel de criticidad logística, de manera que permita establecer diferentes posiciones de referencias de alta, media o baja rotación. Para esta redistribución táctica de los productos se emplean modelos como ABC/XYZ, ampliamente utilizados en la literatura al respecto [3], [5], [19].

La literatura científica destaca también la importancia de completar el diseño del *layout* en el almacén o centro de distribución con las herramientas de visualización y simulación, tal y como se ha hecho especialmente en centros que no cuentan con sistemas de gestión del almacén (WMS). En estos casos, se recomienda el empleo de pantallas dinámicas, mapas de calor, análisis de recorridos e indicadores de cobertura, los cuales pueden ser de ayuda a la hora de validar las decisiones de ubicación [24], [30].

En el caso objeto de estudio, se trata de un *layout* de flujo cruzado que contiene más de mil posiciones con codificación alfanumérica. La redistribución que proponemos se basa en la matriz ABC/XYZ combinada, priorizando las referencias A y X/Y localizadas de manera próxima a la preparación, y trasladando referencias C-Z a zonas periféricas o más inaccesibles, la cual fue validada mediante visualización del plano logístico, así como la simulación de recorridos y el análisis de la ocupación por categorías.

Recientes trabajos dan cuenta de casos exitosos de rediseño de *layouts* fundamentados en datos del movimiento e impacto del inventario que han permitido mejoras superiores al 20 % en la eficiencia operativa y en la reducción de errores de *picking* [19], [25], [31].

Fig 4. Comparación entre Layout sin Segmentación Estratégica y Redistribución Basada en Clasificación ABC.



Comparación esquemática entre un layout logístico sin segmentación estratégica (izquierda) y una redistribución mejorada basada en clasificación ABC (derecha). Se priorizan las referencias tipo A en zonas cercanas a preparación y se reubican las tipo C en áreas periféricas. Fuente: elaboración propia con datos simulados. Fuente: elaboración propia

4.8. ESTADO DEL ARTE: APLICACIONES REALES DEL MODELO ABC/XYZ

La aplicación del modelo ABC/XYZ se realizó varios contextos industriales, logísticos y comerciales, confirmando que es útil para mejorar el control del inventario, el diseño del *layout* y la eficiencia operativa general. La evidencia proporcionada por estudios desarrollados en diferentes sectores corrobora que cruzar criterios cuantitativos y cualitativos permite realizar una segmentación estratégica del portafolio de productos; y de la cartera de productos para gestionar el portafolio de productos alineado con características reales de rotación, de estabilidad y de modalidad operativa con efectos logísticos medibles. [3], [5], [19]. Igualmente, los estudios recientes han mostrado que la aplicación conjunta de ABC/XYZ permite mejorar la fiabilidad del inventario y tomar decisiones logísticas basadas en una segmentación operativa objetiva [32].

4.8.1. Aplicaciones en el Sector Farmacéutico.

El sector de la salud ha sido pionero en la adopción del modelo ABC/XYZ, debido a que necesita gestionar inventarios regulados e incorporar productos críticos con el cambio de la demanda. Por citar un ejemplo, en los almacenes de hospitales y en los distribuidores de medicamentos, este modelo ha sido utilizado para la priorización de lotes sensibles y, a la vez, para combatir el envejecimiento de los lotes y gestionar la reposición [17], [33].

La investigación que se llevó a cabo en un hospital universitario de la India desarrolló el modelo ABC/XYZ en más de 1.000 ítems, obteniendo un decrecimiento de 35 % en el sobreinventario de productos tipo C-Z y una mejora en la preparación de un kit médico del 22 % [34].

4.8.2. Aplicaciones en la Industria de Repuestos y Manufactura.

El modelo ha sido utilizado en la organización de almacenes de repuestos en áreas de fabricación y mantenimiento y en áreas que promueven un acceso rápido a elementos claves (AX, AY). También en zonas de concentración de elementos de baja rotación (CZ) y en áreas poco activas, demostrando ser una estrategia de éxito en contextos como los de minería, metalmecánica y automotriz [35].

4.8.3. Aplicaciones en Logística de Consumo Masivo y *Retail*.

Las firmas de distribución de alimentos, cosméticos y productos de alta rotación han aplicado el modelo ABC/XYZ para obtener mejoras en recorridos de picking y redefinir su zona de almacenamiento. Un caso documentado en un operador logístico europeo muestra que en consecuencia de aplicar la matriz ABC/XYZ, tuvo lugar un incremento en el rendimiento del alistamiento alcanzando un 18 % así como una reducción de errores de ubicación con un porcentaje del 40 % [36].

4.8.4. Alineación con el Presente Proyecto.

Las diversas experiencias registradas en la literatura científica muestran que la combinación de una clasificación según ABC/XYZ y el rediseño de un *layout* logístico son herramientas que mejoran significativamente la eficiencia operativa en contextos donde hay una alta variedad de referencias. Esta combinación se utiliza en este estudio de caso, pero se adapta a las condiciones del centro de distribución analizado, donde no se trataba solamente de clasificar el inventario, también de determinar el impacto de una redistribución técnica del *layout* en los recorridos internos y la productividad del *picking*. Esta propuesta se basa en datos operativos reales, extraídos del sistema ERP que utiliza el propio centro de distribución, procesados con herramientas de código abierto que han permitido automatizar el análisis, simular diferentes escenarios logísticos y visualizar los efectos que tienen diferentes modos de organizar el inventario en función de su criticidad.

En el modelo definido se han incluido variables económicas, de frecuencia de salida, estabilidad operativa, cantidad de líneas por pedido o distribución de referencias por

modalidad de gestión (almacenamiento o *cross docking*); es decir, que es un modelo que integra una buena parte del comportamiento del inventario. De este modo, a la par que se acoge a prácticas referenciadas en la literatura científica, al mismo tiempo, se ofrece un modelo replicable en contextos en los que la operación aún se basa en herramientas manuales, susceptibles de mejorar sin necesidad de grandes inversiones en tecnología, sino mediante el uso adecuado de la información existente para poder reorganizar el espacio y optimizar los flujos internos.

5. METODOLOGÍA

El presente capítulo presenta un enfoque metodológico a través del cual se logra caracterizar el comportamiento logístico del centro de distribución (CEDI) sede Medellín y, a su vez, valorar el impacto esperado de la redistribución del *layout* sobre los recorridos internos del CEDI y sobre la productividad asociada al proceso de preparación de pedidos.

La estructura metodológica se construyó a partir de fases sucesivas y bien definidas, las cuales incluyeron la obtención y tratamiento de datos operativos, la aplicación de un modelo de clasificación ABC/XYZ, la elaboración de la redistribución técnica del *layout*, la obtención de indicadores logísticos relevantes y la simulación de escenarios de mejora. Cada una de estas fases fue ejecutada con herramientas informáticas de código abierto sobre información real obtenida directamente del sistema ERP de la institución.

5.1. DISEÑO METODOLÓGICO

El trabajo que aquí se presenta ha sido desarrollado desde un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, mediante un estudio de caso, orientado a valorar el comportamiento logístico del CEDI -sede Medellín- correspondiente a una empresa del entorno industrial. Este tipo de aproximación metodológica se inscribe de manera coherente en los parámetros establecidos por Universidad EAFIT para trabajos de grado en modalidad de profundización en ingeniería [10].

El objeto del análisis está dado por el portafolio de referencias activas del CEDI, que se han evaluado teniendo en cuenta las variables de rotación, valor del inventario, frecuencia de salida y estabilidad operativa y la ubicación física en el *layout*. La metodología tiene como objetivo general el identificar oportunidades de mejora en la distribución de los inventarios, que permitan disminuir los recorridos internos y aumentar la productividad en la preparación de solicitudes de pedidos.

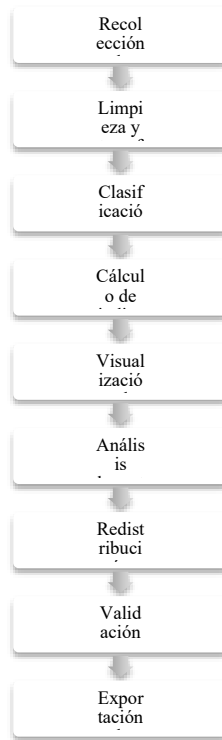
El periodo analizado comprende el rango temporal de enero de 2024 a abril de 2025, tomando como fuente primaria los registros históricos obtenidos desde el sistema ERP corporativo [3].

El procedimiento de la información se vio favorecido en gran medida por el uso de una plantilla computacional desarrollada en Python y ejecutada en *Google Colab*, que facilitó la integración de las técnicas de clasificación, visualización y análisis logístico, valiéndose de las herramientas de código abierto [6], [8], [22].

La metodología se organizó en nueve bloques funcionales consecutivos que incluyen recolección de datos, limpieza y transformación, clasificación ABC/XYZ, cálculo de

indicadores operacionales, visualización de resultados, análisis del *layout* actual, redistribución logística, validación operativa y exportación final. La Figura 5 ilustra este flujo metodológico.

Fig 5. Flujo Metodológico Aplicado en el Proyecto.



Representación visual del proceso seguido en el proyecto, desde la recolección de datos hasta la exportación de resultados. Cada etapa incluye una acción específica asociada a herramientas computacionales o decisiones operativas. Fuente: elaboración propia.

5.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La base de datos analizada en este estudio fue construida con datos históricos extraídos del sistema ERP de la institución para el periodo entre enero de 2024 hasta abril del 2025. Los registros fueron obtenidos en formato Excel y abarcan datos de ventas, registros de *picking* e información relativa al *layout* logístico del centro de distribución.

Para los fines de este análisis fueron estructurados cinco archivos de forma conjunta:

- Ventas históricas (Informe de ventas x bodegas - PLANO.xlsx): contiene información detallada por pedido, fecha, referencia, descripción, cliente, canal y valor vendido.
- *Picking* diario (*Picking* x Dia.xlsx): registra los pedidos procesados cada día, permitiendo estimar tiempos de operación y cobertura frente a la demanda.

- *Layout* del CEDI (*Layout.xlsx*): describe la ubicación física de cada casilla del almacén, con coordenadas de fila y columna.
- Nomenclatura de referencias (*Nomenclatura_Referencia_CEDI.xlsx*): permite identificar qué referencias se gestionan por almacenamiento o por *cross docking*.
- Órdenes de venta (*Pedidos-22024-2025.xlsx*): permite contrastar los pedidos solicitados (ventas) con los efectivamente procesados (*picking*).

A continuación, se presenta un resumen estructurado de su propósito dentro del modelo:

Tabla 2. Archivos Procesados y Propósito

Archivo	Nombre del archivo	Propósito	Columnas clave
<i>Ventas históricas</i>	Informe de ventas x bodegas - PLANO.xlsx	Calcular valor total vendido, frecuencia de salida, clasificación ABC/XYZ	fecha, referencia, descripción, total
<i>Picking diario</i>	Picking x Dia.xlsx	Estimar pedidos diarios, tiempos de picking y simulaciones operativas	Fecha de Transferencia
<i>Layout físico</i>	Layout.xlsx	Visualizar la distribución física del almacén, identificar casillas y zonas	casilla, fila, columna
<i>Nomenclatura de referencias</i>	Nomenclatura_Referencia_CEDI.xlsx	Determinar si una referencia requiere almacenamiento o se maneja por cross docking	Referencia, Casilla
<i>Órdenes de venta</i>	Pedidos-22024-2025.xlsx	Comparar pedidos solicitados vs pedidos efectivamente procesados	Fecha, Estado, Pedido

Relación de archivos extraídos desde el sistema ERP y su uso dentro de la estructura metodológica del proyecto. Fuente: elaboración propia.

