

Solución al problema de VMI de un vendedor y múltiples minoristas con transferencia lateral

Solution to the Vendor-Managed Inventory Problem for a Single Vendor and Multiple Retailers with Lateral Transshipment

Fabian Garavito-Camargo ¹, Elena Márquez-Coronel ², Carlos Diaz-Bohórquez ³

Grupo de investigación en optimización y organización de sistemas productivos administrativos y logísticos (OPALO), Ingenierías Físico-mecánicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia. correo electrónico:

¹fabian.garavito@correo.uis.edu.co

²elena.marquez@correo.uis.edu.co

³cediazbo@uis.edu.co

Resumen

Este trabajo aborda un problema de VMI en un sistema compuesto por un vendedor y múltiples minoristas que operan bajo una política de inventario en consignación, lo que permite la transferencia de inventario entre minoristas. En este escenario, el vendedor realiza envíos a los minoristas, quienes a su vez pueden transferir inventario entre ellos. El inventario puede pasar por varios minoristas antes de llegar al minorista final. La función objetivo del modelo propuesto busca minimizar los costos del sistema. Se presenta un modelo matemático que describe el problema y se propone un algoritmo genético, implementado en MATLAB R2023B, como técnica de solución. Para validar el algoritmo, se utilizan escenarios e instancias extraídas de la literatura. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia del algoritmo para generar soluciones factibles y eficientes, confirmando su aplicabilidad en la optimización de sistemas de VMI con múltiples minoristas.

Palabras clave: Inventario administrado por el vendedor, Gestión de inventario, Cadena de suministro, Demanda determinística, Transferencia de inventario, Múltiples minoristas, Algoritmo genético.

Abstract

This paper addresses a VMI problem in a system composed of one vendor and multiple retailers operating under a consignment inventory policy, which allows inventory transfer between retailers. In this scenario, the vendor ships products to the retailers, who in turn can transfer inventory among themselves. The inventory may pass through several retailers before reaching the final retailer. The objective function of the proposed model seeks to minimize system costs. A mathematical model describing the problem is presented, and a genetic algorithm, implemented in MATLAB R2023B, is proposed as a solution technique. To validate the algorithm, scenarios and instances from the literature are used. The results demonstrate the algorithm's effectiveness in generating feasible and efficient solutions, confirming its applicability in optimizing VMI systems with multiple retailers.

Keywords: Vendor-managed inventory, Inventory management, Supply chain, Deterministic demand, Transshipment, Multiple retailers, Genetic algorithm.

1. Introducción

Para una mejor gestión de la cadena de suministro, se hace necesario que las empresas piensen en gestionar mejor sus fuentes de costos. El inventario es considerado el elemento más importante de la cadena de suministro que genera los diferentes costos logísticos, principalmente el costo de mantenimiento de inventario y el costo de transporte. La presencia de todos los factores anteriores requiere nuevas formulaciones y modelos teóricos que faciliten la toma de decisiones y permitan a las empresas comprender las formas en que invierten los recursos. Uno de los temas que más preocupa a los investigadores y empresarios en el campo de la gestión de inventarios es el problema de administrar eficientemente los inventarios, entregar productos al cliente final, mitigar el efecto látigo y responder de manera oportuna a los cambios repentinos en la demanda y las preferencias de los clientes [1].

El presente trabajo tiene como objetivo plantear una solución al problema de inventario administrado por el proveedor (VMI) para múltiples minoristas con transferencia de inventario entre minoristas con el fin de minimizar los costos en la gestión de la cadena de suministro, para el logro de este objetivo se propone una revisión bibliográfica, considerando artículos publicados desde el 2010, con respecto a modelos VMI de un vendedor y múltiples minoristas con transferencia de inventario entre minoristas, considerando sus variantes en cuanto a condicionantes o criterios de mejora; de manera que genere discusión y análisis para la formulación de un modelo pertinente; así mismo, resalte vacíos, diferencias teóricas y tendencias de conocimiento, que demuestran las características gerenciales y de negocio consideradas para la resolución de problemas, y comparan la efectividad de diferentes modelos heurísticos y técnicas de optimización para la resolución de VMI. Este documento presenta, en el capítulo 2, la revisión de la literatura A continuación, en el capítulo 3, se realiza una descripción detallada del modelo matemático, junto con sus supuestos y notaciones. Posteriormente, en el capítulo 4, se explican los detalles del diseño del algoritmo genético propuesto. Finalmente, en los capítulos 5, se presentan los resultados, su comparación con estudios previos descritos en la literatura, y su respectivo análisis, para luego dar paso a las conclusiones y recomendaciones para tener en cuenta en investigaciones futuras.

2. Revisión de la literatura

2.1. Análisis bibliométrico

La búsqueda de información científica se realizó usando las bases de datos de *Scopus*® y *Web of Science*™ dando prioridad absoluta al tema principal inventario administrado por vendedor en conjunto con los tópicos múltiples minoristas, demanda estocástica y transferencia de inventario.

El proceso de revisión bibliográfica se inició con la identificación de los términos que se utilizarán en la búsqueda y sus correspondientes descriptores en inglés. Por lo tanto, los términos clave definidos para llevar a cabo la búsqueda incluyen: *vendor-managed inventory*, *stochastic demand*, *multiple retailers* y *transshipment*.

Así mismo, se definieron criterios para la búsqueda bibliográfica, los cuales tienen como finalidad definir el tema de la manera más precisa para procurar que los artículos obtenidos brinden información pertinente sobre el tema de investigación. Finalmente, se realizó el diseño de la ecuación de búsqueda pertinente para cada una de las bases de datos.

En la Tabla 1, se muestra el número de artículos, con el que se desarrolla el análisis de literatura.

