

Una nueva metaheurística híbrida para resolver el problema 2eLIRP

New hybrid metaheuristic for the 2eLIRP

Javier Arias-Osorio ^{1a}, Julio Camacho-Pinto ^{1b}

¹ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Orcid: ^a 0000-0001-6149-556X, ^b 0000-0003-2541-8000.

Correos electrónicos: ^a jearias@uis.edu.co, ^b jccampin@correo.uis.edu.co

Recibido: 31 marzo, 2020. Aceptado: 7 noviembre, 2020. Versión final: 11 febrero, 2021.

Resumen

En este trabajo se considera el problema de optimización que integra las funciones logísticas de localización, transporte e inventario multiperiodo en una red de distribución de dos escalones, denominado 2eLIRP. En este artículo se propone para su solución una nueva metaheurística híbrida, basada en Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos y la heurística del Vecino más cercano. Los rendimientos de esta técnica híbrida se comparan con las metaheurísticas clásicas que tiene como base, encontrando mejores soluciones en el 96,67% de los experimentos realizados.

Palabras clave: 2eLIRP; red de distribución; metaheurísticas.

Abstract

In this study we considered the optimization problem that integrates the logistics operations of location, routing and multiperiod inventory in a two echelon distribution network, named 2eLIRP. In this paper we propose a new hybrid metaheuristic based on Tabu search, genetic algorithms and the nearest neighbor heuristic. The performances of our technique was compared with classics metaheuristics and the results of the experiments carried out in 96.67% were better.

Keywords: 2eLIRP; distribution network; metaheuristic.

1. Introducción

Los primeros modelos de optimización de la red de distribución que visualizan la interrelación de las decisiones de localización, ruteo e inventarios datan de finales de los años 80, cuando Hall [1] busca estrategias de optimización de la cadena de suministros a través de la consolidación de ruteo, inventario y centros de distribución que denomina terminales.

Por su parte Perl & Sirisoponilp [2] analizan la relación entre los problemas de localización, ruteo e inventarios y proponen un modelo de distribución de red que contempla las interdependencias entre los problemas. Chien, Balakrishnan, & Wong [3] notando la estrecha relación entre las decisiones logísticas de ruteo de vehículos y localización de inventarios, buscan

maximizar las utilidades a través de la integración de estos problemas basados en una solución planteada a partir de un problema de programación entera mixta utilizando relajación lagrangiana.

Tradicionalmente el objetivo principal de la optimización de la red de distribución es la minimización de costos o maximización de utilidades, aunque algunos autores según el contexto de sus modelos plantean como objetivo secundario la disminución de tiempos e incluso se pueden proponer otros objetivos como en [15], donde se plantea la minimización de la huella de carbono teniendo en cuenta que los consumidores con alta conciencia ambiental están dispuestos a pagar un precio más alto por productos cuya huella de carbono sea más baja [16].

En este artículo se aborda el problema de optimización 2eLIRP multiperiodo. El artículo se organiza así: Primero, una revisión de literatura, luego la formulación del modelo matemático considerado, continuando con la revisión de la técnica de optimización híbrida a utilizar, y finalizando con los experimentos y los resultados del trabajo.

2. Revisión de literatura

Existen suficiente literatura donde se justifica el trabajo integrado de las funciones logísticas de localización, transporte e inventario. Por ejemplo, Nozick & Turnquist [4] sugieren que para determinar el número óptimo y localización de centros de distribución (DC's), los costos de inventario deben ser considerados junto con los demás costos de localización y transporte; mientras en ese mismo año Jayaraman [5] presenta su investigación sobre el impacto de la relación de los problemas de localización, ruteo e inventarios en el diseño de la red de distribución; tres años más tarde Nozick & Turnquist [6] plantean un modelo de localización de centros de distribución considerando la información de costos de inventario y transporte, con el objetivo no solo de ahorrar costos sino de prestar un servicio de calidad enfocado en el tiempo de respuesta al cliente.

Liu & Lee [7] son los primeros en presentar el problema LIRP, para el cual plantearon un modelo heurístico de dos fases en busca de una minimización de costos; sin embargo, este modelo era muy propenso a quedar atrapado en óptimos locales. Por lo cual Liu & Lin [8] proponen otro modelo heurístico, esta vez de optimización global combinando búsqueda tabú y recocido simulado; abordando el problema de LIRP como el conjunto entre el problema de localización (Facility Location Problem, FLP) y el problema de inventarios y ruteo (IRP).

Por su parte Max Shen & Qi [9] plantean incorporar costos de ruteo e inventarios al problema de localización. A partir de este modelo Ahmadi Javid & Azad [10] proponen abordar el LIRP desde una combinación heurística entre búsqueda tabú y recocido simulado.

W.J. Guerrero, C. Prodhon [11] proponen dos contextos principales donde surgen aplicaciones reales del modelo LIRP: Cuando una cadena de suministro es flexible en cuanto a la creación de una localización de almacenes; ya sea que los rente o en casos de proyectos temporales como misiones humanitarias de manejo de desastres [12]. El segundo caso es cuando los objetivos de largo plazo buscan un diseño de cadena de suministro con diferentes frecuencias de distribución por tienda y los vehículos

pueden visitar más de una tienda por ruta. Adicionalmente Hiassat & Diabat [13] resaltan el impacto que el LIRP puede tener en una red de distribución de productos perecederos, debido a la oportunidad que se genera buscar la optimización a través de toda la cadena de suministro, y años más tarde abordan este modelo mediante un algoritmo genético [14].

2.1. LIRP para una red de distribución de dos escalones

En la literatura se encuentran diversos modelos que abordan el LIRP para una red de distribución de dos escalones. En [9] se presenta un modelo multiperiodo con demanda estocástica, mientras que [17] se diseña una heurística de dos fases para un modelo de un solo producto con flota homogénea y demanda estocástica. Años después en [18] se construye un algoritmo genético híbrido combinado con reglas heurísticas y algoritmo Clarke & Wright, para una red de distribución multiproducto con *close-loop* y demanda estocástica, y [19] presenta un algoritmo en base a una relajación langragiana anidada partiendo en problema en dos, para un modelo que también cuenta con demanda estocástica. Más adelante [11] incluye múltiples depósitos y múltiples tiendas con capacidad de almacenamiento sobre un horizonte de tiempo discreto y en [20] se presenta un modelo multiobjetivo donde se busca optimizar la red de distribución en función no solo de los costos sino del tiempo de transporte para un modelo con demanda estocástica y *risk pooling*.