La base de datos depurada se incorporó a una plantilla computacional elaborada en Python, que automatiza los cálculos de la clasificación ABC/XYZ, genera visualizaciones del *layout* y exporta los resultados en archivos utilizables. Con este enfoque se mantiene la trazabilidad completa del análisis, además, puede ser actualizado fácilmente con nueva información y se garantiza que el modelo sea replicable.

5.3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

En el desarrollo del modelo analítico propuesto se emplearon técnicas de código abierto, las cuales fueron seleccionadas por sus capacidades de procesamiento, trazabilidad y compatibilidad con entornos colaborativos. Específicamente, se utilizó lenguaje para programación Python ejecutado con la plataforma *Google Colab*, lo que posibilita agrupar todas las fases del análisis logístico en un entorno reproducible, gratuito y accesible desde cualquier dispositivo con acceso a internet [6], [8], [22].

La plantilla se estructuró en bloques secuenciales, desde la carga y limpieza de datos hasta la visualización y exportación de resultados. A continuación, se describen las principales librerías utilizadas:

- Pandas: para la lectura, transformación y estructuración de los archivos obtenidos del sistema ERP.
- Numpy: para calcular métricas estadísticas como el coeficiente de variación (CV) o para realizar operaciones numéricas.
- Matplotlib y Seaborn: para generar gráficos de curva de Pareto, gráficos de dispersión de las referencias y visualizaciones del *layout*.
- Openpyxl: para la exportación automatizada de los resultados a archivos en formato Excel.

La posibilidad de trabajar en *Google Colab* como entorno de desarrollo, nos permitió seguir el proceso metodológico completo, constatando así cada paso mediante celdas de texto, favoreciendo la visualización de los resultados intermedios, compartir el modelo con otros usuarios y actualizar la información fácilmente al incorporar nuevos datos. La plataforma, además, permite integrar recursos visuales y exportables sin necesidad de instalación de un software en la computadora y de obtener licencias de programas, lo que otorga mayor coherencia con el carácter escalable, accesible y reproducible del modelo. Como complemento, se contó con el apoyo conceptual y técnico de ChatGPT (OpenAI) que fue utilizado para estructurar funciones, validar procesos y mejorar la lógica de análisis de flujo.

Su uso se centró en acelerar el desarrollo de código, proponer alternativas de visualización y asegurar la coherencia del modelo desde una perspectiva computacional asistida [37].

5.4. CLASIFICACIÓN ABC/XYZ Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Una vez ejecutada la fase inicial del tratamiento de la base de datos, se aplicó un modelo combinado de la clasificación ABC / XYZ en las referencias activas, fundamentado en dos variables: el monto de dinero vendido por referencia y la frecuencia de salida. Este modelo de doble clasificación y acotación de frecuencia, reconocido y empleado para soportar decisiones logísticas estratificadas por tipo de referencia [2], [4], [5], permitió, además, construir una matriz de nueve categorías (AX, AY, AZ ... hasta CZ).

Para la clasificación ABC de las referencias, se utilizó el modelo de Pareto acumulado:

- A: 80 % del valor o la frecuencia.
- B: 80 % - 95 %.
- C: 5 % restante.

Por otro lado, las referencias fueron clasificadas por medio del coeficiente de variación (CV), pero sólo aquellas con por lo menos 3 días de movimiento. En función de este indicador se clasificaron en:

- X: $CV < 0.5$ (estables).
- Y: $0.5 \leq CV < 1.0$ (moderadamente variables).
- Z: $CV \geq 1.0$ (inestables) [16], [18]

Los resultados de la clasificación se representan por medio de las curvas de Pareto y mediante gráficos de dispersión permitiendo evidenciar los cortes A/B/C y la distribución del ABC, además de facilitar tanto el análisis técnico, como la validación por parte del equipo logístico, llegando así a una mejor comprensión del comportamiento del inventario.

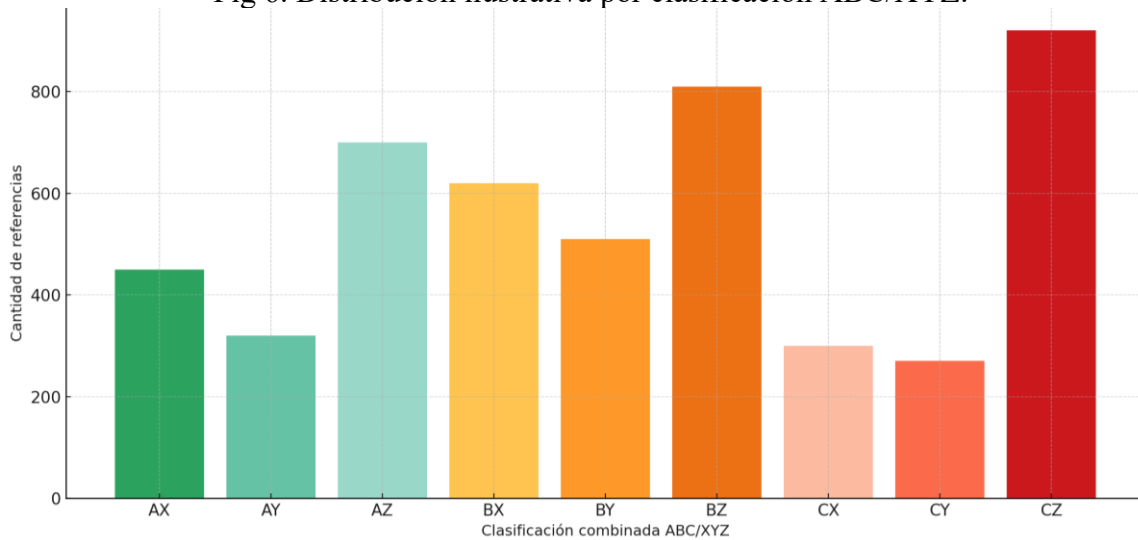
Tabla 3. Interpretación Logística de las Categorías ABC/XYZ

CATEGORÍA	SIGNIFICADO	DECISIÓN LOGÍSTICA SUGERIDA
AX	Alta rotación y estable	Ubicación prioritaria, alta reposición
AY	Alta rotación, algo variable	Control frecuente, acceso ágil
AZ	Alta rotación e inestable	Revisión operativa permanente
BX	Media rotación y estable	Zona secundaria, revisión intermedia

BY	Media rotación y variable	Control táctico, evaluación periódica
BZ	Media rotación e inestable	Consolidación o almacenamiento diferenciado
CX	Baja rotación y estable	Zona periférica, mínima intervención
CY	Baja rotación y variable	Consolidación eventual o rotación lenta
CZ	Baja rotación e inestable	Candidata a depuración o baja operativa

Interpretación logística de las categorías ABC/XYZ. Resumen conceptual de las combinaciones entre rotación y estabilidad operativa, junto con decisiones logísticas típicas aplicadas a cada tipo de referencia. Fuente: elaboración propia.

Fig 6. Distribución ilustrativa por clasificación ABC/XYZ.



Distribución ilustrativa de referencias según su clasificación combinada ABC/XYZ. Este tipo de visualización permite identificar el volumen de ítems por nivel de criticidad logística. Fuente: elaboración propia con datos simulados

Siguiendo este modelo de localización, se realizó la redistribución del *layout* logístico priorizando las referencias más críticas (AX, AY) cerca de las zonas de preparación, además de desplazar las referencias menos importantes (CZ) a zonas periféricas.

5.5. REDISTRIBUCIÓN DEL *LAYOUT*

Concluido el desarrollo del sistema de clasificación ABC/XYZ, se procedió a estructurar una propuesta de redistribución técnica del *layout* del centro de distribución que contribuyera a reducir los recorridos para la preparación de pedidos y a mejorar la productividad operativa. El *layout* original es un sistema de flujo cruzado con un gran número de posiciones codificadas a partir de casillas alfanuméricas, las cuales en su momento fueron organizadas para reflejar su localización física en el almacén y su distancia respecto a las zonas de

preparación, de ingreso y de salida de la mercancía. El rediseño se estructuró a partir de dos principios básicos:

- Prioridad de las referencias según su clasificación ABC/XYZ, siguiendo un orden de criticidad decreciente entre: AX, AY, AZ, BX, BY, BZ, CX, CY y CZ.
- Distancia física respecto a las zonas logísticas definidas para ubicar las referencias más críticas, categorizadas por su cercanía a los puntos de preparación (definidos como zonas "START").

La modificación se ejecutó mediante un algoritmo de diseño implementado en Python, con el cual las referencias activas fueron automáticamente asignadas a nuevas ubicaciones, según orden de prioridad y distancias mínimas. La nueva ubicación tiene en cuenta que las referencias de alta rotación y de estabilidad (tipo AX, AY) ocupen las zonas más accesibles del *layout*, mientras que las referencias de rotación baja e inestabilidad (tipo CZ) se ubican hacia las casillas más periféricas o de menor prioridad operativa.

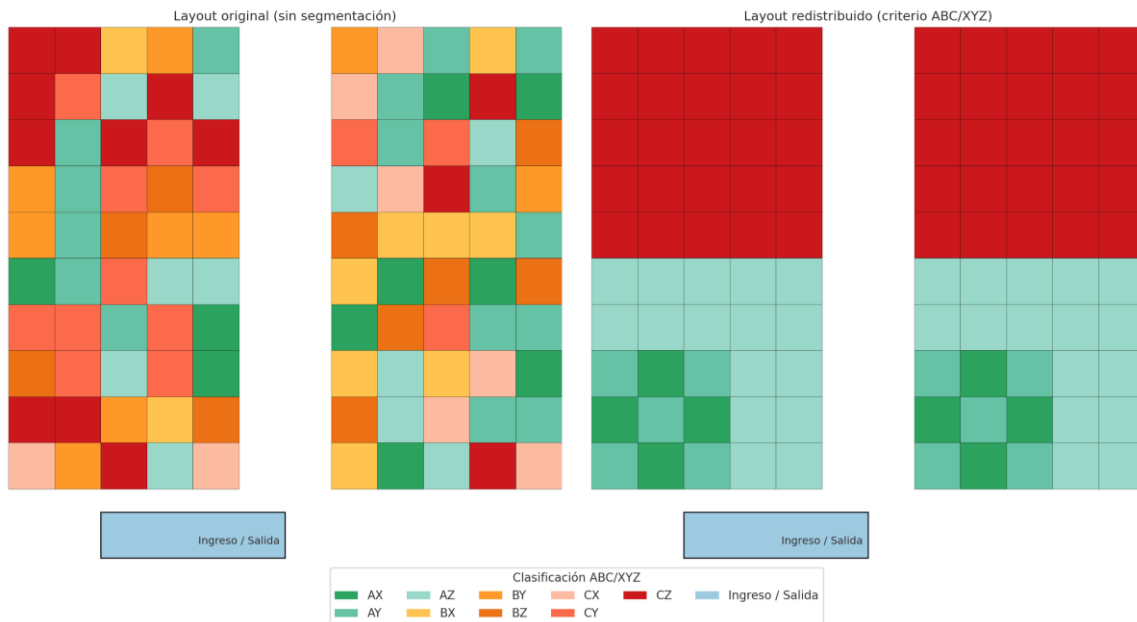
La Figura 7 representa el diseño logístico antes y después de la asignación. Los colores indican la clasificación combinada ABC/XYZ. El *layout* original está a la izquierda sin segmentación técnica; el *layout* que se propone, a partir de la criticidad logística para realizar una reordenación táctica, a la derecha de la figura. Esta representación gráfica permite, además, observar cómo varía la redistribución en función de la localización geográfica de las referencias, así como los posibles beneficios que en términos de operaciones pueden obtenerse. En la representación de desplazamientos internos en el *layout*, para determinar el impacto real de esta redistribución en el proceso de preparación de pedidos, calculamos en metros la distancia recorrida en media por pedido, utilizando como sistema de referencia las coordenadas físicas (fila, columna) de cada celda asumiendo que cada una de ellas ocupaba un espacio físico de 0.60 metros.