Tabla 1: Artículos en las bases de datos

Base de datos	# de artículos encontrados
Scopus	23
Web of Science	14
total	37

Fuente: Elaboración propia

2.2. Análisis de la literatura

El tema de gestión de la cadena de suministro ha tenido especial interés durante las dos últimas décadas a raíz de los avances tecnológicos que permiten su investigación, implementación y control. Sobre todo, por los avances recientes de computación en la nube, macrodatos, inteligencia artificial, entre otros. Dentro de los sistemas colaborativos se encuentra el VMI. En el mundo real los tomadores de decisiones deben determinar la forma de distribución en la cadena de suministro. Entonces el VMI trae de forma inherente un problema de ruteo IRP. Sin embargo, este estudio no se extiende hasta el problema de ruteo y se consideran sus variables como parámetros fijos de costo. Por otro lado, se tienen en cuenta los métodos de solución abordados y propuestos en la

literatura. Dentro de las investigaciones de VMI se encontraron diversas aproximaciones.

Analizaron un modelo estocástico de revisión periódica de inventario simple en un sistema VMI [2]. Mishra y Chan [3] construyeron una plataforma de simulación para cadena de suministros con capacidad multinivel y multi producto con la cual se puede estudiar el VMI y transferencia de inventarios. Chen et al. [4] evaluaron el impacto de la variabilidad en la demanda y la transferencia de inventarios en las políticas de distribución del vendedor bajo una estrategia VMI de un vendedor y dos minoristas. El trabajo de Coelho et al. [5] introduce un problema de IRP con transferencia de inventarios y desarrollan una heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para cuatro variantes del modelo que producen soluciones de alta calidad. Jemai et al. [6] tuvieron en cuenta IRP en un escenario VMI con un vendedor y múltiples minoristas bajo demanda estocástica y transferencia de inventarios. Al igual que en anteriores estudios, el trabajo en mención muestra que la transferencia de inventarios mejora el desempeño de la cadena de suministros. Rad et al. [7] consideraron una cadena de suministro VMI de dos niveles con un vendedor y dos minoristas teniendo en cuenta factores asociados al costo de pedido del vendedor. La investigación de Zhong et al. [8] se extiende hasta múltiples vendedores y minoristas en un contexto de centro de suministro y transferencia de inventarios lateral, respectivamente, donde la demanda es aleatoria, pero con distribución uniforme. En el anterior trabajo se ideó un algoritmo de solución basado en Algoritmo Genético (GA) debido a la dificultad de encontrar una solución exacta. Coelho y Laporte [9] introducen en su trabajo una política *Optimised target-level* (OTL) de reabastecimiento de inventario para sistemas VMI que muestra tener mayores ventajas frente a otras políticas cuyo modelo matemático es solucionado a través de un algoritmo *Branch-and-cut* (B&C). Govidan [10] considera un sistema VMI con un vendedor y múltiples minoristas bajo demanda estocástica que varía con el tiempo que es solucionado con una heurística de tipo *Silver-Meal* con el fin de hallar una política óptima de reabastecimiento. Lee, Paik, & Cho [11] realizó una revisión de literatura sobre estudios teóricos y empíricos de VMI y la orientación de futuras investigaciones donde hallaron, entre otras cosas, que la mayoría de las investigaciones teóricas se centran en reducción de costos. El trabajo de Mateen et al. [12] se consideró un sistema VMI para un vendedor y múltiples minoristas bajo demanda estocástica con un acuerdo contractual de almacenamiento y penalización con el fin de minimizar los costos globales. Li, Wan y Liu [13] construyeron un modelo de programación estocástica bi-nivel para plantear modelos VMI de un vendedor y múltiples minoristas que se solucionan usando una conversión

Mathematical Program with Complementarity Constraints (MPCC) determinista. Li, Wang y Chan [14] consideraron una política de ruteo de inventario en un contexto VMI bajo tiempo de reabastecimiento y demanda estocástica con un proveedor y dos minoristas. El trabajo de Han, Lu y Zhang [15] considera un problema de planeación para un VMI descentralizado de tres niveles compuesto de un vendedor, múltiples distribuidores tercerizados y múltiples minoristas bajo demanda determinística. Taleizadeh [16] estudió un sistema VMI con un vendedor y un minorista bajo demanda determinista con retrasos parciales de pedidos para un producto de materia prima química vaporosa. Lefever et al. [17] analizó una formulación mejorada del B&C para el problema de IRP con transferencia de inventarios logrando una reducción significativa en la carga computacional y superando los mejores resultados de la literatura hasta ese momento, incluso llegando a encontrar la solución óptima para dos casos de los cuales no se conocía antes. Wei et al. [18] abordaron un sistema VMI de tiempo discreto para un vendedor y un minorista con el fin de evaluar las dinámicas de inventario y producción. Al-e-Hashem et al. [19] proponen un modelo bi-objetivo estocástico de IRP con transferencia de inventario que resolvieron con un método híbrido *L-Shaped*. También señalaron la importancia sobre las emisiones de gases en el medio ambiente siendo precisamente uno de los dos objetivos. Timajchi et al. [20] plantean un problema de ruteo IRP para productos peligrosos sujetos a deterioro con presencia de riesgo de accidentes con opción de transferencia de inventarios para un proveedor y múltiples minoristas con demanda determinista. A pesar de que el trabajo no habla de VMI, plantea un método de solución CPLEX y lo compara con *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA), lo cual puede ser provechoso. Kumar et al. [21] realizaron una aproximación integrada de AHP y TOPSIS difusos para el modelado del diseño contractual de un mecanismo de coordinación de inventario de una cadena de suministro. Guimarães et al. [22] se inspiraron en un caso real para introducir un problema de inventario y ruteo IRP de dos niveles con múltiples depósitos donde la capa intermedia toma las decisiones. Propusieron una formulación *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) y un algoritmo B&C para resolver el problema. Al final desarrollaron un algoritmo metaheurístico compuesto de un ALNS mejorado por la solución exacta de un subproblema MILP que funciona bien para casos de mayor tamaño. El trabajo de Avci y Yildiz [23] va más allá al proponer un problema de ruteo *Production Routing Problem* (PRP) considerando transferencias de inventarios con el fin de reducir los costos totales. El algoritmo de solución propuesto *Mathematical Programming-based Heuristic* (MPH) reduce la carga computacional y provee resultado de calidad para casos de gran tamaño. Zhang et al. [24]