A su vez [21] y [22] presentan modelos para red de distribución de dos escalones multi-objetivos, multiproducto y multi-periodo; el primer modelo con una demanda estocástica de distribución normal y el segundo con una flota de vehículos heterogénea y demanda fuzzy. Adicionalmente [23] proponen un nuevo modelo multiperiodo con demanda determinística, usando un híbrido entre generación de columnas, relajación langragiana y búsqueda local.

Por su parte [24] presentan un algoritmo heurístico híbrido basado en recocido simulado y algoritmo competitivo imperialista, para un modelo LIRP de dos escalones, multiproducto y multiperiodo y [25] proponen abordar el problema LIRP a través de un algoritmo de enjambre de partículas en una cadena de logística en frío.

Los modelos [13] y [14] buscan el diseño de una red de distribución de productos perecederos, también están establecidos en redes de distribución de dos escalones.

2.2. LIRP para una red de distribución de dos escalones

Moin & Salhi [26] manifiestan que un modelo de un solo periodo no refleja la planeación a largo plazo. Por lo cual muchos autores han considerado modelos LIRP con un horizonte de tiempo que incluye múltiples periodos; como es el caso de [27] quienes proponen un modelo de optimización multiperiodo para un caso de recolección de llantas usadas, o [24] que utilizan una heurística híbrida entre recocido simulado y algoritmo competitivo imperialista para resolver un modelo multiperiodo, multiproducto.

Existen modelos de redes de distribución de dos escalones que comparten las características no sólo de ser multiperiodo sino de tener demanda determinística; como [13], [11], [23] y [14].

A diferencia de [22] y [28] presentan modelos LIRP multiperiodos con demanda fuzzy. El primero es un modelo de programación lineal entera mixta para instancias medianas y pequeñas, multiproducto, de flota heterogénea y con los objetivos de disminuir costos y faltantes en los clientes; El segundo modelo tiene flota de vehículos homogénea, un solo producto y lo resuelven mediante una heurística de dos fases.

Así mismo, se encuentran diversos modelos LIRP multiperiodo con demanda estocástica, como [29], donde se comparan dos métodos de localización de depósitos con el fin de mejorar la eficiencia de un sistema de riego de carreteras. Algunos autores han considerado que la demanda estocástica de sus modelos obedece una distribución Poisson; tales como [30], donde se propone un algoritmo genético mixto para resolver el modelo; [31] busca optimizar un sistema logístico de ciclo cerrado a través de una heurística de dos fases; asimismo [32] también utiliza una heurística de dos fases para resolver su modelo de logística inversa, para un sistema de recolección de desperdicios sólidos municipales; y por último en [18] se propone un algoritmo genético mixto para resolver el modelo. Otros autores por su parte consideran que la distribución normal es la que más se ajusta a las demandas de sus modelos, como es el caso de [9] quienes formulan su modelo con programación entera no lineal y proponen un algoritmo basado en relajación lagrangiana; también se encuentran los modelos multiobjetivos presentados por [33] quienes buscan soluciones a su modelo explorando 4 diferentes algoritmos metaheurísticos multiobjetivo, y [34] que proponen una metaheurística.

3. Formulación del modelo matemático

3.1. Características del modelo de red de distribución LIRP

A continuación, se presenta el modelo matemático para una red de distribución de dos escalones y multiperiodo, con demanda estocástica. –Se especifican inicialmente los supuestos, y las notaciones de índices, parámetros conocidos y variables; para posteriormente relacionar la función objetivo y restricciones.

3.1.1. Supuestos

- Se trata de problema de localización, ruteo e inventarios de dos escalones, de un solo producto y multiperiodo con demanda estocástica.
- El objetivo de minimizar los costos. Por una parte, los de localización relacionados con la apertura de los potenciales centros de distribución; los costos de mantener inventario, los cuales son diferentes tanto en cada centro de distribución, como en la planta; y los costos asociados al transporte del producto tanto de la planta a los centros de distribución (primer escalón), como de los centros de distribución a los clientes (segundo escalón).
- La cantidad de unidades producidas en los periodos es constante.
- No se tiene inventarios iniciales en el primer periodo.
- La planta y los centros de distribución sirven como depósitos cuya capacidad es finita, conocida y puede ser diferente para cada uno de estos depósitos.
- La demanda de los clientes se satisface al final del periodo correspondiente.
- La distancia entre los nodos de la red es euclidiana.
- La flota de vehículos es homogénea en el mismo escalón, pero los vehículos en el primer escalón tienen mayor capacidad que en el segundo.
- Los centros de distribución pueden ser atendidos por más de un vehículo.
- Los clientes son atendidos por sólo un vehículo.
- Cada ruta es atendida por un vehículo.
- Cada ruta inicia y termina en el mismo depósito.
- La demanda de cada cliente en cada periodo es aleatoria con una función de densidad de probabilidad con distribución normal.

3.1.2. Índices

- i : Índice de clientes ($M+2 \leq i \leq M+N+1$).
 j : Índice de centros de distribución ($2 \leq j \leq M+1$).
 h : Índice de clientes o depósitos ($1 \leq h \leq N+M+1$).
 g : Índice de clientes o depósitos ($1 \leq g \leq N+M+1$).
 k : Índice de vehículos o rutas en primer escalón ($1 \leq k \leq K$).
 l : Índice de vehículos o rutas en segundo escalón ($K+1 \leq l \leq K+L$).
 t : Índice de periodo ($1 \leq t \leq T$).