Para cada uno de los pedidos, se toman las referencias asociadas y se determina una ruta simulada de las posibles a implementar, que inicia en la zona de Preparación 1, recorre las posiciones de una forma optimizada a partir de un algoritmo del tipo vecino más cercano (*Nearest Neighbor*), y finaliza en la zona de Salida de Despachos.

La distancia total para esta ruta se calculó a modo de suma de los desplazamientos de Manhattan (por ejes ortogonales) entre cada uno de los puntos y se multiplicó por el tamaño de celda, de forma tal que, para cada pedido, se obtuvo la distancia estimada en término de recorrido en metros en los tres *layouts* evaluados: actual, redistribuido por valor económico

(DINERO) y redistribuido por frecuencia de salida (FRECUENCIA). La distancia calculada en la ejecución de esta ruta es uno de los datos más relevantes a los que nos referiremos con mayor detalle en el Capítulo 6.

Fig 7. Redistribución ilustrativa del *layout* logístico con bloques de estantería.



Simulación de redistribución logística en un centro de distribución con doble estantería. A la izquierda se observa un layout sin segmentación operativa; a la derecha, una redistribución basada en la clasificación ABC/XYZ, en la cual se ubican las referencias más críticas (AX, AY) cerca de la zona de ingreso/salida, y las de menor prioridad (CZ) en áreas alejadas. Fuente: elaboración propia.

5.6. ANÁLISIS DE INDICADORES LOGÍSTICOS DERIVADOS

Además de la clasificación ABC/XYZ, se calculan indicadores logísticos para caracterizar el comportamiento operativo del almacén, según la duración del proceso de carga diaria del mismo con el fin de proyectar escenarios de reorganización del mismo. Tales cálculos se realizan a partir de los datos extraídos del ERP. Se implementaron medidas en Python desarrolladas en *Google Colab*, basado en la bibliografía logística y en la experiencia operativa aplicada [5], [6], [23].

5.6.1. Análisis de Líneas por Pedido.

Se clasificaron los pedidos según el número de referencias distintas que contenían:

- Cortos: 1 a 3 líneas
- Medios: 4 a 6 líneas
- Largos: 7 o más líneas

Se calcularon dos métricas:

- Promedio de líneas por pedido:

$$\text{Promedio de líneas por pedido} = \frac{\sum \text{líneas totales}}{\text{número total de pedidos}}$$

- Participación por tipo de pedido:

$$\% \text{ tipo} = \frac{\text{cantidad de pedidos del tipo}}{\text{total de pedidos}} \times 100$$

5.6.2. Tiempo Promedio de *Picking* Diario.

Utilizando la base de datos de *picking* (filtrada para días hábiles con ≥ 80 pedidos), se estimaron:

- Minutos totales disponibles por día:

$$\text{Minutos totales por día} = \text{número de operarios} \times 480$$

- Tiempo promedio por pedido:

$$\text{Minutos por picking} = \frac{\text{minutos totales}}{\text{pedidos procesados por día}}$$

Se consideraron 6 operarios disponibles por jornada completa.

- Costo total por *picking*:

$$\text{Costo por picking} = \frac{\text{salario mensual} \times \text{operarios}}{\text{pedidos procesados al mes}}$$

5.6.3. Comparativo entre Pedidos Solicitados y Procesados.

Se contrastaron los pedidos solicitados por ventas (órdenes) con los efectivamente procesados (*picking*). Se calculó:

- Porcentaje de cobertura diaria:

$$\text{Cobertura diaria (\%)} = \frac{\text{pedidos procesados}}{\text{pedidos solicitados}} \times 100$$

También se calculó:

- % de días con cobertura superior al 100 %
- % promedio de cobertura mensual

5.6.4. Distribución entre Almacenamiento y *Cross Docking*.

Se determinó si las referencias vendidas estaban almacenadas (en el *layout*) o no (*cross docking*). Para ello, se realizan un comparativo entre las referencias que aparecen en la base de ventas y las que están recogidas en el archivo de nomenclatura.

- Porcentaje de referencias por tipo:

$$\% \text{ referencias por tipo} = \frac{\text{referencias del tipo}}{\text{total de referencias únicas}} \times 100$$

- Porcentaje de valor por tipo:

$$\% \text{ valor por tipo} = \frac{\text{valor total del tipo}}{\text{valor total vendido}} \times 100$$

5.6.5. Simulación de Escenarios de Mejora Operativa.

Para cada uno de nuestros posibles escenarios, se efectuó una simulación con la cual se analizó qué tipo de mejoras en el tiempo de *picking* podrían ser factibles. Además, se implementaron variaciones que incrementan el rendimiento de un 10% a un 40% según el modelo alcanzado. Este estudio se realizó en un escenario usual en el que se gestionan de 213 pedidos al día. Para cada escenario se estimaron:

- Nuevo tiempo por pedido (ajustado):

$$\text{Tiempo simulado} = \text{tiempo base} \times (1 - \% \text{ mejora})$$

- Capacidad diaria de *picking* con operarios actuales:

$$\text{Capacidad/día} = \frac{\text{minutos totales disponibles}}{\text{tiempo simulado}}$$

- Número de operarios necesarios para mantener 213 pedidos/día:

$$\text{Operarios requeridos} = \frac{213 \times \text{tiempo simulado}}{480}$$

- Costo mensual total:

$$\text{Costo total mensual} = \text{operarios requeridos} \times \text{salario mensual}$$

Dicha simulación permite proyectar diferentes escenarios de eficiencia operativa para mejorar el coste logístico, sin incrementar el peso de las personas asignadas al *picking*.

Todos los indicadores que aquí se describen fueron programados como funciones independientes, sometidos a pruebas cruzadas de validación y exportadas a tablas de soporte para la realización del análisis. El resultado completo de la investigación se presenta en el Capítulo 6.

5.7. VALIDACIÓN OPERATIVA Y CONSISTENCIA DEL MODELO

Como última fase del proceso metodológico, se llevó a cabo una validación operativa del modelo propuesto, utilizando como apoyo a los integrantes del equipo logístico del centro de distribución sede Medellín. Esto con el fin de validar la coherencia de los resultados obtenidos con la práctica usual del almacén y para determinar, además, su viabilidad operativa. El modelo, desarrollado en Python es ejecutado en *Google Colab* y se presentó a los encargados del proceso de *picking* y la supervisión logística, quienes recorrieron las visualizaciones del *layout* original y conocieron la redistribución propuesta y los indicadores de eficiencia operativa calculados. A través de una sesión de *feedback*, se comentaron aspectos como:

- La localización de referencias críticas (AX, AY) sugerida.

- Posibilidad de desplazar CZ - ref en zonas de periferia.
- Similitudes entre resultados de clasificación y la experiencia del grupo.

En esta práctica se observó la coincidencia de ciertos elementos claves entre el grupo y los resultados del modelo, a saber: primero, los lugares donde se dan las mayores cargas de recorridos son los mismos donde se presentan las mayores congestiones; segundo, aquellas referencias más consultadas durante el *picking* son las que se localiza en los grupos de más prioridad de acuerdo a la clasificación ABC/XYZ.

Valga anotar que, a pesar de que el modelo no se implementó durante el desarrollo de este trabajo, la validación de la propuesta no está en duda, dado que es técnicamente viable y, operativamente, replicable teniendo en cuenta las dinámicas y restricciones propias del CEDI del que se trate. Como conclusión podemos afirmar que las recomendaciones finales son correctas analíticamente, y relevantes y aplicable para beneficio de la logística de una empresa.

La utilización de herramientas computacionales de código abierto, sumada a criterios validados por la literatura científica y por la operación misma del centro de distribución, permitió construir un sistema basado en datos y replicable. Las etapas de clasificación, análisis, simulación y validación aportaron un enfoque holístico al comportamiento logístico y permiten la evaluación de resultados en el siguiente capítulo.

6. RESULTADOS

Este capítulo se ocupa de analizar los resultados obtenidos a partir del modelo de análisis logístico propuesto. Los hallazgos evidencian el comportamiento del inventario, la segmentación de las referencias y los efectos esperados de la redistribución del *layout* sobre indicadores tipo recorridos promedio, productividad operativa y costo por pedido.

Los resultados analizados se distribuyen en seis bloques fundamentales: la caracterización del inventario, la clasificación ABC/XYZ, los indicadores logísticos de salida, la visualización del *layout* anterior y posterior a la redistribución, la exportación de los archivos en el modelo y la síntesis final con recomendaciones estratégicas. Cada sección contiene métricas cuantitativas, gráficos de soporte y resultados que permiten la lectura técnica y operativa.

6.1. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL INVENTARIO

La elaboración del modelo anteriormente descrito, se realiza a partir de la base de datos obtenida de los registros operativos del sistema ERP del centro de distribución correspondiente a la sede Medellín, en el periodo de enero de 2024 a abril de 2025. Estos registros están constituidos, entre otros elementos, por las ventas, el número de pedidos procesados y la ubicación física del inventario.

En este periodo, se comercializaron 9.299 referencias diferentes relacionadas con pedidos de complejidad variable. El volumen económico asciende a \$86.695 millones COP, lo que implica una operación intensa y variada. Esta base de datos permite analizar el comportamiento del portafolio de muchas formas: frecuencia, rotación, criticidad logística y distribución física.

También se confronta el inventario vendido con el *layout* físico del almacén, determinando el porcentaje de referencia con colocación fija (almacenadas) con aquellos que se gestionan en *cross docking*, esto es, inventario que no tiene posición de ubicación. Esta distinción resulta fundamental para determinar el impacto de la redistribución que se plantea en los siguientes apartados

A continuación, se presentan los principales indicadores generales:

Tabla 4. Indicadores Generales del Inventario y Operación Logística

<i>Indicador</i>	<i>Valor</i>
<i>Total de referencias vendidas</i>	9.299
<i>Total de pedidos procesados</i>	47.186
<i>Total vendido en el periodo</i>	\$86.695.411.505 COP
<i>Porcentaje de referencias con ubicación asignada (almacenadas)</i>	30.18 %
<i>Porcentaje de referencias sin ubicación (cross docking)</i>	69.82 %

Fuente: elaboración propia con base en datos ERP – enero 2024 a abril 2025.

6.2. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN ABC/XYZ

Se aplicó el modelo de clasificación combinado ABC/XYZ desde dos enfoques complementarios:

- Por valor económico acumulado, es decir, el total vendido de cada referencia.
- Por frecuencia de salida, que mide los movimientos de cada referencia para el periodo de enero de 2024 a abril de 2025.