fueron los primeros en haber analizado la competencia simultánea de inventario en una cadena de suministro con un proveedor y dos minoristas con transferencias de inventarios entre ellos bajo demanda aleatoria. En sus resultados prueban que un contrato *Overstock-risk and transshipment-cost sharing* (RCS) con VMI puede coordinar la cadena de suministro. Dai et al. [25] estudiaron un IRP cíclico bajo una política VMI con productos perecederos donde se busca minimizar el costo total promedio. El método de solución es un algoritmo híbrido heurístico desarrollado mediante la combinación de un algoritmo *cuckoo* y un algoritmo mejorado de ahorros Clarke-Wright. Wettasinghe y Luong [26] estudiaron un modelo de posicionamiento de inventario en un sistema VMI de un vendedor y dos minoristas bajo demanda de Poisson. Mehrjerdi y Akhbari [27] investigaron un sistema VMI de un vendedor y múltiples minoristas bajo la función de demanda Cobb-Douglas que se soluciona mediante un modelo de juego de Stackelberg. En el trabajo de Tarhini et al. [28] se investigó un modelo VMI de un vendedor y múltiples minoristas bajo demanda determinista con una política de inventario en consignación donde existe colaboración entre los minoristas al permitirse transferencias de inventarios entre ellos. Se desarrolló un algoritmo genético para minimizar el costo y encontrar el número de envíos entre el vendedor y los minoristas. Demircan y Merdan [29] propusieron una metodología de orden de predicción para un sistema VMI en un sector de bienes de consumo de alta rotación en almacén *Fast-Moving Consumer Goods* (FMCG) basado en *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets* (IVIFS) donde se busca hacer predicciones bajo la vaguedad y subjetividad de los juicios de los seres humanos. Turken et al. [30] estudiaron las decisiones de inventario y producción entre un vendedor y un comprador dentro de una cadena de suministro de un vendedor, múltiples minorista y múltiples productos bajo diversas regulaciones ambientales. Lei et al. [31] estudiaron un problema de un modelo de vendedor de periódicos de dos productos con sustitución parcial de la demanda. Fattahi y Tanhatlab [32] diseñaron una cadena de suministro IRP estocástica con productos perecederos, transferencia de inventarios y demanda incierta. El modelo matemático, al ser complejo, se soluciona de forma aproximada basándose en una heurística de relajación lagrangiana (LR). Karimi et al. [33] manifestaron que en su investigación encontraron que los estudios sobre cadenas de suministro VMI en general no han considerado la competencia entre minoristas. Consideran un sistema con un vendedor y múltiples minoristas bajo una demanda determinística lineal. Proponen un algoritmo de solución para buscar el equilibrio de Nash en un modelo de juego de Stackelberg. Además, sugieren investigar este tipo de problema con demanda estocástica. Malleeswaran y Uthayakumar [34]

consideraron el impacto de las inversiones en sostenibilidad y las políticas de carbono en una cadena de suministro encontrando que el costo total es menor en las políticas de emisión de carbono en VMI que en el problema clásico. También, abordaron algoritmos de optimización programación, evolucionarios y genéticos. En su trabajo, Hariga et al. [35] abordaron un problema de VMI con un proveedor y múltiples minoristas teniendo en cuenta el impacto ambiental. Para esto, consideraron un acuerdo contractual con límite al nivel de inventario y penalización, además, del desarrollo de modelos económicos y ambientales junto con modelos combinados de políticas límite y tasas de carbono. Emplearon un uso novedoso de los multiplicadores de Lagrange que proporciona una herramienta para la toma de decisiones. También, recomiendan considerar la demanda estocástica en lugar de determinista. Salas-Navarro et al. [36] propusieron un modelo VMI para una SC de tres capas (fabricantes, proveedores y minoristas) con múltiples miembros en cada de ellas para productos perecederos con demanda probabilística donde el objetivo es maximizar los beneficios de la cadena de suministro a través de un modelo de optimización conjunta.

Dentro de esta revisión se encontró que el VMI ha tenido una evolución en cuanto a la complejidad en que se aborda e investiga el problema. Se evidencia la necesidad de ampliar el estudio de la demanda desde el ámbito determinista hasta el estocástico junto a modelos multinivel de múltiples integrantes. Allí se incluyen diversos parámetros, consideraciones y políticas. Dentro de estos resaltan el inventario en consignación, la competencia entre minoristas, productos perecederos y recientemente el aspecto ambiental dentro de políticas de carbono. Por otro lado, se hallaron múltiples métodos de solución para los diversos modelos matemáticos que se pueden diferenciar entre exactos y heurísticos, siendo estos últimos los más abordados, de forma conjunta (híbridos) con otros métodos o con variaciones novedosas de los mismos.

3. Modelo

El modelo matemático utilizado en esta investigación fue originalmente propuesto por Tarhini et al. [28] y es muy similar en todos los aspectos al modelo de Zavanella & Zanoni [37]. Sin embargo, este modelo, permite la transferencia de inventario entre minoristas.

En él se considera un proveedor que suministra un único producto a múltiples minoristas, quienes gestionan el inventario bajo la estrategia de Inventario Administrado por el Vendedor (VMI). El inventario se maneja mediante una política de consignación, lo que permite al proveedor mantener parte de su inventario en las instalaciones de los minoristas y, además, transferir

inventario de un minorista a otro. Los minoristas involucrados en la transferencia de inventario son seleccionados en función de su capacidad de almacenamiento y de la capacidad de transferencia entre ellos. De esta manera, los minoristas actúan como centros de redistribución. Y el inventario puede pasar por múltiples centros de redistribución [28].