3.1.3. Parámetros

- M : Número de posibles centros de distribución.
 N : Número de clientes.
 K : Número de vehículos en primer escalón (o rutas).
 L : Número de vehículos en segundo escalón (o rutas).
 T : Número de periodos del horizonte de planeación.
 V : Índice de vehículos o rutas de primer y segundo escalón ($1 \leq V \leq K+L$).
 DF_{it} : Demanda del cliente i en el periodo t .
 P_t : Unidades producidas en el periodo t .
 cmk : Costo de transporte por unidad de distancia, en el primer escalón.
 cml : Costo de transporte por unidad de distancia, en el segundo escalón.
 Ch_g : Costo de mantener una unidad de producto en un periodo; ya sea en la planta (Ch_1) o los centros de distribución j (Ch_j).
 C_h : Capacidad de almacenamiento de la planta (C_1) y los centros de distribución j (C_j).
 CK : Capacidad de vehículos en primer escalón.
 CL : Capacidad de vehículos en segundo escalón.
 D_{hg} : Distancia de desplazamiento entre el nodo h y el nodo g (A partir de la ubicación de la planta, de los centros de distribución potenciales y de los clientes).
 FC_j : Costo de apertura de centro de distribución j .
 MM : Número muy grande.

3.1.4. Variables

- Z : Costos totales de localización, ruteo e inventarios.
 X_{ijt} : 1, si el cliente i es asignado al sitio potencial j , en el periodo t ; 0, de lo contrario.
 YX_j : 1, si el centro de distribución j es habilitado; 0, de lo contrario.
 YC_{jkt} : Unidades a enviar al centro de distribución j en el periodo t , en el vehículo k .
 Y_{jkt} : 1, si se ordena producto al CD j en el periodo t por el vehículo k ; 0, de lo contrario.

INV_{ht} : Unidades en inventario en el depósito h , en el periodo t . En la planta (INV_{1t}) y los centros de distribución j (INV_{jt}).

W_{ghvt} : 1, si el nodo h es inmediatamente visitado desde el nodo g , por el vehículo v , en el periodo t ; 0, si no lo es.

U_{jt} : Variable auxiliar para eliminar subtour, en cada periodo en el primer escalón.

M_{it} : Variable auxiliar para eliminar subtour, en cada periodo en el segundo escalón.

3.1.5. Variables

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{j=2}^{M+1} FC_j * YX_j \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{M+1} Ch_g * INV_{gt} \\ & + cmk \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{M+1} \sum_{h=1}^{M+1} D_{hg} * W_{hgkt} \\ & + cml * \sum_{t=1}^T \sum_{l=K+1}^{K+L} \sum_{g=2}^{M+N+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} D_{hg} * W_{hgl} \end{aligned} \quad (1)$$

En la Ecuación (1), se relaciona la función objetivo del modelo; la cual busca minimizar los costos. Por una parte, los de localización relacionados con la apertura de los potenciales centros de distribución; también los costos de mantener inventario (los cuales son diferentes en cada centro de distribución, como en la planta); y, por último, los costos asociados al transporte del producto tanto de la planta a los centros de distribución (primer escalón), como de los centros de distribución a los clientes (segundo escalón).

3.1.6. Restricciones

Localización y asignación

$$\sum_{l=K+1}^{K+L} W_{jilt} \leq X_{ijt} \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (2)$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{ihlt} * X_{ijt} \leq X_{hjt} \quad (3)$$

$$\forall t, \forall j, \forall h / M+2 \leq h \leq M+N+1$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} \sum_{t=1}^T X_{ijt} * \leq YX_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_{i=M+2}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ijt} \leq C_j \quad \forall j, \forall t \quad (6)$$

Las Ecuaciones de la (2) a la (6) representan las restricciones de localización y asignación de la siguiente forma: La Ecuación (2), si el cliente es visitado desde el depósito j en el tiempo t , el cliente es asignado a ese depósito en ese periodo; Ecuación (3), si un cliente es visitado desde otro, compartirán asignación del depósito para ese periodo; Ecuación (4), un cliente será asignado a un solo depósito por periodo; Ecuación (5), si el centro de distribución tiene asignado clientes en algún periodo, se debe abrir; y Ecuación (6) restringe la asignación de clientes, de acuerdo con la capacidad de los centros de distribución.

$$INV_{ht} \leq C_h \quad \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M + 1 \quad (7)$$

$$INV_{1(t-1)} + P_t - \sum_{k=1}^K \sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} = INV_{1t} \quad \forall t \quad (8)$$

$$INV_{j(t-1)} + \sum_{k=1}^K YC_{jkt} - \sum_{i=M+1}^{M+N+1} DF_{it} * X_{ijt} = INV_{jt} \quad (9)$$

$$\forall j, \forall t$$

$$YC_{jkt} \leq MM * Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (10)$$

$$YC_{jkt} \geq Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (11)$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} YC_{jkt} \leq CK \quad \forall k, \forall t \quad (12)$$

De acuerdo con la Ecuación (7), las unidades almacenadas en el depósito h (planta y centros de distribución) en el periodo t , no pueden ser superiores a su capacidad. Las Ecuación (8) y (9) se encargan del balance de los inventarios en la planta y centros de distribución, respectivamente. Ecuación (10) y (11) soportan la decisión de crear una ruta o no, si el movimiento de productos así lo sugiere. Y Ecuación (12) restringe las rutas de acuerdo con la capacidad del vehículo.

Ruteo en general

$$\sum_{g=1}^{M+N+1} W_{hgvt} - \sum_{g=1}^{M+N+1} W_{ghvt} = 0, \quad (13)$$

$$\forall h, \forall v, \forall t$$

$$W_{hhvt} = 0, \quad \forall h, \forall v, \forall t \quad (14)$$

Las Ecuación (13) y (14) aplican para todas las rutas y mencionan que, si se visita un nodo, la ruta debe salir de él y no puede dirigirse hacia el mismo.