Para el modelo de clasificación ABC se utilizó el principio de Pareto, para agrupar las referencias en:

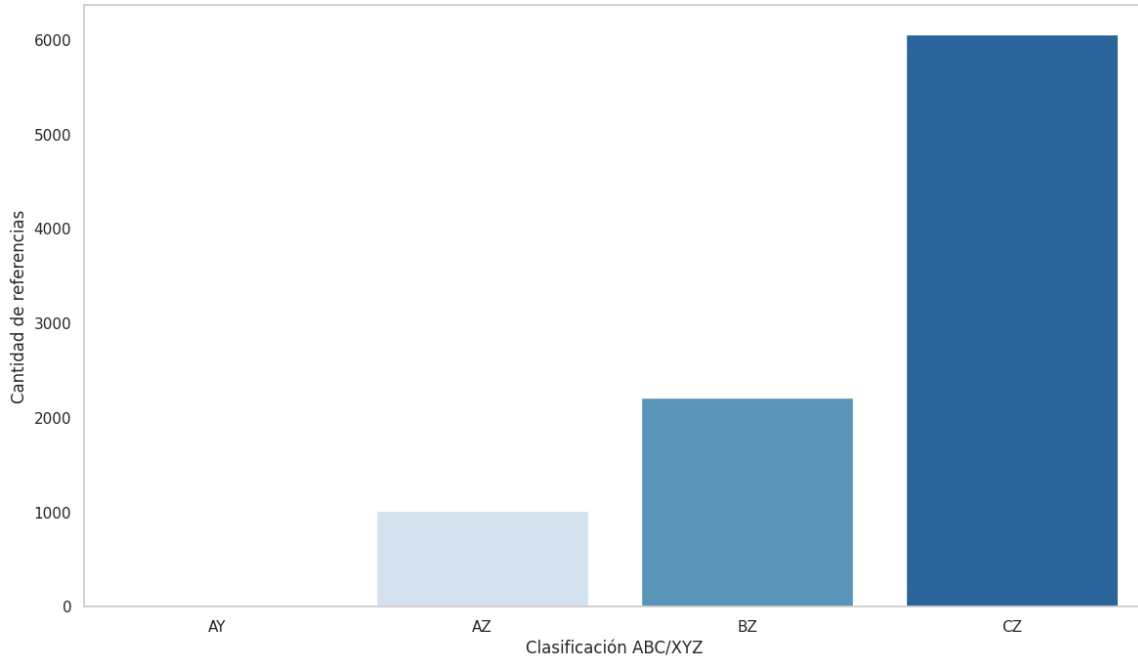
- A: Referencias que acumulan hasta el 80 % del total (valor o frecuencia).
- B: De 80 % a 95 %.
- C: Último 5 %.

El coeficiente de variación (CV) se calculó para las referencias que tenían al menos tres días de movimiento. Los resultados dan lugar a tres categorías:

- X: $CV < 0.5$ → comportamiento estable
- Y: $0.5 \leq CV < 1.0$ → variabilidad moderada
- Z: $CV \geq 1.0$ → comportamiento errático

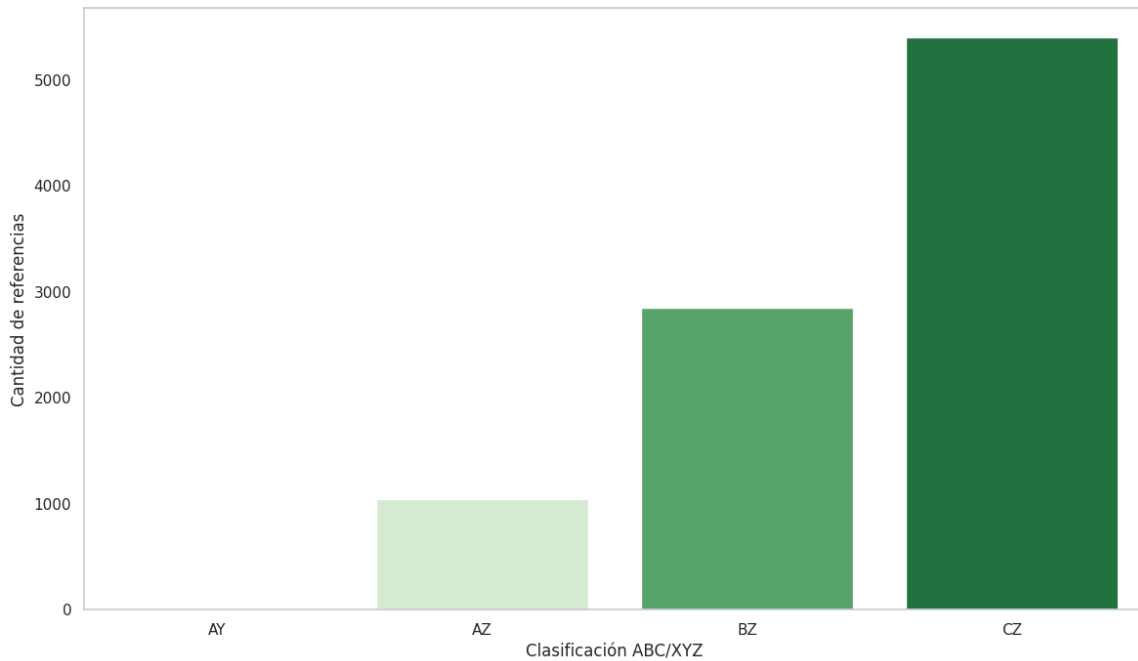
Su combinación genera una matriz de nueve categorías logísticas (AX a CZ) que permite visualizar la criticidad del portafolio y priorizar las referencias a redistribuir en el *layout*. Contamos con un proceso automatizado en Python que se ejecutó desde *Google Colab* y así obtuvimos tanto gráficos, como archivos exportables para el análisis operativo.

Fig 8. Distribución ABC/XYZ por Valor Económico.



Número de referencias clasificadas en cada categoría combinada ABC/XYZ, según el total acumulado de dinero vendido.
Fuente: ejecución en Google Colab.

Fig 9. Distribución ABC/XYZ por Frecuencia de Salida.



Número de referencias clasificadas en cada categoría combinada ABC/XYZ, según el número de veces que cada ítem tuvo movimiento.
Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

Tabla 5. Clasificación De Referencias Bajo Modelos ABC y XYZ

<i>CLASIFICACIÓN</i>	<i>POR VALOR</i>	<i>POR FRECUENCIA</i>
<i>A</i>	<i>1019</i>	<i>1042</i>
<i>B</i>	<i>2215</i>	<i>2847</i>
<i>C</i>	<i>4065</i>	<i>4010</i>
<i>TOTAL ABC</i>	<i>7299</i>	<i>7899</i>
<i>X</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Y,</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Z</i>	<i>9298</i>	<i>9298</i>
<i>TOTAL XYZ</i>	<i>9299</i>	<i>9299</i>

Número de referencias clasificadas bajo los modelos ABC y XYZ según dos enfoques: valor económico total y frecuencia de salida. La categoría Z concentra casi la totalidad de las referencias analizadas, lo que resalta su comportamiento irregular.

Fuente: elaboración propia a partir de los archivos clasificacion_abcxyz_dinero.xlsx y clasificacion_abcxyz_frecuencia.xlsx.

6.3. ANÁLISIS DE INDICADORES LOGÍSTICOS

A partir de los datos procesados en la plantilla desarrollada en Python, se calcularon los indicadores logísticos fundamentales que permiten discriminar el comportamiento real del sistema de alistamiento del centro de distribución. Indicadores que son obtenidos directamente del análisis desarrollado en *Google Colab*, a partir de funciones específicas construidas para cada caso, que aplican para los archivos de ventas y *picking* históricos. A continuación, se presentan los resultados más relevantes.

6.3.1. Tipología de Pedidos Solicitados por Número de Líneas.

Las solicitudes de pedidos fueron agrupadas atendiendo el número de referencias diferentes (líneas) que contenía, clasificándolas en tres segmentos:

- Cortos: de 1 a 3 líneas
- Medios: de 4 a 6 líneas
- Largos: 7 o más líneas

Esta tipología permite determinar el grado de complejidad del proceso de *picking*, puesto que un mayor número de líneas diversas en el pedido, significa más recorrido y mayor tiempo o esfuerzo de separación.

El promedio general de líneas de pedidos fue de 2.16 líneas, lo que lleva a concluir que la operación es predominantemente fácil (sencilla) y la distribución del tipo fue:

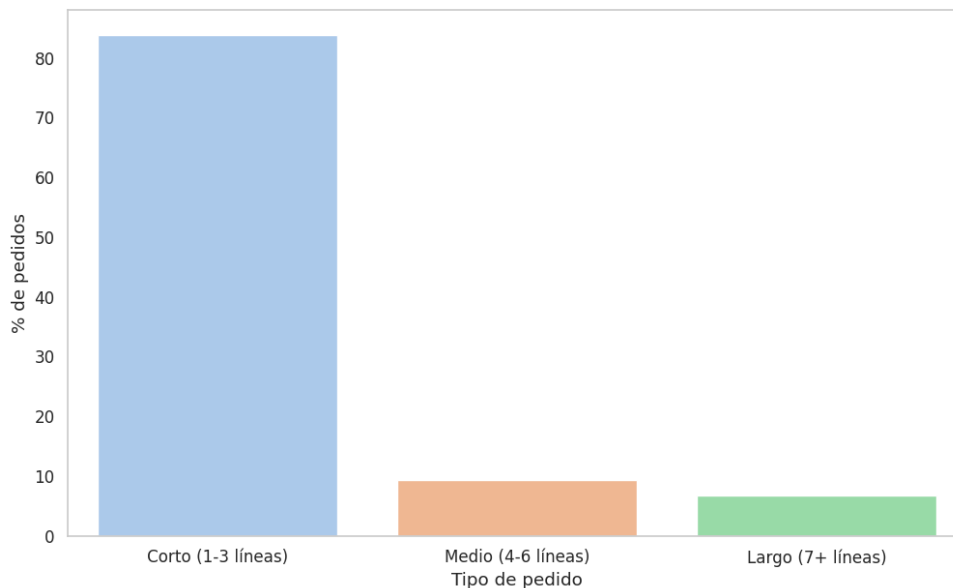
Tabla 6. Distribución Porcentual de Pedidos Solicitados Según Número de Líneas

<i>Tipo de pedido</i>	<i>% de pedidos</i>
<i>Corto (1-3 líneas)</i>	85.77
<i>Medio (4-6 líneas)</i>	8.81
<i>Largo (7+ líneas)</i>	5.42

Porcentaje de pedidos clasificados según la cantidad de líneas por pedido, con base en la segmentación operativa utilizada para el análisis logístico: corto (1–3), medio (4–6) y largo (7 o más).

Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

Fig 10. Distribución de Pedidos Solicitados Según Número de Líneas.



Porcentaje de pedidos clasificados como cortos (1–3 líneas), medios (4–6 líneas) y largos (7+ líneas), calculado a partir de los registros históricos de pedidos solicitados.

Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

6.3.2. Comparativo entre Pedidos Solicitados y Procesados.

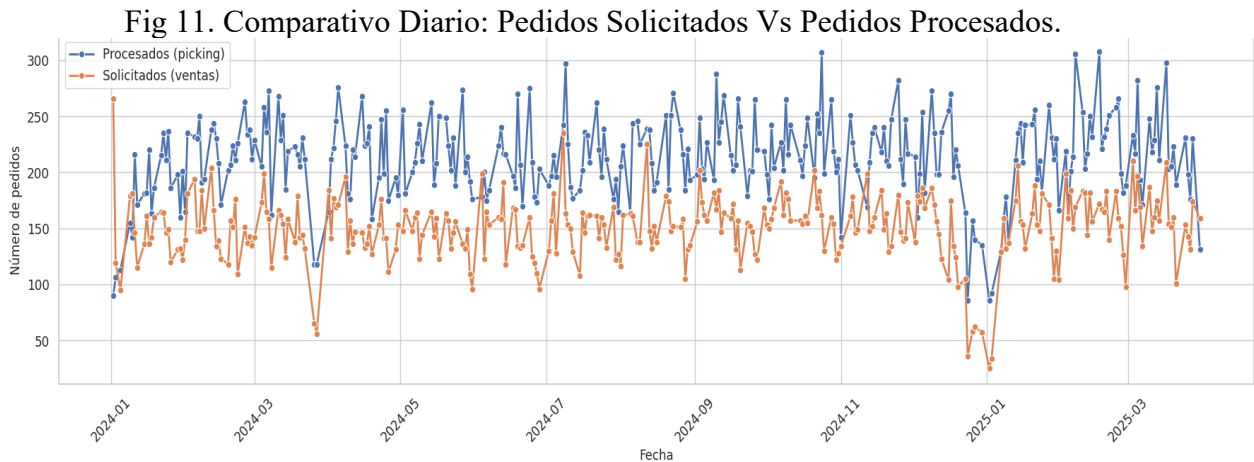
El modelo sirve para establecer un patrón entre la cantidad diaria de pedidos solicitados a ventas (órdenes asentadas en el ERP) y pedidos efectivamente procesados en *picking*, es decir, su referencia, para evaluar la realidad de la cobertura operativa del centro de distribución.