3.1. Supuestos

Para dar solución al problema se tienen en cuenta los siguientes supuestos.

- El comprador tiene capacidad de almacenamiento limitada
- La demanda es determinística y constante.
- El ciclo, para el presente trabajo se define como en tiempo durante el cual el proveedor incurre en costos de preparación y envío de todas las unidades producidas, agrupadas en lotes, a cada comprador para satisfacer la demanda de cada uno. Además, durante el ciclo se realizan transferencias de inventario entre los minoristas sin incumplir el requisito anterior. [28]
- Un comprador recibe y envían las transferencias de inventario al principio del ciclo
- La tasa producción es mayor la suma de todas tasas de demandas.
- No hay tiempo de entrega para o envíos del proveedor a los compradores, ni para las transferencias entre compradores.
- Los costos de ordenar incluyen todos los costos asociados a el transporte, la preparación de la orden carga y descarga, entre otros. [6]
- Se asume que las transferencias de inventario se realizan únicamente entre minoristas que se encuentran en la misma zona geográfica, donde los costos de mantenimiento son similares; para los fines de este trabajo, se considera que dichos costos son equivalentes.

3.2. Notaciones

Tabla 2: describe los parámetros y las variables de decisión usadas en el modelo

Parámetros	
A	Costos de preparación o producción del vendedor
A_i	Costo de ordenar del minorista i (\$/ lote)
A_{ij}	Costo de transferencia del minorista i al minorista j (\$/lote)
h_1	Costo de mantenimiento del vendedor por unidad por unidad de tiempo
h_{2i}	Costo de mantenimiento del minorista i por unidad por unidad de tiempo
P	Tasa de producción continua del vendedor

d_i	Tasa de demanda del comprador i
y	Número de compradores
C_i	Capacidad de almacenamiento del minorista i
C_v	Capacidad de almacenamiento del vendedor
s_i	Capacidad de transporte al comprador i
s_{ij}	Capacidad de transporte del comprador i al comprador j
TC	Costo total promedio del sistema por unidad de tiempo
Variables de decisión	
q_i	Cantidad transportada por envío al comprador i
q_{ij}	Cantidad transportada del comprador i al j por envío
T	Duración del ciclo de reabastecimiento
n_i	Número de envío al comprador i
n_{ij}	Numero de envíos del comprador i al comprador j

Fuente: elaboración propia

3.3. Modelo matemático

3.3.1 Función objetivo

$$TC = \frac{A}{T} + \frac{h_1}{2PT} \sum_{i=1}^y n_i q_i^2 + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^y \left[n_i A_i + \sum_{j=1, j \neq i}^y n_{ij} A_{ij} \right] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^y h_{2i} \left[n_i q_i - \frac{q_i^2 n_i (n_i - 1)}{TP} \right] \quad (1)$$

3.3.2 Restricciones

$$n_i q_i + \sum_{k=1}^y n_{ki} q_{ki} - \sum_{k=1}^y n_{ik} q_{ik} = d_i T, \quad \forall i \quad (2)$$

$$n_i q_i - \frac{(n_i - 1) q_i d_i}{P} + \sum_{k=1}^y n_{ki} q_{ki} - \sum_{k=1}^y n_{ik} q_{ik} \leq C_i, \quad \forall i \quad (3)$$

$$q_i + \sum_{k=1}^y n_{ki} q_{ki} - \sum_{k=1}^y n_{ik} q_{ik} \geq \frac{q_i d_i}{P}, \quad \forall i \quad (4)$$

$$q_i \leq C_v, \quad \forall i \quad (5)$$

$$q_i \leq s_i, \quad \forall i \quad (6)$$

$$q_{ij} \leq s_{ij}, \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$n_{ij} = 0, 1, \quad \forall i \quad (8)$$

$$n_i > 0, \quad n_i \in \mathbb{Z}, \quad \forall i \quad (9)$$

$$q_i \geq 0, \quad \forall i \quad (10)$$

$$q_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$T > 0 \quad (12)$$

La primera restricción, ecuación (2), asegura que la cantidad total que ingresa al nodo de un comprador i , sumando todo lo enviado por el vendedor y lo recibido de otros compradores, menos lo que sale de dicho nodo,

ecuación (9), asegura que el número de envíos sea estrictamente un entero positivo. La novena y décima restricciones, ecuaciones (10) y (11), aseguran que las cantidades enviadas sean positivas. Finalmente, la última restricción, ecuación (12), garantiza que la duración del ciclo sea positiva y mayor que cero.

4. Método: Algoritmo genético

En este capítulo se aborda cómo se desarrolló el algoritmo utilizado para resolver el modelo matemático propuesto. El método de solución es GA. La elección de