Ruteo en primer escalón

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hjkt} = Y_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad (15)$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq \sum_{g=1}^{M+1} W_{1gkt} \quad (16)$$

$$\forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M + 1$$

$$\sum_{h=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq \sum_{h=1}^{M+1} W_{h1kt} \quad (17)$$

$$\forall k, \forall t, \forall g / 1 \leq h \leq M + 1$$

$$\sum_{g=1}^{M+1} W_{hgkt} \leq 1 \quad \forall k, \forall t, \forall h / 1 \leq h \leq M + 1 \quad (18)$$

$$\leq M + 1$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{v=1}^{K+L} \sum_{h=1}^{M+N+1} W_{hjvt} \leq MM * YX_j \quad \forall j \quad (19)$$

$$U_{jt} - U_{gt} + (M * W_{jgkt}) \leq M - 1 \quad (20)$$

$$\forall j \forall g / 2 \leq j \neq g \leq M + 1, \forall k, \forall t$$

Para el ruteo de primer escalón: la Ecuación (15) dice que, si se toma la decisión de pedir inventario a CD j en el periodo t , entonces debe tener una ruta que llegue a él, de lo contrario no; las Ecuación (16) y (17) Hablan de que toda ruta debe empezar y terminar en la planta; Ecuación (18), un CD sólo puede ser atendido en una ruta; Ecuación (19), si un CD no se abre, no se debe visitar; y Ecuación (20) genera las restricciones de tipo Miller et al. [35] para eliminación de subtours en primer escalón.

Ruteo en segundo escalón

$$\sum_{g=2}^{M+N+1} W_{hglt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{g=2}^{M+N+1} W_{jglt} \quad (21)$$

$$\forall l, \forall t, \forall h / 2 \leq h \leq M + N + 1$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} W_{ihlt} \leq \sum_{j=2}^{M+1} \sum_{h=2}^{M+N+1} W_{hjlt} \quad \forall i, \forall l, \forall t \quad (22)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} * DF_{it} = DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (23)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{l=K+1}^{K+L} W_{hilt} \leq DF_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (24)$$

$$\sum_{h=2}^{M+N+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{hilt} * DF_{it} \leq CL \quad \forall l, \forall t \quad (25)$$

$$\sum_{j=2}^{M+1} \sum_{i=M+2}^{M+N+1} W_{jilt} \leq 1 \quad \forall l, \forall t \quad (26)$$

$$M_{it} - M_{gt} + (N * W_{iglt}) \leq N - 1 \quad (27)$$

$$\forall i \forall g / M + 2 \leq i \neq g \leq M + N + 1, \forall l, \forall t$$

Para el ruteo en el segundo escalón: Ecuación (21) y (22) restringen que toda ruta del segundo escalón deberá iniciar y terminar en un CD; Ecuación (23) y (24) se encargan de que si un cliente tiene demanda en el periodo t sea visitado en ese periodo, si no tiene demanda, no debe ser visitado; la Ecuación (25) es la de capacidad del vehículo; Ecuación (26) habla de que un cliente se visita por una única ruta; y la Ecuación (27) son las restricciones de tipo Miller et al. [35] para eliminación de subtoures en segundo escalón.

4. Diseño de la metaheurística híbrida

Se propone una metaheurística híbrida, que combina propiedades de las metaheurísticas Algoritmo Genético y Búsqueda Tabú, y la heurística del Vecino Más Cercano. El diseño del algoritmo comienza con un Algoritmo Genético que busca mejores soluciones integrando las decisiones de localización, ruteos e inventarios. La población inicial es aportada en parte por una Búsqueda Tabú 1, que encuentra mejores soluciones a partir de decisiones de localización y asignación; dentro de la generación de nuevos individuos el Algoritmo Genético utiliza la heurística del Vecino Más Cercano para asignar los clientes que se deben visitar desde cada Centro de Distribución. Una vez el Algoritmo Genético encuentra la mejor solución, ésta es mejorada con una segunda Búsqueda Tabú enfocada en la decisión de inventarios. Las soluciones son buscadas dentro de una región factible. La estructura de la Metaheurística Híbrida se muestra en la Figura 1.

4.1. Selección de parámetros del Algoritmo Metaheurístico Híbrido

En el algoritmo metaheurístico híbrido propuesto existe una cantidad de soluciones que la búsqueda tabú aporta a la población inicial del algoritmo genético, por lo que se analiza el nivel más conveniente de esta variable. Posteriormente se estudia la conveniencia de aplicar la segunda búsqueda tabú del algoritmo. Para realizar estos análisis se tomaron 3 niveles del parámetro, que se replicaron 30 veces en las 30 instancias adaptadas del conjunto Prodhon [36]; obteniendo un total de 2700 muestras.

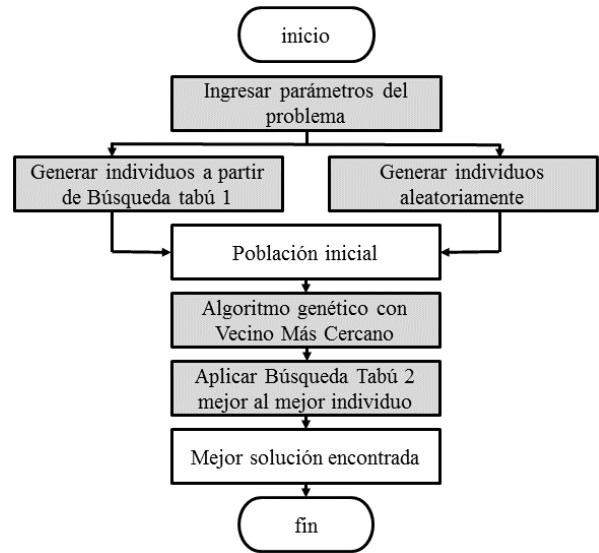


Figura 1. Estructura de la metaheurística híbrida
Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de cuántos individuos de la población inicial del algoritmo genético son aportados por la búsqueda tabú inicial (PI BT), se analizan a través de un modelo de regresión múltiple, en el cual se plantea como variable respuesta el costo de la solución encontrada por el algoritmo, analizando el efecto de tres diferentes niveles del parámetro PI BT, y tomando el tamaño de la instancia como variable categórica. El modelo de regresión encontrado describe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un R cuadrado de 82,71%. El efecto que tiene la variable PI BT sobre el costo, tal como se aprecia en la Figura 2, es aumentar a medida que aumenta la variable.