En la ventana de tiempo analizada, el sistema estaba procesando 213 pedidos/día, frente a una cantidad presentada de 150,14 pedidos/día. Este hecho pone de manifiesto la existencia de un nivel

de capacidad físico superior a la carga de trabajo cotidiana media que, además, se encuentra respaldado por los siguientes indicadores:

- Porcentaje de cobertura promedio del día: 145,5 %
- Porcentaje de días no calificados con más de un 100 % de cobertura: 97,4 %

Este comportamiento evidencia un sistema de alistamiento que puede absorber picos de demanda o pendientes acumulados; sin embargo, también plantea la eventualidad de una sobrecapacidad de recursos operativos en días con muy baja exigencia. A continuación, se presentan el gráfico comparativo y la tabla resumen con los principales indicadores.



Evolución diaria de los pedidos solicitados y los pedidos separados por el equipo de picking entre enero de 2024 y abril de 2025.

Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

Tabla 7. Indicadores de Cobertura y Desempeño Operativo

Indicador	Valor
Tiempo promedio por pedido (min)	14.09
Pedidos separados promedio por día	213
Número de operarios estimados	6.00
Pedidos promedio por operario	10812.15
Pedidos promedio por operario por día	35.45
Costo mensual de un operario (COP)	\$2.430.000
Costo promedio por pedido (COP)	\$3.242

<i>Promedio de pedidos solicitados por día</i>	148.91
<i>% promedio de cobertura diaria (procesados/solicitados).</i>	145.5%
<i>% de días con cobertura superior al 100%</i>	97.4%

Fuente: indicadores generados a partir del código ejecutado en Google Colab.

6.3.3. Simulación de Escenarios Operativos.

Conforme a los indicadores de base calculados en la sección previa, se realizó una simulación que permitió proyectar diversos escenarios, con distintos niveles de incremento de la eficiencia, en cuanto a la mejora operativa relacionada con el *picking*, con el objetivo de conocer la variabilidad de la capacidad diaria, la necesidad de operarios y el costo logístico. Para dicho cálculo se utilizaron los siguientes datos:

- Un tiempo promedio de *picking* real (promedio histórico) de 14,09 minutos por pedido.
- Una capacidad base estimada de 213 pedidos diarios.
- Un salario mensual por operario de \$2.430.000 COP.

Con estos datos, se simularon distintos escenarios con mejoras del 10 % al 40 % en el tiempo por pedido. Para cada uno de los casos se calcularon los siguientes indicadores:

- Tiempo ajustado por mejora.
- Capacidad diaria de *picking* con operarios actuales.
- Número de operarios necesarios para procesar 213 pedidos por día.
- Costo mensual estimado.
- Costo promedio por *picking*.

Tabla 8. Resultados de la Simulación de Escenarios Operativos

<i>Escenario</i>	<i>Tiempo por picking (min)</i>	<i>Capacidad diaria con 6 operarios</i>	<i>Operarios necesarios para 213 pedidos</i>	<i>Costo mensual total (COP)</i>	<i>Costo promedio por picking (COP)</i>
<i>Base</i>	14,09	213	6	\$14.580.000	\$3.111
<i>+10 %</i>	12,68	234	6	\$14.580.000	\$2.832
<i>+20 %</i>	11,27	256	5	\$12.150.000	\$2.157
<i>+30 %</i>	9,86	277	4	\$9.720.000	\$1.595
<i>+40 %</i>	8,45	298	4	\$9.720.000	\$1.483

Fuente: resultados generados desde el entorno Google Colab.

La simulación permitió comprobar que, con una operación de un 20 % de mejora, es posible reducir a un operario sin afectar la capacidad diaria para cumplir con 213 pedidos. Con una mejora del 40 %, los resultados reflejan que se sigue alcanzando la misma productividad con solo 4 operarios y una reducción de más del 50 % en el coste por *picking*, lo cual significa un amplio margen de mejora operativa sin ninguna inversión en los recursos humanos.

6.3.4. Análisis de Almacenamiento vs *Cross Docking*.

Durante el análisis logístico, se identificaron las referencias que requería ubicación física dentro del *layout* del centro de distribución (almacenadas) y las que se gestionan mediante *cross docking*, o sea, sin pasar por almacenamiento intermedio. Esta clasificación se llevó a cabo mediante la comparación de la base de ventas con el archivo de nomenclatura del *layout*. Aquellas referencias que no disponían de casilla asignada se consideraron como gestionadas por *cross docking*.

Los resultados muestran que, del total de referencias, el 69,82 % se gestionan a través de *cross docking* y el 30,18 % mediante el almacenamiento físico. En valor económico, las referencias almacenadas representan el 65,71 % del total vendido, frente al 34,29 % que las de *cross docking*. Este resultado evidencia una alta dispersión de las referencias de bajo volumen, propio de un entorno con alta diversidad de ítems. Este resultado refuerza la importancia de segmentar y priorizar de forma estratégica el espacio físico del almacén, asignando ubicaciones con de mayor accesibilidad a las referencias de mayores efectos económicos por encima de las bajo nivel de rotación o de comportamiento inestable.

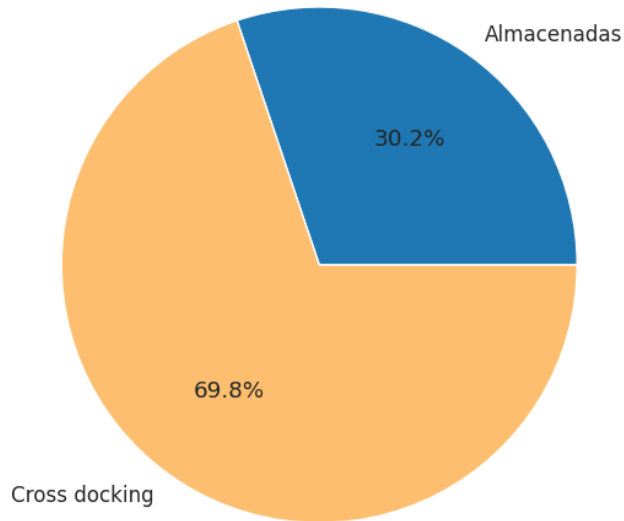
Tabla 9. Distribución entre Almacenamiento y *Cross Docking*

Tipo	Cantidad referencias	Total vendido	%_referencias	%_dinero
Almacenadas	2806	\$56.971.153.297	30.18	65.71
Cross Docking	6493	\$29.724.258.207	69.82	34.29

Cantidad de referencias y valor económico movilizado según la modalidad de gestión operativa. Las referencias sin ubicación asignada fueron clasificadas como cross docking.

Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

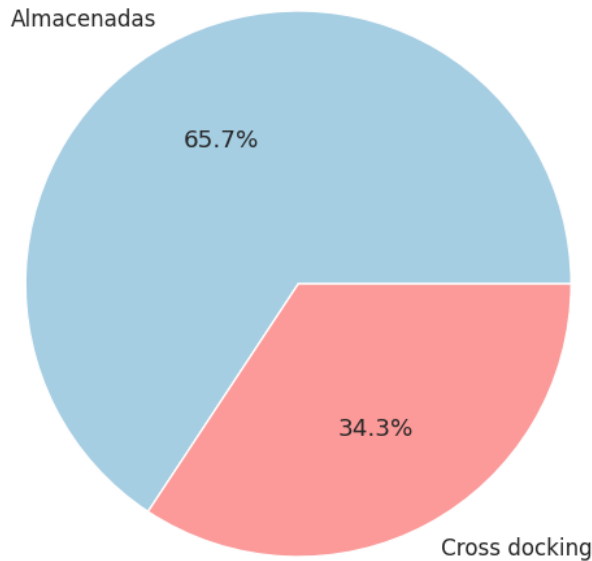
Fig 12. Distribución de Referencias por Modalidad Operativa (Cantidad).



Porcentaje de referencias clasificadas como almacenadas o de tipo cross docking, según su asignación de casilla en el sistema.

Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.

Fig 13. Distribución del Valor Económico por Modalidad Operativa.



*Porcentaje del valor total vendido correspondiente a cada modalidad de gestión: almacenamiento físico o cross docking.
Fuente: resultado del código ejecutado en Google Colab.*

6.4. VISUALIZACIÓN DEL *LAYOUT*

Como soporte a la clasificación ABC/XYZ, se realizaron observaciones detalladas del *layout* del central de distribución, para determinar la ubicación física de las referencias clasificadas, antes y después de ser redistribuidas, y así analizar la optimización del espacio

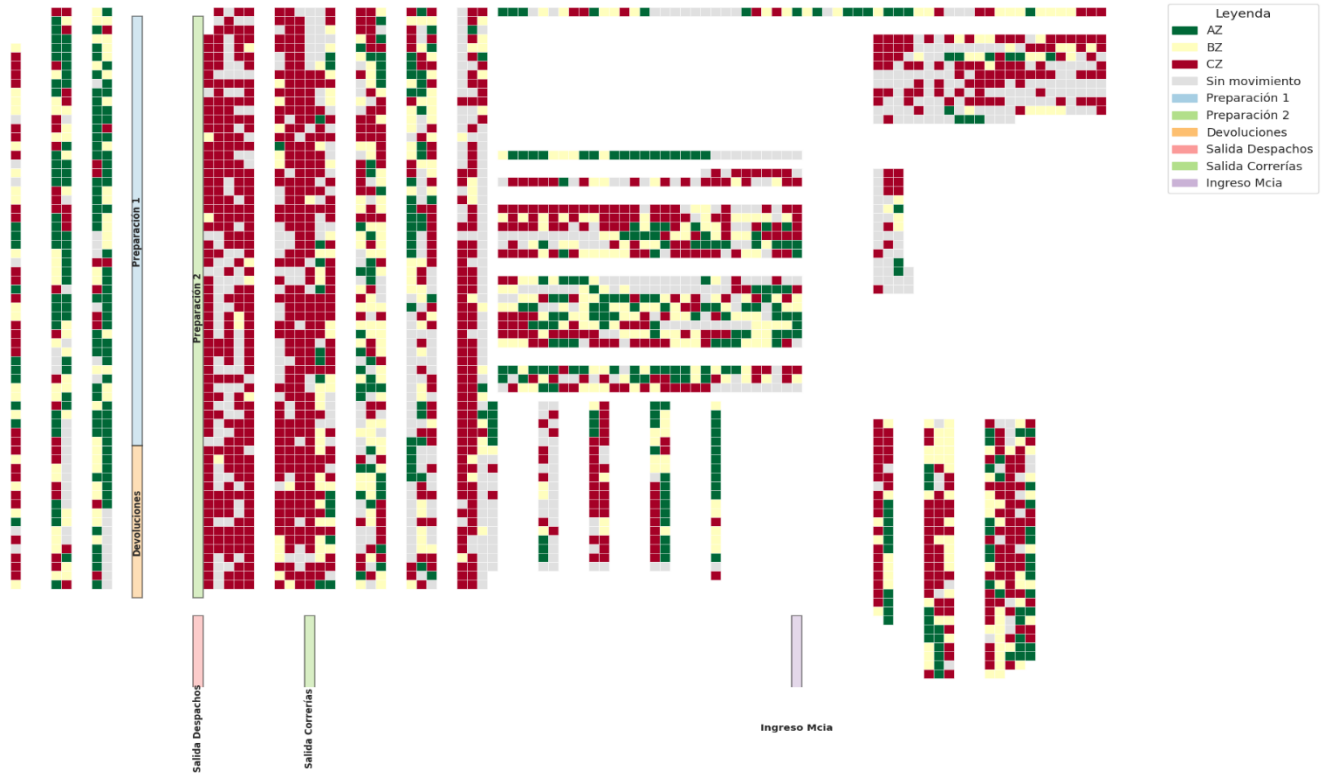
Para tal fin, se integraron los resultados del modelo y la codificación física de las casillas contenida en el archivo de *layout*. Las gráficas se generan mediante un algoritmo escrito en Python capaz de asignar color por la clasificación combinada (AX a CZ) y que permite también evidenciar patrones erróneos (por ejemplo, aquellas referencias CZ que están ubicadas en una zona de preparación) y las mejoras fruto de la redistribución.