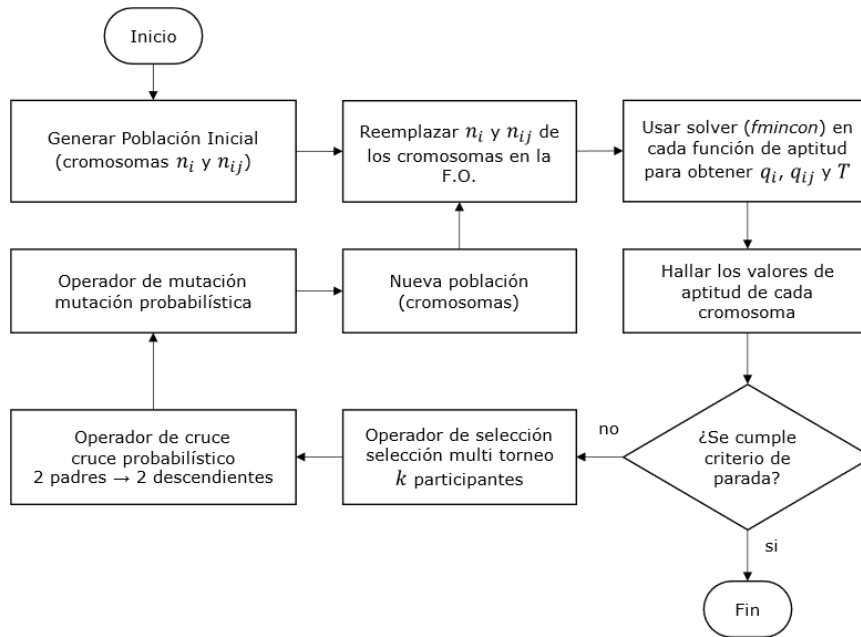


Figura 1: Diagrama de flujo del algoritmo genético. Fuente: Elaboración propia

sea igual a la demanda total del comprador i en T . La segunda restricción, ecuación (3), garantiza que el nivel de inventario de un comprador i no exceda su capacidad de almacenamiento. La tercera restricción, ecuación (4), asegura que lo que un comprador i transfiere a otro comprador, o a otros compradores, no exceda la cantidad recibida del vendedor más lo recibido de los otros compradores. La cuarta restricción, ecuación (5), garantiza que la cantidad producida por el vendedor para su envío no exceda su capacidad de almacenamiento. La quinta y sexta restricciones, ecuaciones (6) y (7), aseguran que la cantidad enviada del vendedor al comprador i y la cantidad enviada del comprador i al comprador j , en un envío, no excedan la capacidad de transporte. La séptima restricción, ecuación (8), garantiza que el número de transferencias de inventario de un comprador a otro sea cero o uno. La octava restricción,

esta metaheurística se realizó con base en la revisión de la literatura, en la cual diversos autores con problemas similares sugerían esta técnica.

El texto utilizado como guía para la realización del presente trabajo es la publicación de Tarhini et al. [28], en la cual los autores proponen un algoritmo genético para la solución del problema. Aunque se decidió optar por un algoritmo genético en el desarrollo del capítulo se podrán observar las diferencias entre ambas propuestas, así como los desafíos que presenta el modelo matemático.

4.1. Algoritmo

El algoritmo genera una población inicial de cromosomas compuesto de las variables enteras. Luego, estos cromosomas son usados como parámetros en la función

objetivo y se obtienen las funciones de aptitud. Las funciones de aptitud son resueltas por un *solver* distinto para obtener el resto de las variables continuas y el valor fitness de cada cromosoma. Si un criterio de parada no se cumple entonces se ejecuta el GA con sus operadores de selección, cruce y mutación. La nueva población pasa por el mismo proceso hasta satisfacer el criterio de parada o hasta agotar el número de generaciones y/o corridas establecido. (ver Figura 2).

Cabe resaltar que el programa MATLAB tiene un paquete llamado *Optimization Toolbox* que contiene un *solver* llamado *ga*. Este *solver* tiene un limitante: no admite restricciones que sean igualdades no lineales de variable entera. Justamente, la ecuación (6) tiene esas características. Por tal motivo, se decidió resolver el problema por partes como se describió en el anterior párrafo, al igual que en el texto guía. Por otra parte, el Algoritmo Genético (GA) desarrollado se codificó en MATLAB R2023b.

4.1.1 Representación del cromosoma

Cada cromosoma está compuesto por y^2 número de genes, donde y es el número de minoristas, y se divide en dos partes. La primera parte del cromosoma contiene y número de genes que representan el número de envíos que reciben los minoristas por parte del vendedor expresado en la variable n_i . La segunda parte contiene $(y^2 - y)$ genes, los cuales representan cada posible transferencia de inventarios entre minoristas (ver Figura 3)

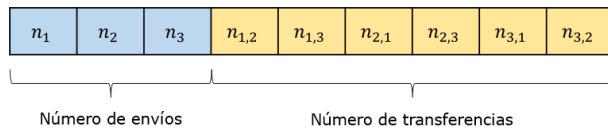


Figura 2: Representación del cromosoma. Fuente: elaboración propia

4.1.2 Población inicial

El algoritmo propuesto inicia creando una población inicial de cromosomas cuyos valores son generados de forma aleatoria. En el proceso, se asegura que cada cromosoma represente un abastecimiento completo, es decir, que ningún minorista se quede sin recibir inventario durante el ciclo. Si esto no se cumple, se obtiene una solución no factible y el algoritmo genera un nuevo cromosoma que sustituye al cromosoma no factible.

A diferencia de Tarhini, en la población inicial de este modelo no se incluyen soluciones como la del árbol de mínima expansión MST o la del modelo propuesto sin

transferencia de inventarios (donde se considera la solución de Zavanella & Zaroni para el Caso 1 en particular). La razón es que se busca observar el comportamiento del algoritmo sin la necesidad de incluir estas soluciones, las cuales pueden influir significativamente en la convergencia de soluciones.

4.1.3 Función de aptitud

Una vez creada la población inicial, se procede a reemplazar los valores de cada cromosoma en la función objetivo para obtener funciones fitness derivadas de la función objetivo, cuya cantidad es igual al tamaño de la población inicial. Estas funciones fitness, llamada también función de aptitud, representada en la ecuación (13), se solucionan mediante un *solver* para obtener los valores q_i , q_{ij} y T que minimizan el costo total. El costo total de cada función de aptitud es el valor fitness correspondiente a su respectivo individuo (cromosoma).

$$f(\underline{x}) = \frac{A}{x_1} + \frac{1}{x_1} \cdot \sum_{i=2}^n B_i \cdot x_i^2 + \sum_{i=2}^n C_i \cdot x_i \quad (13)$$

4.1.4 Criterio de parada

El algoritmo utiliza un criterio de parada para decidir si debe continuar o detenerse. En caso de detenerse, se selecciona el cromosoma con el valor de fitness más bajo entre los evaluados al momento de la detención. En este estudio, se ha optado por utilizar el número de generaciones como criterio de parada.