Adicionalmente se realiza una regresión múltiple con las mismas variables de entrada PI BT y tamaño de la instancia (como variable categórica), pero con el tiempo de ejecución del algoritmo como variable respuesta. Se encuentra un modelo con un R cuadrado de 82,71%, que

determina significancia estadística entre las variables; y en el cual se observa tal como se ilustra en la Figura 3, que a medida que aumenta PI BT aumenta el tiempo de cómputo.

Teniendo presente los resultados de los modelos de regresión, en los cuales al aumentar PI BT, aumenta a su vez el costo de la solución hallada por el algoritmo y su tiempo de cómputo; se elige el menor nivel del parámetro PI BT como el adecuado para el algoritmo.

También se analiza la pertinencia de agregar la segunda búsqueda tabú al algoritmo. Para ello se contrastan 1800 muestras provenientes de ejecutar el algoritmo híbrido

con y sin la búsqueda tabú 2, 30 veces en las 30 instancias adaptadas del conjunto Prodhon [36].

Aplicando una prueba t de dos muestras para las medias de los costos de la mejor solución hallada con y sin utilizar la segunda búsqueda tabú en el algoritmo, se puede concluir que la media de Z sin BT2 es mayor que Z con BT2 en el nivel de significancia de 0,05. Teniendo en cuenta el aporte de la búsqueda tabú 2 a la disminución del costo final y que el mayor tiempo de cómputo del algoritmo no supera los siete minutos, se considera pertinente ejecutar la metaheurística híbrida con la búsqueda tabú 2 incluida. En la Figura 4 Se observa como Z es mayor cuando no se utiliza BT2, y también más dispersa.

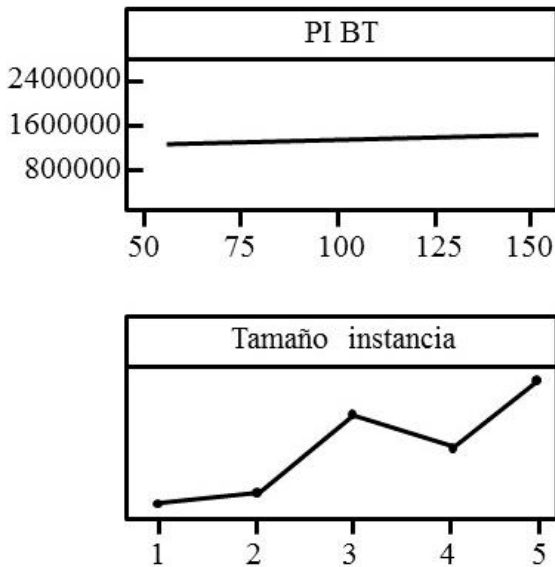


Figura 2. Regresión múltiple para Z, del AH Fuente: adaptada de Minitab 17.

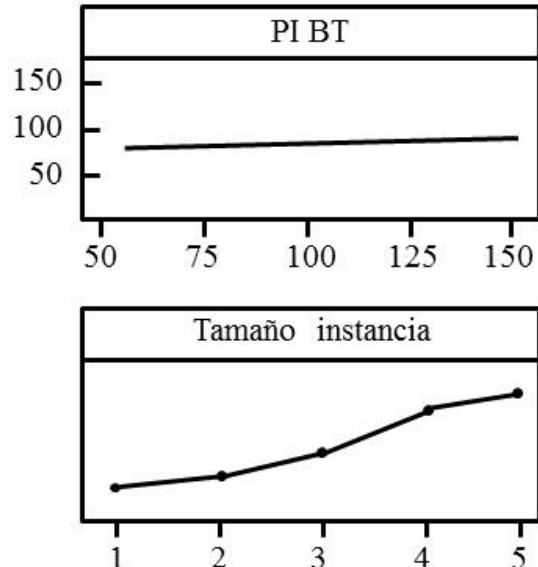


Figura 3. Regresión múltiple para t, del AH Fuente: adaptada de Minitab 17.

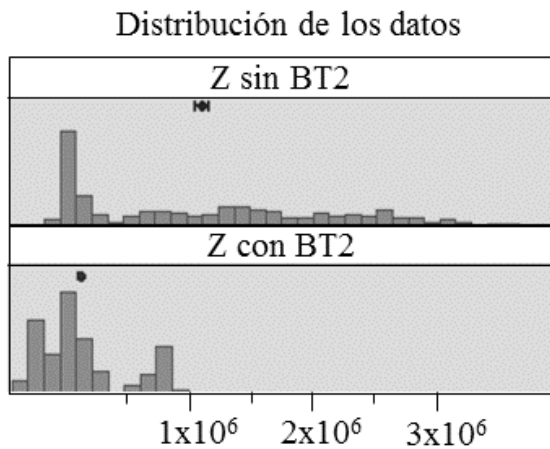
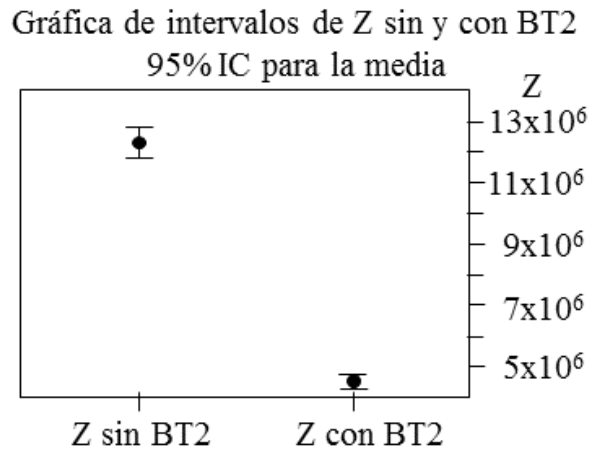


Figura 4. Prueba t de 2 muestras para las medias de Z sin y con la BT2. Fuente: adaptada de Minitab 17.