6.4.1. *Layout* Actual Distribución por Clasificación ABC/XYZ.

Las representaciones que se presentan a continuación reflejan la distribución inicial del inventario, mediante el modelo ABC/XYZ, en dos direcciones: la de la totalidad en valor económico vendido y la de la frecuencia de salida. En ambos casos, se evidencia una organización empírica, que sitúa referencias de baja criticidad logística (como CZ o BZ) muy próximas a zonas operativas y, referencias de alta priorización (AX o AY) ubicadas aleatoriamente en todo el *layout*. Esta

disposición dificulta el proceso de *picking* y refuerza la necesidad de redistribuir a partir de criterios técnicos.

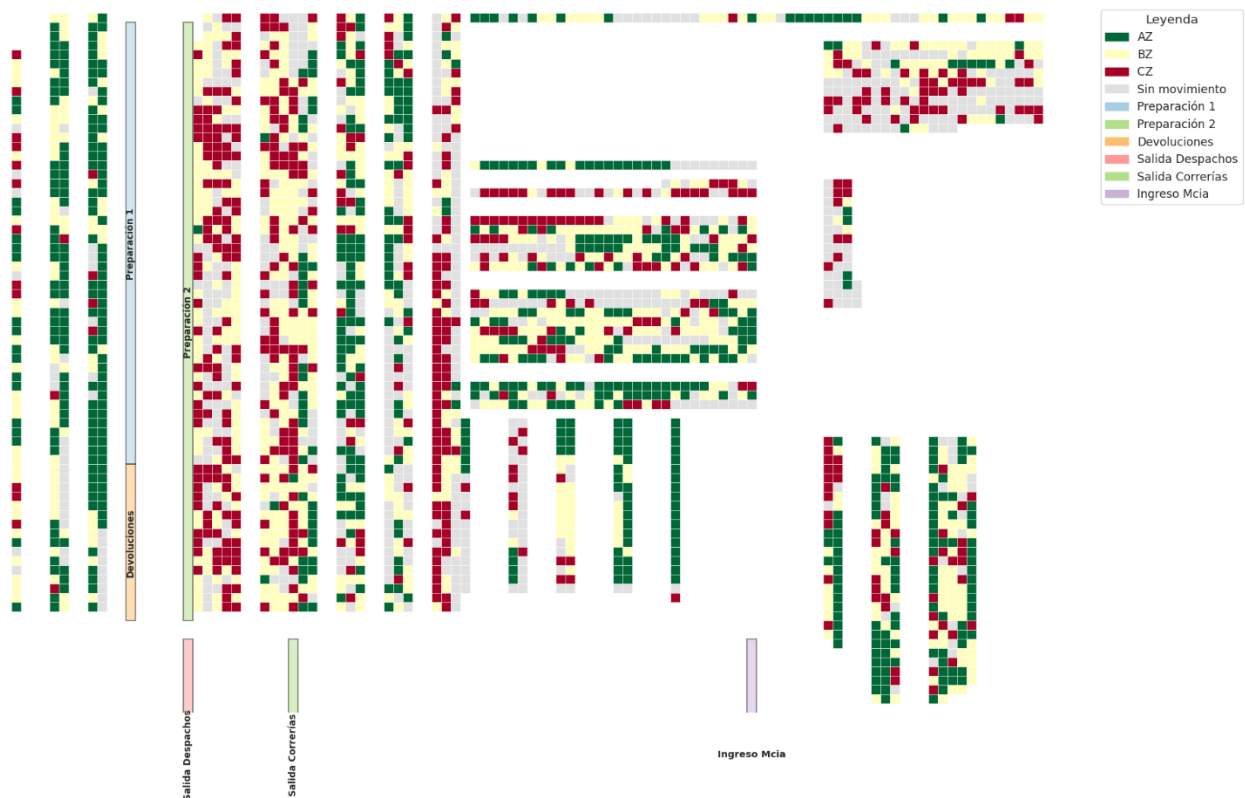
Fig 14. *Layout* Actual Clasificación ABC/XYZ por Valor.



Distribución original de las referencias, visualizada según su clasificación ABC/XYZ por impacto económico.

Fuente: visualización generada desde Google Colab.

Fig 15. *Layout* Actual Clasificación ABC/XYZ por Frecuencia.



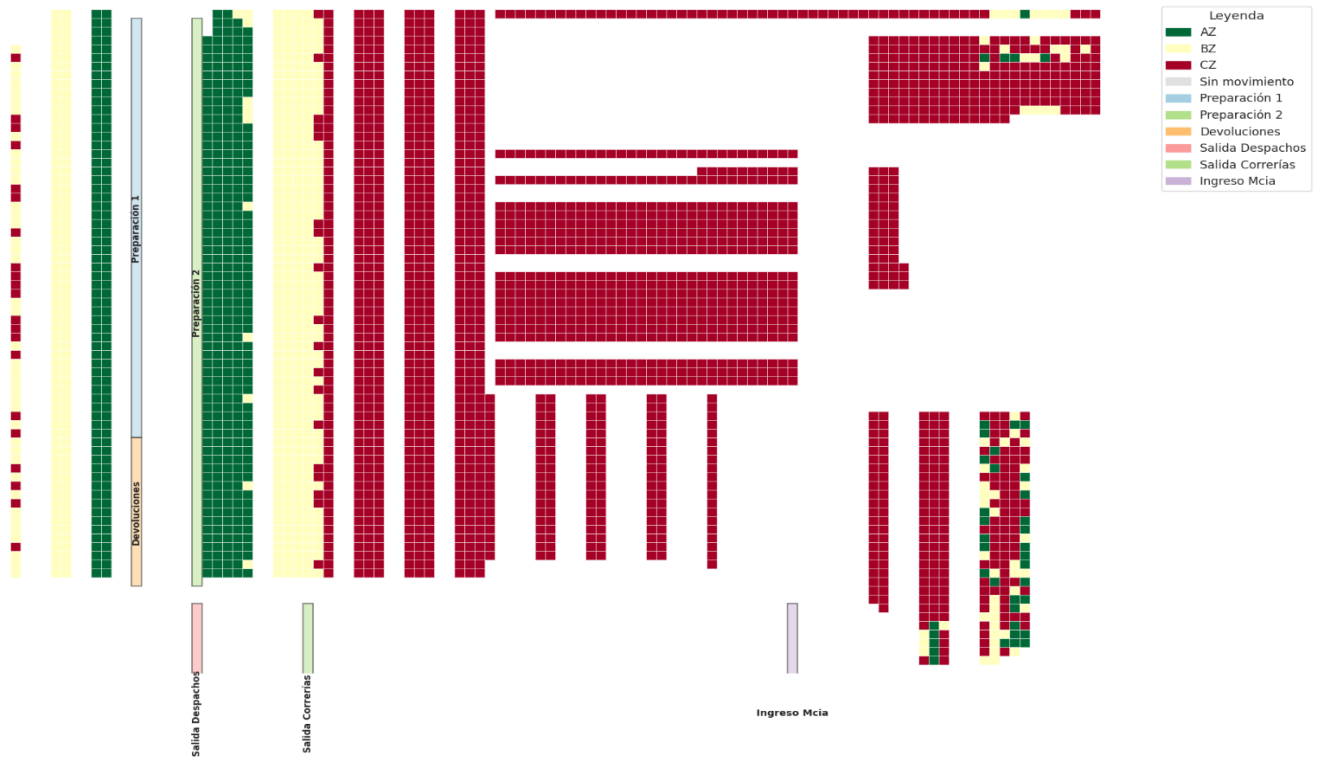
*Distribución original de las referencias, visualizada según su clasificación ABC/XYZ por frecuencia de salida.
Fuente: visualización generada desde Google Colab.*

6.4.2. *Layout* Redistribuido Reorganización Técnica.

De acuerdo con la clasificación ABC/XYZ y el cálculo distancia física a las zonas logísticas, se realizó una redistribución automática del *layout* con el cual se privilegian las referencias más críticas (AX, AY) para situarlas en posiciones cercanas a los puntos de preparación, y se desplazan las referencias con baja rotación e inestabilidad (CZ, BZ) hacia las zonas periféricas. El algoritmo de redistribución respeta la infraestructura física del almacén y las zonas logísticas fijas. Igualmente se asignan nuevas posiciones en función de la prioridad de los artículos.

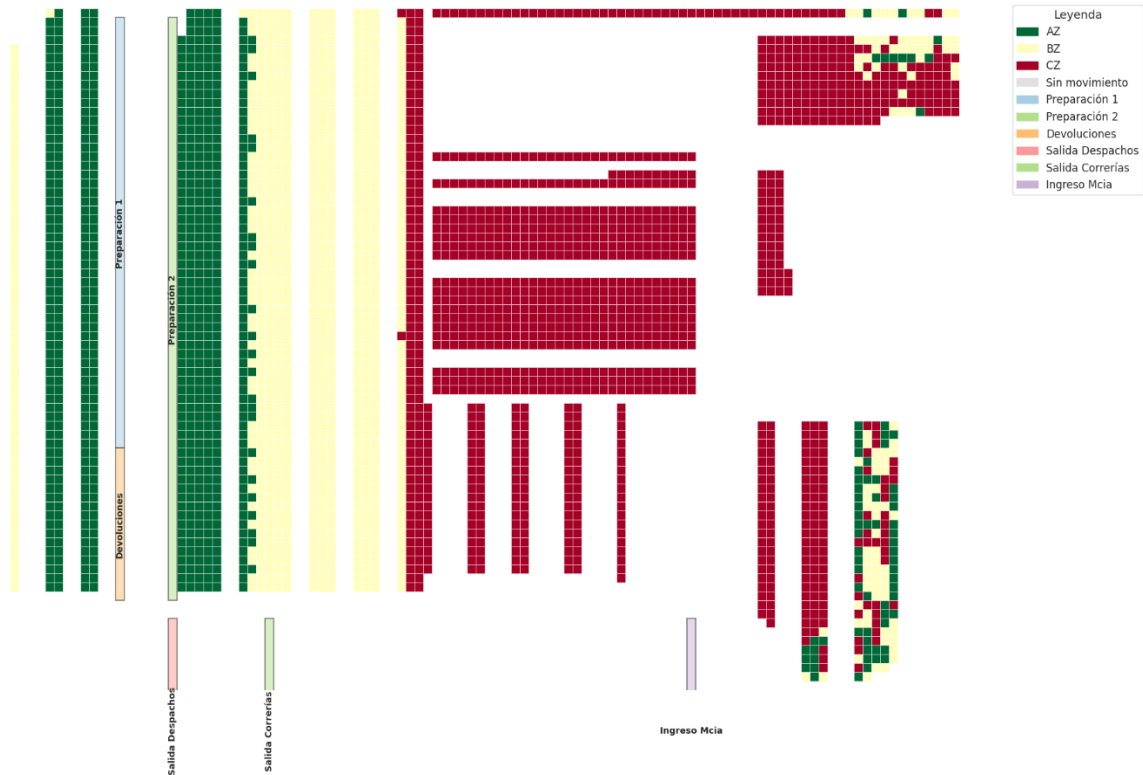
Los resultados para ambos métodos de clasificación son los que se presentan a continuación:

Fig 16. *Layout* Redistribuido Enfoque: Clasificación ABC/XYZ por Valor.