4.1.5 Operador de selección

La búsqueda de una mejor solución comienza con un operador de selección. En este trabajo se optó por un método de selección multi torneo

Primero, se determina el número de participantes k por torneo, siendo el número de torneos igual al tamaño de la población inicial. El *mating pool* se genera incluyendo k veces cada individuo de la población inicial. Posteriormente, se crea un vector índice de números enteros aleatorios sin repetición (vector de números no ordenados) para cada individuo del *mating pool*, y se seleccionan los primeros k participantes; el ganador es el que tiene mejor fitness. El individuo con mejor fitness es seleccionado al menos una vez, o hasta k veces si no compete consigo mismo. El peor individuo solo puede ser seleccionado una vez en el caso de que compita en un torneo donde los k participantes sean él mismo.

4.1.6 Operador de Cruce

De forma aleatoria se eligen dos padres (*padre 1* y *padre 2*) de la población seleccionada, los cuales generan dos descendientes (*descendiente 1* y *descendiente 2*). Estos padres no volverán a ser seleccionados en los cruces posteriores. Una probabilidad de cruce determina si ocurre el cruce entre ambos padres. Si no ocurre cruce, se generan dos descendientes idénticos a los padres. En caso contrario, puede ocurrir lo siguiente según un criterio que sigue una distribución de probabilidad uniforme:

- No se cumple el criterio: el *descendiente-1* hereda el gen particular del *padre-1* y el *descendiente-2* hereda el gen particular del *padre-2*.
- Se cumple el criterio: el *descendiente-1* hereda el gen particular del *padre-2* y el *descendiente-2* hereda el gen particular del *padre-1*

Así se procede gen por gen hasta completar los dos descendientes. Una vez obtenidos los dos descendientes, se evalúa si ambos cumplen con el criterio de abastecimiento completo. Si uno de ellos, o ambos, no cumplen con este criterio, se repite el proceso de cruce (ver Figura 3).

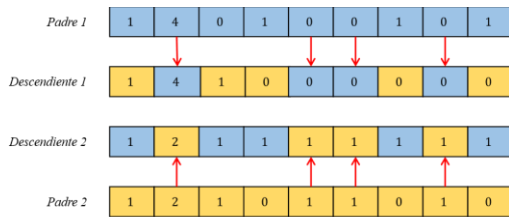


Figura 3 Representación del operador de cruce. Las flechas en rojo indican que en esos casos no se cumplió el criterio de cruce para esos genes en particular.

Fuente: elaboración Propia

Tabla 3 Comparación de resultados experimentales de las variables de decisión discretas con la instancia literaria. En el caso uno se obtuvo una solución diferente

		n_1	n_2	n_3	$n_{1,2}$	$n_{1,3}$	$n_{2,1}$	$n_{2,3}$	$n_{3,1}$	$n_{3,2}$
Caso 1	Algoritmo	0	2	1	0	0	1	0	0	0
	Tarhini et al.	0	1	0	0	0	1	1	0	0
Caso 2	Algoritmo	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	Tarhini et al.	0	1	0	0	0	1	1	0	0
Caso 3	Algoritmo	1	4	1	0	0	0	0	0	0
	Tarhini et al.	1	4	1	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Operador de mutación

El operador de mutación se basa en la probabilidad de que el alelo de un gen en un cromosoma sufra un cambio en su valor. Si se cumple el criterio de probabilidad de mutación, los alelos de uno o varios genes de un cromosoma aumentan o disminuyen su valor siguiendo una distribución normal con media igual a cero (0) y desviación estándar igual a uno (1). Si el cambio de valor viola alguna restricción entonces se genera un nuevo valor que la satisfaga. Una vez finaliza el proceso para un cromosoma, se evalúa si el individuo mutado cumple con el criterio de factibilidad de abastecimiento completo. Si no lo cumple, se vuelve a ejecutar el operador de mutación. De este modo, se crea la primera generación de individuos (ver Figura 4).

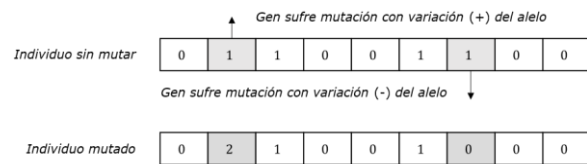


Figura 4 Representación del operador de mutación.

Fuente: elaboración propia

4.2. Ejemplos numéricos y casos de evaluación

Tarhini et al. [28] produjo resultados a través de un ejemplo numérico que se deriva en tres (3) casos diferentes que dependen de las capacidades de

almacenamiento y de transporte. Estos casos son usados como instancias de comparación.

4.2.1 Caso 1: capacidades de almacenamiento y de transporte ilimitadas

En este caso se consideran que los parámetros s_i , s_{ij} , C_v y C_i tienden teóricamente a infinito según (Tarhini et al., 2020). Por lo tanto, no limitan el problema

4.2.2 Caso 2: capacidades de almacenamiento limitadas y capacidades de transporte ilimitadas

En este caso se consideran que los parámetros s_i y s_{ij} tienden teóricamente a infinito. Sin embargo, los parámetros C_v y C_i ahora se consideran limitantes del problema.

4.2.3 Caso 3: capacidades de almacenamiento y capacidades de transporte limitadas

En este caso se consideran que los parámetros s_i , s_{ij} , C_v y C_i son limitantes del problema.

5. Resultados

El algoritmo se ejecutó usando un procesador Intel® Core™ i5-8250U con 8 GB de memoria RAM DDR4 SO-DIMM a 2400 MHz a través del programa MATLAB R2023b.

Se ejecutó el algoritmo para comprobar si los resultados obtenidos convergían a los de la instancia o se obtenían mejores resultados. Para esto, se ejecutaron diez corridas para cada caso, cada una con la misma secuencia de números aleatorios para repetibilidad del experimento y un criterio de parada de diez generaciones teniendo en cuenta las limitaciones computacionales.