5. Experimentación y resultados

A partir de los modelos diseñados y los métodos de solución seleccionados, se plantean dos experimentos que buscan probar la hipótesis que la metaheurística híbrida obtiene mejores resultados para el 2eLIRP que el Algoritmo Genético y la Búsqueda Tabú. Las experimentaciones se desarrollaron en MATLAB, con un procesador Intel® Core™ i7-4790 CPU 3.60GHz, memoria RAM 7,91 gigas; tomando la adaptación a las instancias del conjunto Prodhon [36], que presenta cinco tamaños diferentes de red de distribución, tal como se aprecia en la Tabla 1. La demanda estocástica de los clientes en cada periodo, fue simulada generando números aleatorios con una distribución normal, cuya media y desviación se estimó a partir de los valores de las demandas discretas relacionada en la instancia; siendo esta desviación equivalente a la del total de las demandas de los clientes en la instancia, mientras que para cada cliente la media de la distribución se determinó por la demanda discreta del cliente en la instancia; la localización y capacidad de la planta, así como la capacidad de los vehículos en el primer escalón, se estimaron ya que las instancias solo tienen el segundo escalón.

Tabla 1. Tamaño de las instancias del conjunto Prodhon

Tamaño instancia	Instancia	N (clientes)	M (posibles CD's)
1	1-4	20	5
2	5-12	50	5
3	13-18	100	5
4	19-24	100	10
5	25-30	200	10

Fuente: elaboración propia [36].

Para validar la hipótesis se plantean dos experimentos; el primero consiste en contrastar en instancias de tamaño pequeño, los resultados obtenidos por las metaheurísticas programadas (las clásicas y la híbrida), entre sí y con resultados obtenidos por el modelo 2eLIRP en GAMS a través de programación entera mixta (MIP); el segundo experimento compara nuevamente las metaheurísticas en instancias de cinco diferentes tamaños.

5.1. Experimento 1

Se plantea contrastar las soluciones encontradas por la metaheurísticas, en una instancia en la que el método exacto pueda encontrar una solución sin saturar la

memoria del equipo de cómputo. Se toman las adaptaciones de las cuatro instancias de menor tamaño del conjunto Prodhon [36], se reduce su número de clientes de 20 a 5, y se simulan las demandas de 5 periodos. Las soluciones del método exacto son halladas en GAMS y contrastadas con las tres metaheurísticas; los resultados se relacionan en la Tabla 2 (donde los tiempos están en minutos).

Tabla 2. Resultados experimento 1

	Algoritmo genético		Búsqueda tabú		Metaheurística híbrida	
	gap%	T	gap%	t	gap%	T
1	0,49	1,44	0,58	0,25	0,33	1,81
2	0,47	1,43	0,67	0,25	0,29	1,80
3	0,47	1,45	0,57	0,25	0,30	1,81
4	0,51	1,44	0,67	0,25	0,29	1,81

Fuente: autores.

Se observa que los costos asociados a las soluciones aportadas por la metaheurística híbrida tienen resultado promedio menor a las metaheurísticas clásicas. A través de un análisis de varianza se concluye que existen diferencias entre las medias en el nivel de significancia de 0.05. En la Figura 5 se aprecia la diferencia entre las medias, resaltando que la metaheurística híbrida ofrece la menor de estas.

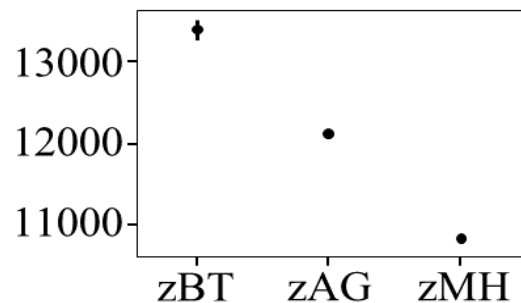


Figura 5. Comparación de medias. Fuente: adaptada de Minitab 17.

5.2. Experimento 2

En este experimento se comparan el algoritmo genético y la búsqueda tabú, con la metaheurística híbrida. Los resultados promedio de los escenarios por instancia se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados promedio de Z del experimento 2

Instancia	AG	BT	MH
1	402.044,10	384.584,70	378.775,60
2	396.089,10	383.806,50	378.874,30
3	393.671,50	374.604,00	372.877,00
4	415.737,20	402.853,80	401.914,10
5	460.212,00	268.169,40	262.311,80
6	388.935,80	266.667,50	255.908,00
7	489.001,50	226.370,00	223.096,50
8	780.712,40	170.228,20	166.041,90
9	795.890,00	137.804,60	134.096,40
10	565.185,20	202.198,80	201.135,90
11	468.755,30	238.195,80	235.194,80
12	400.958,50	231.381,00	226.108,80
13	2.976.903,20	387.422,60	387.323,50
14	3.239.278,10	330.388,60	331.162,50
15	1.548.538,20	468.941,90	461.325,00
16	1.435.329,30	426.592,50	419.754,40
17	1.318.146,20	514.115,00	392.788,80
18	1.553.915,50	497.146,00	336.212,20
19	1.710.906,80	538.123,70	505.266,40
20	1.673.532,00	508.333,50	474.016,60
21	1.359.731,80	552.657,20	532.658,30
22	1.273.421,00	524.838,90	510.739,30
23	1.070.359,50	597.999,30	571.081,20
24	1.139.161,00	545.683,50	519.750,90
25	2.805.891,40	978.124,40	952.931,60
26	3.015.700,30	855.291,30	830.255,00
27	2.897.441,00	1.049.756,20	982.245,60
28	2.931.654,40	977.811,80	927.874,20
29	2.178.882,20	1.044.371,20	991.801,10
30	2.135.176,80	985.699,90	938.599,60

Se utilizaron las 30 instancias del conjunto Prodhon [36], para las cuales se simularon 30 escenarios diferentes, con demandas para 60 periodos. Se encontró que los costos de las soluciones obtenidas por la metaheurística híbrida son menores en 29 de las 30 instancias.