Redistribución del layout priorizando referencias con alto impacto económico, ubicándolas cerca de zonas críticas.
Fuente: visualización generada desde Google Colab.

Fig 17. *Layout* Redistribuido Enfoque: Clasificación ABC/XYZ por Frecuencia.



Redistribución del layout basada en la frecuencia operativa, con referencias de alta rotación en zonas prioritarias.
Fuente: visualización generada desde Google Colab.

6.4.3. Impacto Cuantitativo de la Redistribución.

Ahora bien, también se determinó el impacto real de la redistribución del proceso de *picking*, en términos de metros recorridos por pedido. A tal fin se simularon rutas de recolección por cada pedido, usando una función tipo *Nearest Neighbor* desde la zona de la preparación hasta la salida por un recorrido por cada casilla que estuviera involucrada en el pedido.

La Tabla 10 muestra la media de los metros recorridos por pedido según la complejidad del mismo (número de líneas), tanto pre como post redistribución de acuerdo a los dos enfoques:

Tabla 10. Distancia Promedio por Tipo de Pedido y Mejoras tras la Redistribución

TIPO DE PEDIDO	PROM. M LAYOUT ACTUAL	PROM. M REDIS. POR VALOR	PROM. M REDIS. POR FRECUENCIA	REDUCCIÓN (%) POR VALOR	REDUCCIÓN (%) POR FRECUENCIA
CORTO (1-3 LÍNEAS)	108	93	93	13.7 %	13.4 %
MEDIO (4-6 LÍNEAS)	156	141	144	10.1 %	7.8 %
LARGO (7+ LÍNEAS)	198	188	191	4.9 %	3.6 %

Distancia promedio recorrida por tipo de pedido antes y después de la redistribución, calculada en metros lineales según ruta simulada. Fuente: algoritmo ejecutado en Python desde Google Colab.

Los resultados evidencian que las mayores reducciones están relacionadas con los pedidos que se repiten más frecuentemente (que son cortos) lo que pone de manifiesto el valor estratégico y la prioridad por referencias críticas en zonas más accesibles. La redistribución permite economizar entre diez y trece metros de forma promedio por pedido corto, lo que se traduce en una mejora acumulada muy significativa a lo largo del día.

El análisis confirma que la propuesta de redistribución no solo mejora el espacio físico del *layout* en su distribución, también impacta directamente la eficiencia del proceso de *picking*, objetivo principal del modelo implementado.

6.5. ARCHIVOS EXPORTADOS Y UTILIDAD OPERATIVA

En la última fase del modelo se generaron archivos exportables que permiten realizar cotas de consulta, aplicación y replicación de los resultados del análisis en entornos ajenos a la computación. Estos archivos fueron generados de forma automática desde la plantilla de *python* en *Google Colab* y en formato Excel, lo que los hace particularmente amigables para el uso por parte del equipo operativo del centro de distribución.

Los ficheros organizan la información en tres grandes bloques:

- Clasificaciones ABC/XYZ:

Muestran la asignación de las categorías ABC, XYZ y combinada para cada referencia, con dos criterios: el de valor económico total y la frecuencia de salida. También se presentan algunos datos clave como la descripción del producto, la frecuencia operativa, el valor acumulado, etc.

- Redistribución de referencias:

Incluyen los movimientos propuestos entre la casilla actual (si se aplica) y la nueva casilla asignada en virtud del modelo de redistribución. Se generan dos versiones: una basada en la clasificación por valor y, otra, en la frecuencia. Una y otra atienden al criterio de priorizar las referencias AX–AY y de recolocar CZ en zonas periféricas.

- Listado de referencias por modalidad operativa:

Fichero específico, con el listado completo de referencias que no tienen asignación de ubicación en el *layout*, que han sido clasificadas como *cross docking*. Este fichero permite identificar, hacer seguimiento y restringir el grupo de ítems que deben ser gestionados por operaciones de rutas diferenciadas, sin almacenamiento intermedio.

Los ficheros son una herramienta que se puede aplicar directamente por el equipo logístico y que permite trasladar las decisiones, que han sido calculadas y validadas en el modelo, hacia la ejecución operativa del *layout*, el control del inventario y la gestión por criticidad logística.

Tabla 11. Archivos Exportados desde el Modelo

<i>Nombre del archivo</i>	<i>Contenido</i>	<i>Uso operativo</i>
<i>clasificacion_abcxyz_dinero.xlsx</i>	Clasificación ABC/XYZ por valor	Apoyo a redistribución prioritaria por impacto económico
<i>clasificacion_abcxyz_frecuencia.xlsx</i>	Clasificación ABC/XYZ por frecuencia	Redistribución basada en rotación operativa
<i>movimientos_redistribucion_dinero.xlsx</i>	Casillas actuales y nuevas según valor	Aplicación directa en <i>layout</i> físico
<i>movimientos_redistribucion_frecuencia.xlsx</i>	Casillas actuales y nuevas según frecuencia	Ajuste operativo por rotación

referencias_cross_docking.xlsx

Referencias
sin casilla
asignada

Control operativo del
cross docking

Listado de archivos generados automáticamente por la plantilla computacional.

Fuente: exportación directa desde el entorno Google Colab.

6.6. SÍNTESIS DE RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

Los resultados del modelo desarrollado en esta tesis integran múltiples capas de análisis logístico y permite la integración de una serie de hallazgos relevantes asociados al comportamiento del inventario, la operación de picking y la organización física del *layout* en el centro de distribución sede Medellín. Los resultados, que fueron procesados en Python mediante Google Colab, posibilitan cuantificar las oportunidades de mejora, redistribuir el inventario de manera táctica y proyectar los escenarios de eficiencia operativa que impacten en la productividad y recorridos.

Los hallazgos más importantes son:

- Una cobertura operativa media del 145,5 %, que permite satisfacer la demanda de manera constante.
- La posibilidad de sostener los actuales niveles de productividad con tan solo 4 operarios para el caso de una mejora en la eficiencia promedio del 30 %.
- La clasificación ABC por valor nos indica que el 11 % de las referencias concentra el 80 % del dinero movilizado.
- En relación a la frecuencia, el 58 % del portafolio corresponde a referencias de tipo C, las menos operativas.
- El 65,71 % del valor total vendido proviene de referencias físicas almacenadas, a pesar de sólo representar el 30,18 % del total.
- Se llevó a cabo una redistribución automatizada de más de 2.600 referencias partiendo de ubicaciones próximas a preparación para los ítems críticos y relegando referencias de baja prioridad a zonas periféricas.
- Esta redistribución de inventario nos permitió reducir de entre 10 y 15 metros de distancia en promedio por pedido corto, lo que representa una mejora en desplazamientos acumulados diarios.

Los resultados obtenidos confirman la utilidad de carácter operativo del modelo propuesto como herramienta de diagnóstico y de planificación táctica, que puede contribuir a mejorar la eficiencia en centros de distribución de alta diversidad.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo de grado tuvo como objetivo la creación y la aplicación de un modelo técnico de análisis logístico aplicado a los centros de distribución, fundamentado en la clasificación del inventario, la representación visual en el *layout* y el análisis de los indicadores operativos. A partir de datos reales recuperados desde un ERP de una operación industrial, se implementó una plantilla de cálculo en Python que permite automatizar los procesos de la clasificación de inventario, la adquisición de escenarios operativos y la redistribución del sistema de almacenamiento.

El enfoque utilizado combinó criterios de la clasificación ABC/XYZ desde dos dimensiones complementarias, por un lado, el valor económico total y, por otro, la frecuencia de salida. A partir de esta doble clasificación se definió una matriz logística de 9 cuadrantes que nos permite redistribuir el *layout* físico, priorizando aquellas referencias de mayor impacto logístico (AX, AY) en zonas cercanas a preparación y relegando aquéllas de baja rotación e inestabilidad (CZ, BZ) en zonas periféricas. Esta redistribución se contrastó con datos concretos, determinando su impacto sobre los metros por pedido, el rendimiento del sistema de *picking* y la eficiencia del aprovechamiento del espacio.

Conclusiones más relevantes:

- Se cumplió con todos los objetivos específicos propuestos, a saber: obtención de datos históricos que se documentaron mediante una plantilla automatizada; clasificación ABC/XYZ; se definieron y calcularon los KPI's logísticos más importantes, se presentó una distribución visual del *layout*, y se respaldó el modelo a través de la operativa del CEDI.
- El modelo demostró que el 69,82 % de las referencias gestionadas se implementan a través del *cross docking*, en comparación con tan solo el 30,18 % que se gestionan desde el stock en el CEDI. Pero esta última tasa representa el control del 65,71% del total del valor vendido, hecho que justifica la priorización de su organización en el *layout* del espacio físico.
- El CZ fue la categoría más frecuente en ambas clasificaciones, lo que indica una importante cantidad de referencias con baja rotación y una inestabilidad de comportamiento. Éstas fueron elegidas como candidatas a una relocalización en la periferia, o consolidación operativa.

- El sistema de *picking* representa una cobertura promedio del 145,5 % de los pedidos solicitados, incrementándose en más del 100 % en el 97,4 % de los días analizados. Sobre la base de este desempeño fueron simulados escenarios donde se demostró la viabilidad de la operación , sin detrimento de aquel de la productividad, con solo cuatro operarios, logrando además una reducción en el costo promedio por *picking* de \$3.242 a \$1.595 COP. El modelo calculó una reducción promedio de orden de 10 a 15 metros por pedido corto, luego de la redistribución los pedidos más comunes, implicando así una disminución sistemática del desplazamiento diario y un incremento en la productividad real que no supone modificación de la infraestructura existente.
- La plantilla elaborada permitió la automatización total del análisis con el uso de herramientas *open-source* (*Python* y *Google Colab*), disminuyendo errores manuales de los usuarios e impactando en la construcción de visualizaciones útiles para la toma de decisiones. Estas visualizaciones, a su vez, constituyeron una herramienta formativa para el equipo operativo, al facilitar la comprensión gráfica del *layout* y de la lógica de ubicación.
- La redistribución técnica del *layout* se basó en criterios cuantitativos, visualización del espacio físico y validación operativa, lo que valida esta propuesta derivó y, además, la hace replicable. Responde así al objetivo de este proyecto en tanto permite la disminución de recorridos e incrementa la eficiencia de la operación logística.

En suma, el modelo que se propone no solo satisface los requerimientos académicos de un trabajo de profundización en lo relacionado con la ingeniería, sino que además constituye una herramienta escalable y lista para ser implementada en operaciones reales. A su vez, su diseño modular permite que sea adaptado en otros centros de distribución y posibilita una correlación con sistemas como el WMS. Independientemente del caso que fue analizado, este proyecto muestra la importancia de usar los datos operativos, visualización y automatización como base de la mejora continua en los procesos logísticos, teniendo impactos en la eficiencia del espacio y en el propio sistema, todos ellos medibles.

8. RECOMENDACIONES

A partir del análisis de los resultados obtenidos y de la ejecución del modelo sobre datos reales del centro de distribución, se establecen las siguientes recomendaciones con el objetivo de mejorar la gestión del área logística, el uso del espacio y procurar por la evolución hacia una operación más estructurada y basada en datos. Las recomendaciones se clasifican en: operativas, tácticas y estratégicas.