Tabla 5 Comparación de resultados experimentales de las variables de decisión continuas con la instancia literaria. En el caso 1 se obtuvo y solución diferente.

		q_1	q_2	q_3	$q_{1,2}$	$q_{1,3}$	$q_{2,1}$	$q_{2,3}$	$q_{3,1}$	$q_{3,2}$	T
Caso 1	Algoritmo	0	317,18	101,50	0	0	126,87	0	0	0	0,2537
	Tarhini et al.	0	449	0	0	0	77,41	61,93	0	0	0,1548
Caso 2	Algoritmo	0	362,50	0	0	0	62,50	50	0	0	0,1250
	Tarhini et al.	0	362,5	0	0	0	62,5	50	0	0	0,1251
Caso 3	Algoritmo	80	80	64	0	0	0	0	0	0	0,1600
	Tarhini et al.	80	80	64	0	0	0	0	0	0	0,1600

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Comparación de resultados experimentales de costo total con la instancia literaria y tiempo de ejecución. En el caso 1 se obtuvo una mejor solución.

Caso	Número de corridas	Tiempo de CPU promedio [s]	Mejor solución [\$]	Tarhini et al. [\$]	Diferencia [%]
1	10	622,71	3309,88	3358,5	1,4478%
2	10	478,05	3435,75	3434,5	-0,0364%
3	10	799,56	5058,88	5058,9	0,0004%

Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5. En el Caso 1, las diez corridas produjeron un cromosoma diferente cuyo costo total fue de \$3309.88, un 1,4478% menor que el de la instancia, por lo tanto, se obtuvieron mejores resultados. En el Caso 2, las diez corridas convergieron a una misma solución, sin embargo, el costo total obtenido fue ligeramente mayor a pesar de todo. En el Caso 3, nueve de las diez instancias convergieron la misma solución de la instancia. Se observa también que los tiempos de CPU promedio fueron mejores para el Caso 2 seguidos de los Casos 1 y 3.

6. Conclusiones

Según la revisión de la literatura, el VMI es un tema que ha sido ampliamente estudiado en diversas formas y enfoques. Los estudios de casos donde el impacto ambiental o los productos perecederos son los temas más recurrentes además del modelado de problemas teóricos. En este caso la transferencia de inventarios (*transshipment*) es un tópico que ha cobrado interés reciente en el ámbito de la competencia colaborativa.

La complejidad computacional inherente del tipo modelo matemático abordado en este trabajo, esto es, funciones no lineales sujetas a restricciones de igualdad no lineales de variable entera o mixta, involucra el uso de métodos no convencionales de solución como el que se abordó en este trabajo, los cuales son tópicos que han cobrado mayor interés en la última década.

Al analizar los resultados se concluye que el algoritmo propuesto es lo suficientemente robusto para ser usado como herramienta para la toma de decisiones. Esto se infiere del hecho que los resultados se obtuvieron en tiempos de computación razonables y en un caso los resultados fueron mejores en un 1.45%.

7. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se puede extender el modelo a un problema de ruteo IRP considerando despachos de diferente tamaño y diferentes capacidades de transporte. También se recomienda aplicar el modelo a escenarios reales.

8. Referencias

- [1] N. Kumar Verma y A. K. Chatterjee, «A multiple-retailer replenishment model under VMI: Accounting for the retailer heterogeneity,» *Computers & Industrial Engineering*, 2016.
- [2] J. -Y. Lee y L. Ren, «Vendor-managed inventory in a global environment with exchange rate uncertainty,» *International Journal of Production Economics*, vol. 130, n° 2, pp. 169-174, Abril 2011.
- [3] M. Mishra y F. T. Chan, «Impact evaluation of supply chain initiatives: a system simulation methodology,» *International Journal of Production Research*, vol. 50, n° 6, pp. 1554-1567, 2012.
- [4] X. Chen, G. Hao, X. Li y K. F. C. Yiu, «The impact of demand variability and transshipment on vendor's distribution policies under vendor managed inventory strategy,» *International Journal of Production Economics*, vol. 139, n° 1, pp. 42-48, 2012.
- [5] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau y G. Laporte, «The inventory-routing problem with transshipment,» *Computers & Operations Research*, vol. 39, n° 11, pp. 2537-2548, 2012.
- [6] Z. Jemai, Y. Rekik y R. Kalai, «Inventory routing problems in a context of vendor-managed inventory system with consignment stock and transshipment,» *Production Planning & Control*, vol. 24, n° 8-9, pp. 671-683, 2013.
- [7] R. H. Rad, J. Razmi, M. S. Sangari y Z. F. Ebrahimi, «Optimizing an integrated vendor-managed inventory system for a single-vendor two-buyer supply chain with determining weighting factor for vendors ordering cost,» *International Journal of Production Economics*, vol. 153, pp. 295-308, Julio 2014.
- [8] J.-H. Zhong, R.-X. Jiang y G. Zheng, «Multi-Item Distribution Policies with Supply Hub and Lateral Transshipment,» *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015.
- [9] L. C. Coelho y G. Laporte, «An optimised target-level inventory replenishment policy for vendor-managed inventory systems,» *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 12, pp. 3651-3660, 2015.
- [10] K. Govidan, «The optimal replenishment policy for time-varying stochastic demand under vendor managed inventory,» *European Journal of Operational Research*, vol. 242, n° 2, pp. 402-423, 2015.
- [11] J.-Y. Lee, S.-K. Paik y R. K. Cho, «Vendor-managed inventory: A literature review on theoretical and empirical studies and future research directions,» *International Journal of Advanced Operations Management*, vol. 7, n° 3, pp. 199-228, 2015.
- [12] A. Mateen, A. K. Chatterjee y S. Mitra, «VMI for single-vendor multi-retailer supply chains