A través de pruebas t pareadas, se contrastan las medias de las metaheurísticas clásicas con la metaheurística híbrida, con el fin de analizar si las soluciones encontradas por esta última tienen menor costo. En la

Tabla 4 se presenta un resumen de las pruebas t pareadas, donde se observa que, con un nivel de significancia de 0.05 se puede concluir que la media de los costos de la metaheurística híbrida es menor la metaheurística clásica, en ambos casos.

Tabla 4. Análisis de medias de zAG, zBT y zMH, a partir de pruebas t pareadas

	Media	IC de 95%
zAG	1.407.372,00	(1354736; 1460008)
zBT	502.339,00	(487383; 517295)
zMH	476.737,00	(462640; 490834)
zAG -zMH	930635	(633035. 1228234)
zBT -zMH	25601	(11925. 39278)

Fuente: adaptada de Minitab 17.

En los experimentos 1 y 2, se encuentra con un nivel de significancia de 0.05, que las medias del costo asociado a las soluciones proporcionadas por las metaheurísticas son diferentes, donde los resultados de la metaheurística híbrida encuentran un costo menor que las demás metaheurísticas. En cuanto a los tiempos de cómputo la metaheurística híbrida no es más rápida que las clásicas, pero la diferencia no es significativa para el 2eLIRP, ya que es un problema con decisiones de tipo estratégico e incluso en instancias grandes se hallan tiempos menores a cinco minutos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se acepta la hipótesis, ya que la metaheurística híbrida encuentra soluciones con un menor costo que las metaheurísticas clásicas, en tiempos de cómputo apropiados.

6. Conclusiones

El problema location-inventory-routing-problem (LIRP), busca integrar las decisiones logísticas de localización, ruteo e inventarios para la toma de decisiones asociadas al diseño y funcionamiento de las redes de distribución. Integrar estas decisiones aumenta la complejidad del problema, pero permite explorar soluciones que analizando las decisiones por separado no darían lugar.

Por lo tanto, plantear el diseño de una red de distribución como un problema LIRP, bien sea para la planeación inicial de la red o una reestructuración de esta, puede permitir hallar mejores soluciones al escapar de los óptimos locales derivados de analizar las decisiones logísticas por separado.

Asimismo, incluso para una red de distribución constituida, analizarla mediante un modelo LIRP, permite evaluar su desempeño al contrastarla con soluciones alternativas que el modelo LIRP pueda ofrecer, dando lugar a una evaluación de costo de oportunidad para la toma de decisiones.

De manera particular cuando la decisión de localización sea estratégica, realizar la planeación de la red de distribución en un escenario de múltiples periodos permite involucrar estrategias complementarias de ruteo y gestión de inventarios. Por otra parte, en los escenarios del problema LIRP donde la localización es una decisión de corto plazo, como por ejemplo en logística humanitaria; la planeación implica un mayor dinamismo donde el multiperiodo va a estar asociado a la evolución de la atención y la variabilidad de damnificados en el post-desastre al principio aumenta, pero luego se estabiliza, para comenzar a disminuir a medida que las personas se movilizan de los albergues temporales a otros sitios. En estos escenarios es necesario utilizar métodos de solución que resuelvan el problema en tiempos cortos para tener oportunidad en la respuesta, lo que además permite una mayor frecuencia de evaluación de las decisiones, para eventuales escenarios cambiantes.

Tanto para el LIRP como para cualquier otro problema que justifique el uso de algoritmos metaheurísticos, las metaheurísticas híbridas presentan oportunidades derivadas de propiedades de sus algoritmos base y por lo tanto ofrecen una buena oportunidad de exploración de métodos de solución con diferentes ventajas.

Teniendo en cuenta las ventajas que ofrece integrar las decisiones de localización, ruteo e inventarios como un LIRP, es oportuno realizar investigaciones del problema para diferentes diseños de red de distribución, por ejemplo con varios escalones, múltiples objetivos, multiproducto, redes de recolección o con logística inversa; además en diversos contextos tales como productos perecederos, logística humanitaria, entre otros; igualmente, propender por la implementación de dichas investigaciones.

Referencias

- [1] R. W. Hall, "Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals", *J. Bus. Logist.*, vol. 8, no. 2, pp. 57-73, 1987.
- [2] J. Perl, S. Sirisoponsilp, "Distribution networks: facility location, transportation and inventory", *Int. J. Phys. Distrib. Mater. Manag.*, vol. 18, no. 6, pp. 18-26, 1988, doi: 10.1108/eb014705
- [3] T. W. Chien, A. Balakrishnan, R. T. Wong, "An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem", *Transp. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 67-76, 1989, doi: 10.1287/trsc.23.2.67.
- [4] L. K. Nozick, M. A. Turnquist, "Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 34, no. 3, pp. 173-186, 1998, doi: 10.1016/S1366-5545(98)00010-6
- [5] V. Jayaraman, "Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design: An investigation", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 19, no. 5, pp. 471-494, 1998, doi: 10.1108/01443579810206299
- [6] L. K. Nozick, M. A. Turnquist, "Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 192, no. 2, pp. 362-371, 2001, doi: 10.1016/S0377-2217(00)00234-4
- [7] S. C. Liu, S. B. Lee, "A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 22, no. 11-12, pp. 941-950, 2003, doi: 10.1007/s00170-003-1639-5
- [8] S. C. Liu, C. C. Lin, "A heuristic method for the combined location routing and inventory problem", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 372-381, 2005, doi: 10.1007/s00170-003-2005-3
- [9] M. Shen, Z. Jun, L. Qi, "Incorporating inventory and routing costs in strategic location models", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 179, no. 2, pp. 372-389, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2006.03.032
- [10] A. A. Javid, N. Azad, "Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design", *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 46, no. 5, pp. 582-597, 2010, doi: 10.1016/j.tre.2009.06.005
- [11] W. J. Guerrero, C. Prodhon, N. Velasco, C. A. Amaya, "Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 146, no. 1, pp. 359-370, 2013, doi: 10.1016/j.ijpe.2013.07.025
- [12] D. C. Whybark, "Issues in managing disaster relief inventories", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 108, no. 12, pp. 228-235, 2007, doi: 10.1016/j.ijpe.2006.12.012