8.1. RECOMENDACIONES OPERATIVAS

- Codificar las posiciones del almacén con etiquetas y códigos de barras:
Ejecutar un sistema formal de codificación alfanumérica y etiquetado físico en las casillas de las posiciones del almacén mediante etiquetas con códigos de barras que puedan ser leídos por el escáner. De esta manera, se reducirán los errores de posicionamiento, se facilitará el control de ubicaciones y marcará el inicio de la implantación de tecnologías futuras como el WMS o los lectores móviles.
- Consolidar la gestión de referencias en *cross docking*:
Para el 69,82 % de referencias que se gestionan sin ubicación, con identificadores alfanuméricos de tipo SKU en el *cross docking*, sería conveniente establecer controles más estrictos sobre las identificaciones, generar zonas de ubicación temporales y, al mismo tiempo, potenciar la trazabilidad operativa para evitar pérdidas o confusiones en la gestión.
- Priorizar ubicaciones múltiples para referencias críticas:
Las ubicaciones secundarias se pueden aprovechar para las referencias tipo AX y AY, ya que, al ser muy críticas, se puede garantizar su stock para satisfacer picos de demanda y minimizar el riesgo de desabastecimiento del inventario, además de mejorar los tiempos de alistamiento y la continuidad del ritmo del flujo operativo.
- Aprovechar la visualización del *layout* como herramienta formativa:
Se deben utilizar los mapas generados como recurso formativo en procesos de inducción a la empresa o capacitación interna de personas para construir la experiencia de recorrido físico y mejorar la toma de decisiones del personal operativo.

8.2. RECOMENDACIONES TÁCTICAS

- Implementar de forma gradual y progresiva un modelo segmentado de almacenamiento:
Facilitar la aplicación de *layouts* distribuidos basados en clasificación ABC/XYZ de forma continua, priorizando la ubicación de referencias de impacto (referencias AX, AY) sobre

las referencias de baja rotación (referencias CZ). Esto con el fin de evolucionar hacia soluciones más avanzadas

- Actualizar periódicamente la clasificación ABC/XYZ:
Ejecutar la clasificación al menos una vez por trimestre con datos de ventas y *picking* recientes. Esto permitiría un cambio en la rotación de las referencias y que se pueda actualizar el *layout* si se considera necesario.

8.3 RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS

- Utilizar la plantilla como información técnica y poder justificar el WMS:
Los resultados de la investigación validan que la utilización de datos estratificados puede mejorar la organización del almacén incluso sin tener un sistema de gestión de almacenes (WMS). Por lo tanto, se debe utilizar el modelo como herramientas de gestión avanzada.

REFERENCIAS

- [1] L. K. Nozick y M. A. Turnquist, “Inventory, Transportation, Service Quality and the Location of Distribution Centers,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 129, no. 2, pp. 362–371, Mar. 2001, doi: 10.1016/S0377-2217(00)00234-4.
- [2] E. H. Frazelle, *World-Class Warehousing and Material Handling*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [3] A. Silva, K. J. Roodbergen, L. C. Coelho y M. Darvish, “Estimating Optimal ABC Zone Sizes in Manual Warehouses,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 252, art. 108579, 2022, doi: 10.1016/j.ijpe.2022.108579.
- [4] B. Scholz-Reiter, J. Heger, C. Meinecke y J. Bergmann, “Integration of Demand Forecasts in ABC-XYZ Analysis: Practical Investigation at an Industrial Company,” *Int. J. Prod. Perform. Manag.*, vol. 61, no. 4, pp. 445–451, abr. 2012, doi: 10.1108/17410401211212689.
- [5] C. Białas, A. Revanoglou y V. Manthou, “Improving Hospital Pharmacy Inventory Management Using Data Segmentation,” *Am. J. Health-Syst. Pharm.*, vol. 77, no. 5, pp. 371–377, feb. 2020, doi: 10.1093/ajhp/zxz264.
- [6] W. McKinney, *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*, 2.^a ed. Sebastopol, CA, USA: O’Reilly Media, 2017.
- [7] Python Software Foundation, *Python Language Reference*, ver. 3.11, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.python.org/>
- [8] Google LLC, *Colaboratory*, ver. 1.0, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://colab.research.google.com/>
- [9] J. J. Bartholdi III y S. T. Hackman, *Warehouse & Distribution Science*, 4.^a ed. Atlanta, GA, USA: Georgia Institute of Technology, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.warehouse-science.com/book/index.html>
- [10] Universidad EAFIT, *Reglamento de trabajos de investigación de maestrías*, informe institucional, Medellín, Colombia, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.eafit.edu.co/investigacion/Documents/reglamento-investigacion-maestrias.pdf>
- [11] Universidad EAFIT, *Plantilla IEEE para trabajos de grado*, ver. 1.1, Medellín, Colombia, 2024. [En línea]. Disponible en: https://biblioteca.eafit.edu.co/documentos/plantilla_ieee_maestrias.pdf

- [12] Universidad EAFIT, *Guía metodológica para levantamiento de información en proyectos logísticos*, manual institucional, Medellín, Colombia, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/34321>
- [13] R. B. M. de Koster, T. Le-Duc y K. J. Roodbergen, “Design and Control of Warehouse Order Picking: A Literature Review,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 182, no. 2, pp. 481–501, oct. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2006.07.009.
- [14] K. J. Roodbergen, I. F. A. Vis y G. D. Taylor, “Simultaneous Determination of Warehouse Layout and Control Policies,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 11, pp. 3306–3326, jun. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.978029.
- [15] T. Gudehus y H. Kotzab, *Comprehensive Logistics*, 2.^a ed. Berlin, Alemania: Springer, 2012.
- [16] S. Nahmias, *Production and Operations Analysis*, 5.^a ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill/Irwin, 2004.
- [17] T. G. Trubchenko, E. S. Kiseleva, M. A. Loshchilova, A. N. Dreval, T. G. Ryzhakina y N. V. Shaftelskaya, “Application of ABC and XYZ Analysis to Inventory Optimization at a Commercial Enterprise,” *SHS Web Conf.*, vol. 80, art. 01007, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1051/shsconf/20208001007.
- [18] P. Viveros, K. González, R. Mena, F. Kristjanpoller y J. Robledo, “Slotting Optimization Model for a Warehouse With Divisible First-Level Accommodation Locations,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 3, art. 936, pp. 1–18, ene. 2021, doi: 10.3390/app11030936.
- [19] M. A. Millstein, L. Yang y H. Li, “Optimizing ABC Inventory Grouping Decisions,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 148, pp. 71–80, feb. 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.11.007.
- [20] I. Kubasakova y J. Kubanova, “Utilization of the Intersection of ABC and XYZ Analysis in Stock Planning in the Warehouse During COVID Period,” *Acta Logistica*, vol. 11, no. 3, pp. 461–472, jul. 2024, doi: 10.22306/al.v11i3.532.
- [21] F. Liu y N. Ma, “Multicriteria ABC Inventory Classification Using the Social Choice Theory,” *Sustainability*, vol. 12, no. 1, art. 182, pp. 1–17, ene. 2020, doi: 10.3390/su12010182.
- [22] J. Reis, “Exploring Applications and Practical Examples by Streamlining Material Requirements Planning (MRP) With Python,” *Logistics*, vol. 7, no. 4, art. 91, pp. 1–17, dic. 2023, doi: 10.3390/logistics7040091.
- [23] V. P. Amaral, A. C. Ferreira y B. Ramos, “Internal Logistics Process Improvement Using PDCA: A Case Study in the Automotive Sector,” *Bus. Syst. Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 100–115, 2022, doi: 10.2478/bsrj-2022-0027.

- [24] B. Rouwenhorst, B. Reuter, V. Stockrahm, G.-J. van Houtum, R. Mantel y W. H. M. Zijm, “Warehouse Design and Control: A Framework and a Literature Review,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 122, no. 3, pp. 515–533, 2000, doi: 10.1016/S0377-2217(99)00020-X.
- [25] J. Gu, M. Goetschalckx y L. F. McGinnis, “Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 203, no. 3, pp. 539–549, 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.07.031.
- [26] T. Carneiro *et al.*, “Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep-Learning Applications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874767.
- [27] C. Waubert de Piseau, D. T. Nanfack, H. Tercan, J. Löbber-Plattfaut y T. Meisen, “Dynamic Storage Location Assignment in Warehouses Using Deep Reinforcement Learning,” *Technologies*, vol. 10, no. 6, art. 129, pp. 1–11, 2022, doi: 10.3390/technologies10060129.
- [28] S. F. Fosso Wamba, A. Gunasekaran, T. Papadopoulos y E. Ngai, “Big Data Analytics in Logistics and Supply Chain Management,” *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 478–484, 2018, doi: 10.1108/IJLM-02-2018-0026.
- [29] H. Arnarson, H. Yu, M. M. Olavsbråten, B. A. Bremdal y B. Solvang, “Towards Smart Layout Design for a Reconfigurable Manufacturing System,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 68, pp. 354–367, 2023, doi: 10.1016/j.jmsy.2023.03.012.
- [30] S. Derhami, J. S. Smith y K. R. Gue, “A Simulation-Based Optimization Approach to Design Optimal Layouts for Block Stacking Warehouses,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 223, art. 107525, 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107525.
- [31] T. Le-Duc y R. B. M. de Koster, “Travel Time Estimation and Order Batching in a 2-Block Warehouse,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 176, no. 1, pp. 374–388, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2005.03.052.
- [32] J. Liu, X. Liao, W. Zhao y N. Yang, “A Classification Approach Based on the Outranking Model for Multiple Criteria ABC Analysis,” *Omega*, vol. 61, pp. 19–34, 2016, doi: 10.1016/j.omega.2015.07.004.
- [33] A. G. de Assis *et al.*, “Classification of Medicines and Materials in Hospital Inventory Management: A Multi-Criteria Analysis,” *BMC Med. Inf. Decis. Mak.*, vol. 22, art. 325, 2022, doi: 10.1186/s12911-022-02069-0.
- [34] A. M. Gobachew, D. Kitaw, E. Berhan y H. D. Haasis, “ABC/XYZ Analysis for Kanban System Implementation in Pharmaceutical Supply Chain: A Case of Ethiopian Pharmaceutical

Supply Agency,” *Int. J. Inf. Syst. Supply Chain Manag.*, vol. 14, no. 3, pp. 63–78, 2021, doi: 10.4018/IJSSCM.2021070104.

[35] R. S. Mor, A. Bhardwaj, V. Kharka y M. Kharub, “Spare Parts Inventory Management in the Warehouse: A Lean Approach,” *Int. J. Ind. Eng. Prod. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 179–189, 2021, doi: 10.22068/ijiepr.32.2.179.

[36] A. Lorenc y T. Lerher, “Effectiveness of Product Storage Policy According to Classification Criteria and Warehouse Size,” *FME Trans.*, vol. 47, no. 1, pp. 142–150, 2019, doi: 10.5937/fmet1901142L.

[37] OpenAI, *ChatGPT: Language Model for Dialogue and Content Generation*, OpenAI, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://chat.openai.com/>

ANEXOS

A continuación, se hace el listado de los anexos que se incorporan en formato digital, que complementan el contenido técnico de este trabajo. Dichos archivos se generan de manera directa a partir de la plantilla computacional desarrollada en lenguaje Python, el que permite someterlos a revisión, validación y reproducción en otros centros de distribución o proyectos logísticos similares.

Tabla 12. Anexos

<i>Código</i>	<i>Archivo</i>	<i>Descripción</i>
A1	modelo_ABC_XYZ.py	Código fuente completo del modelo implementado en Python
A2	clasificacion_abcxyz_dinero.xlsx	Clasificación ABC/XYZ basada en valor económico
A3	clasificacion_abcxyz_frecuencia.xlsx	Clasificación ABC/XYZ basada en frecuencia de salida
A4	movimientos_redistribucion_dinero.xlsx	Redistribución de referencias por clasificación de valor
A5	movimientos_redistribucion_frecuencia.xlsx	Redistribución de referencias por clasificación de frecuencia

A6	referencias_cross_docking.xlsx	Listado detallado de referencias sin ubicación asignada
A7	layout_original.png	Imagen del layout original sin segmentación técnica
A8	layout_redistribuido_valor.png	Layout redistribuido según clasificación ABC/XYZ por valor
A9	layout_redistribuido_frecuencia.png	Layout redistribuido según clasificación ABC/XYZ por frecuencia