- under stochastic,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 79, pp. 95-102, 2015.
- [13] Y. Li, Z. Wan y J. Liu, «Bi-level programming approach to optimal strategy for vendor-managed inventory problems under random demand,» *ANZIAM Journal*, vol. 59, n° 2, pp. 247-270, 2017.
- [14] M. Li, Z. Wang y F. T. Chan, «An inventory routing policy under replenishment lead time,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, n° 12, pp. 3150-3164, 2017.
- [15] J. Han, J. Lu y G. Zhang, «Tri-level decision-making for decentralized vendor-managed inventory,» *Information Sciences*, vol. 421, pp. 85-103, 2017.
- [16] A. Taleizadeh, «Vendor-managed inventory system with partial backordering for evaporating chemical raw material,» *Scientia Iranica*, vol. 24, n° 3, pp. 1483-1492, 2017.
- [17] W. Lefever, E.-H. Aghezzaf, K. Hadj-Hamou y B. Penz, «Analysis of an improved branch-and-cut formulation for the Inventory-Routing Problem with Transshipment,» *Computers & Operations Research*, vol. 98, pp. 137-148, 2018.
- [18] Y. Wei, F. Chen y W. Hongwei, «Inventory and Production Dynamics in a Discrete-Time Vendor-Managed Inventory Supply Chain System,» *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2018, 2018.
- [19] S. M. M. Al-e-Hashem, Y. Rekik y E. M. Hoseinhajlou, «A hybrid L-shaped method to solve a bi-objective stochastic transshipment-enabled inventory routing problem,» *International Journal of Production Economics*, vol. 209, pp. 381-398, 2019.
- [20] A. Timajchi, S. M. M. Al-e-Hashem y Y. Rekik, «Inventory routing problem for hazardous and deteriorating items in the presence of accident risk with transshipment option,» *International Journal of Production Economics*, vol. 209, pp. 302-315, 2019.
- [21] M. Kumar, D. Garg y A. Agarwal, «An integrated approach of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS in modelling contractual design of supply chain inventory coordination mechanism,» *International Journal of Management and Decision Making*, vol. 18, n° 4, pp. 407-454, 2019.
- [22] T. A. Guimarães, L. C. Coehlo, C. M. Schenekemberg y C. T. Scarpin, «The two-echelon multi-depot inventory-routing problem,» *Computers and Operations Research*, vol. 101, pp. 220-233, 2019.
- [23] M. Avci y S. T. Yildiz, «A mathematical programming-based heuristic for the production routing problem with transshipments,» *Computers & Operations Research*, vol. 123, 2020.
- [24] P. Zhang, X. Xu, V. Shi y J. Zhu, «Simultaneous inventory competition and transshipment between retailers,» *International Journal of Production Economics*, vol. 230, 2020.
- [25] Z. Dai, K. Gao y C. B. Giri, «A hybrid heuristic algorithm for cyclic inventory-routing problem with perishable products in VMI supply chain,» *Expert Systems with Applications*, vol. 153, 2020.
- [26] J. Wettasinghe y H. T. Luong, «An inventory positioning model under vendor managed inventory system,» *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 34, n° 2, pp. 241-282, 2020.
- [27] Y. Z. Mehrjerdi y M. Akhbari, «The stackelberg game model for vendor-managed inventory systems: A wholesale price versus a two-part tariff contract,» *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 7, n° 2, pp. 148-163, 2020.
- [28] H. Tarhini, M. Karam y M. Y. Jaber, «An integrated single-vendor multi-buyer production inventory model with transshipments between buyers,» *International Journal of Production Economics*, vol. 225, 2020.
- [29] M. L. Demircan y E. Merdan, «A proposed order prediction methodology for vendor-managed inventory system in fmcg sector based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets,» *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 14, n° 1, pp. 1489-1500, 2021.
- [30] N. Turken, A. Geda y V. D. G. Takasi, «The impact of co-location in emissions regulation clusters on traditional and vendor managed supply chain inventory decisions,» *Annals of Operations Research*, 2021.
- [31] L. Lei, J. Ru, R. Shi y J. Zhang, «A Two-Product Newsvendor Problem with Partial Demand Substitution,» *Production and Operations Management*, vol. 31, n° 3, pp. 1157-1173, Marzo 2022.
- [32] P. Fattahi y M. Tanhatlab, «Stochastic inventory-routing problem with lateral

- transshipment for perishable product,» *Journal of Modelling in Management*, vol. 17, n° 2, pp. 539-568, 2022.
- [33] M. Karimi, H. Khademi-Zare, Y. Zare-Mehrjerdi y M. Bagher Fakhrazad, «Optimizing service level, price, and inventory decisions for a supply chain with retailers' competition and cooperation under VMI strategy,» *RAIRO - Operations Research*, vol. 56, n° 2, pp. 1051-1078, 2022.
- [34] B. Malleeswaran y R. Uthayakumar, «A Vendor-Managed Inventory Model for Imperfect Production Process Using Sustainability Investment and Energy Consumption Under Different Carbon Policies,» *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 6, n° 3, pp. 707-722, 2022.
- [35] M. Hariga, R. As'ad y M. Ben-Daya, «Vendor Managed Inventory Coordination Under Contractual Storage Agreement and Carbon Regulation Policies,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 66098-66112, 2022.
- [36] K. Salas-Navarro, J. M. Romero-Montes, J. Acevedo-Chedid, H. Ospina-Mateus, W. F. Florez y L. E. Cárdenas-Barrón, «Vendor managed inventory system considering deteriorating items and probabilistic demand for a three-layer supply chain,» *Expert Systems with Applications*, vol. 218, 2023.
- [37] L. Zavanella y S. Zanoni, A one-vendor multi-buyer integrated production-inventory model: The 'Consignment Stock' case, Brescia, Italia: Elsevier, 2009.