- [13] A. Hiassat, A. Diabat, “A location-inventory-routing-problem with perishable products”, en *Proceedings of the 41st international conference on computers and industrial engineering*, 2011, pp. 130-135.
- [14] A. Hiassat, A. Diabat, I. Rahwan, “A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products”, *J. Manuf. Syst.*, vol. 42, pp. 93-103, 2017, doi: 10.1016/j.jmsy.2016.10.004
- [15] J. Tang, S. Ji, L. Jiang, “The design of a sustainable location-routing-inventory model considering consumer environmental behavior”, *Sustain.*, vol. 8, no. 3, pp. 221, 2016, doi: 10.3390/su8030211
- [16] K. Conrad, “Price competition and product differentiation when consumers care for the environment”, *Environ. Resour. Econ.*, vol. 31, no. 1, pp. 1-19, 2005, doi: 10.1007/s10640-004-6977-8
- [17] Z. J. Ma, Y. Dai, “A Stochastic Location-Routing-Inventory Problem in Logistics Distribution Systems”, en *International Conference on Transportation Engineering 2007*, 2007, pp. 1433-1438, doi: 10.1061/40932(246)235
- [18] Z. Ma, Y. Dai, “Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in two-echelon multi-product distribution systems”, en *ICLEM 2010: Logistics for Sustained Economic Development - Infrastructure, Information, Integration - Proceedings of the 2010 International Conference of Logistics Engineering and Management*, 2010, pp. 2559-2565, doi: 10.1061/41139(387)357
- [19] W. Xuefeng, “An integrated multi-depot location-inventory-routing problem for logistics distribution system planning of a chain enterprise”, en *In Logistics Systems and Intelligent Management, International Conference on (Vol. 3)*, 2010, pp. 1427-1431, doi: 10.1109 / ICLSIM.2010.5461202
- [20] R. Tavakkoli-Moghaddam, F. Forouzanfar, S. Ebrahimnejad, “Incorporating location, routing, and inventory decisions in a bi-objective supply chain design problem with risk-pooling”, *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 9, no. 1, pp. 19, 2013, doi: 10.1186/2251-712X-9-19
- [21] N. Nekooghadirli, R. Tavakkoli-Moghaddam, V. R. Ghezavati, S. Javanmard, “Solving a new bi-objective location-routing-inventory problem in a distribution network by meta-heuristics”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 76, no. 1, pp. 204-221, 2014, doi: 10.1016/j.cie.2014.08.004
- [22] R. Tavakkoli-Moghaddam, Z. Raziqi, “A New Bi-Objective Location-Routing-Inventory Problem with Fuzzy Demands”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1116-1121, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.646
- [23] W. J. Guerrero, C. Prodhon, N. Velasco, C. A. Amaya, “A relax-and-price heuristic for the inventory-location-routing problem”, *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 22, no. 1, pp. 129-148, 2015, doi: 10.1111/itor.12091
- [24] A. Ghorbani, M. R. Akbari Jekar, “A hybrid imperialist competitive-simulated annealing algorithm for a multisource multi-product location-routing-inventory problem”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, pp. 116-127, 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.08.027
- [25] K. Li, J. Zheng, D. Wu, “A new discrete particle swarm optimization for location inventory routing problem in cold logistics”, *Rev. la Fac. Ing.*, vol. 31, no. 5, pp. 89-99, 2016, doi: 10.21311/002.31.5.10
- [26] N. H. Moin, S. Salhi, “Inventory routing problems: a logistical overview”, *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 58, no. 9, pp. 1185-1194, 2007, doi: 10.1057/palgrave.jors.2602264
- [27] Y. Tang, Z.-J. Ma, J.-J. Zhao, “Multi-period location-routing-inventory problem based on collector managed inventory in scrap tires recycling systems”, *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integr. Manuf. Syst. CIMS*, vol. 17, no. 2, pp. 397-403, 2011
- [28] Z. Ma, Y. Dai, H. Li, C. Wang, “A fuzzy location-routing-inventory problem in logistics distribution systems”, en *Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*, 2009, pp. 2728-2733, doi: 10.1061/40996(330)403
- [29] J.-P. Riquelme-Rodríguez, M. Gamache, A. Langevin, “Location arc routing problem with inventory constraints”, *Comput. Oper. Res.*, vol. 76, pp. 84-94, 2016, doi: 10.1016/j.cor.2016.06.012
- [30] B. Zhang, Z. Ma, S. Jiang, “Location-routing-inventory problem with stochastic demand in logistics distribution systems”, en *2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Dalian, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/WiCom.2008.1547
- [31] C. Wang, Z. Ma, H. Li, “Stochastic dynamic location-routing-inventory problem in closed-loop logistics system for reusing end-of-use products”, en *Proceedings - International Conference on Intelligent*

Computation Technology and Automation, ICICTA 2008, 2008, pp. 691-695, doi: 10.1109/ICICTA.2008.181

[32] H. Li, Z. Ma, C. Wang, “The stochastic location-routing-inventory problem in reverse logistics systems for municipal solid waste”, en *Octava Conferencia Internacional de Profesionales de la Logística y el Transporte de China (ICCLTP)*, 2008, doi: 10.1061/40996(330)523

[33] I. A. Martínez-Salazar, J. Molina, F. Ángel-Bello, T. Gómez, R. Caballero, “Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 234, no. 1, pp. 25-36, 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2013.09.008

[34] M. Zhalechian, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Zahiri, M. Mohammadi, “Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty”, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 89, pp. 182-214, 2016, doi: 10.1016/j.tre.2016.02.011

[35] C. E. Miller, A. W. Tucker, R. A. Zemlin, “Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems”, *J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326-329, 1960, doi: 10.1145/321043.321046

[36] C. Prodhon, “Le Problème de Localisation-Routage (The location-routing problem)”, tesis de grado, Troyes University of Technology, Troyes, Francia, 2006.