ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

Ruteo de vehículos multi-objetivo en dos niveles para logística urbana inteligente

Routing multi-objective of vehicles in two levels for intelligent urban logistics

Haiko Eitzen¹, Fabio López-Pires², Benjamín Barán¹, Fernando Sandoya³, Jorge Luis Chicaiza⁴, Carlos Suárez Núñez⁵ ¹ Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay. ² Parque Tecnológico Itaipú. Asunción, Paraguay. ³ Escuela Superior Politécnica del Litoral. Quito, Ecuador. ⁴ Universidad Técnica de Dortmund, Dortmund, Alemania. ⁵ Universidad San Francisco de Quito – USFQ. Quito, Ecuador. Autor de correspondencia: haiko.eitzen@gmail.com DOI: https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-1.123-138 Recibido: 11/05/2017. Aceptado: 12/02/2018.

Resumen: Las actuales tendencias de urbanización y economías crecientes conllevan aumentos en la congestión de tráfico, por lo que los gobiernos municipales se ven obligados a recurrir a nuevas estrategias para enfrentar tales desafíos. La distribución multi-nivel es una estrategia ya conocida y empleada por empresas, donde la formulación clásica del Problema de Ruteo de Vehículos en Dos Niveles (2E-VRP, por sus siglas en inglés) refleja la perspectiva de un único proveedor, sin considerar las decisiones de ruteo de terceros. La falta de coordinación entre proveedores ejecutando sus planificaciones individuales y, consecuentemente, la falta de un enfoque holístico al tráfico urbano puede causar más problemas. En este artículo se presenta una formulación multi- objetivo del 2E-VRP multi-proveedor con flotas heterogéneas de vehículos desde la perspectiva del gobierno municipal en el contexto del Movimiento de Bienes Urbanos. Adicionalmente, se presenta un Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo para la resolución del problema propuesto con validaciones experimentales de la calidad de soluciones obtenidas.

Palabras clave: Problema de Ruteo de Vehículos, Logística Multinivel, Movimiento de Bienes Urbanos, Optimización Multi-Objetivo, Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo.

Abstract: Urbanization and growing economies current trends lead to fast growth in traffic congestion; consequently, municipal governments need to consider new strategies to face such challenges. Multilevel distribution is already known by commercial companies as a strategy to face this problem. In this context, the classic formulation of the Two-Tier Vehicle Routing Problem (2E- VRP) reflects the perspective of a single provider, without considering third-party routing decisions. The lack of coordination among providers executing their individual plans and, consequently, the lack of a holistic approach to urban traffic can generate even more problems. Therefore, this article presents a multiobjective formulation of the multi-supplier 2E-VRP with heterogeneous vehicle fleets from the perspective of the municipal government in the context of Urban Goods Movement. Additionally, a Multi-Objective Evolutionary Algorithm is presented for the resolution of the proposed problem with experimental validations of the quality of the obtained solutions.



Keywords: Vehicle Routing Problem, Multi-level logistic, Urban Goods Movement, Multi-Objective Optimization, Multi-Objective Evolutionary Algorithm.

1.- INTRODUCCIÓN

Las actuales tendencias de urbanización y economías crecientes conllevan aumentos de congestión de tráfico en ciudades, especialmente si el potencial desarrollo de infraestructura urbana se ve limitado debido a costos, resistencia popular a proyectos de construcción a gran escala, o accidentes naturales como montañas o ríos (este es el caso de ciudades latinoamericanas como Asunción o Quito). Si la infraestructura no puede ser adecuadamente expandida para absorber el aumento de tráfico, los gobiernos nacionales y municipales deben recurrir a nuevas estrategias que optimizan el flujo de vehículos para resolver estos problemas (1). Una posible estrategia, ya empleada por negocios individuales y empresas de transporte, es la distribución multinivel de bienes urbanos. Este trabajo propone un modelo para diseñar una estrategia de distribución multinivel desde una perspectiva holística, útil para gobiernos municipales, utilizando como base el *Problema de Ruteo de Vehículos en Dos Niveles*, o 2E-VRP (*Two-Echelon Vehicle Routing Problem* en inglés).

El *Problema de Ruteo de Vehículos* (VRP, *Vehicle Routing Problem*), en su forma clásica, consiste en servir a un número dado de clientes ubicados en distintos puntos geográficos, y para hacerlo se dispone de un almacén o depósito central y una flota de vehículos con capacidades de carga limitada. Para resolver este problema, se deben asignar rutas, es decir conjuntos ordenados de clientes a los vehículos, de manera óptima, usualmente buscando minimizar el tiempo o costo para cubrir la demanda (2).

Bajo ciertas circunstancias podría haber motivos para no servir directamente a los clientes desde el depósito central sino a través de puntos intermedios, generalmente conocidos como *Centros de Distribución de Ciudad* (CDCs) o satélites. Esto puede ocurrir por ejemplo si hay camiones grandes que parten del depósito central pero no deben (o incluso se les prohíbe) entrar en una zona determinada, como el microcentro, y los CDCs se establecen fuera o en los márgenes de estas áreas restringidas para que los camiones grandes descarguen sus productos allí y vehículos livianos se encarguen de entregarlos a los clientes ubicados en las zonas citadas (3). En este caso, se puede decir que existen dos niveles de vehículos y ubicaciones, dando lugar al 2E-VRP.

Se han realizado investigaciones relevantes sobre el 2E-VRP, particularmente por González-Feliu (4). El enfoque más estudiado para el 2E-VRP considera la distribución multinivel para productos de un solo proveedor (5, 6). Sin embargo, si cada proveedor en una ciudad resuelve su propio problema de ruteo independientemente de los demás, puede resultar en soluciones globales subóptimas para la ciudad. Además, un gobierno municipal podría tener el objetivo de reducir la congestión de tráfico y la contaminación, requiriendo una perspectiva holística del *Movimiento de Bienes Urbanos* (UGM, *Urban Goods Movement*) (1, 7), considerando a

todos los contribuyentes al tráfico urbano.

Por este motivo, se puede considerar el 2E-VRP como un problema de distribución multinivel con múltiples proveedores y productos, también conocido como *multi- commodity* (8). Este enfoque holístico, que refleja mejor la naturaleza diversa del tráfico urbano, es más adecuado para abordar el problema global de congestión de tráfico urbano.

De esta manera, en vez de resolver varias instancias paralelas e independientes del 2E- VRP, una por cada proveedor o producto, un gobierno municipal podría unificar estas instancias haciendo que todos (o al menos algunos) de los proveedores compartan todos (o al menos algunos) de los CDCs, desde donde algunos vehículos livianos y ecológicos del segundo nivel (y posiblemente de contratistas independientes) llevarían las diversas cargas para atender la demanda de los clientes en la zona de acceso restringido.

Desafíos adicionales surgen al adaptar el 2E-VRP al contexto de UGM, dadas la existencia y participación de múltiples interesados, como, por ejemplo, el gobierno municipal y las empresas distribuidoras. Los objetivos de los distintos interesados probablemente serán distintos y en conflicto, como la intención de las empresas de minimizar costos, distancias y/o tiempos de viaje y entrega, así como la intención del gobierno municipal de minimizar el número de vehículos en tránsito simultáneo durante un periodo dado en el área considerada, o la polución que estos vehículos producen. Una solución viable puede requerir una relación de compromiso (trade-off) razonable. Esta situación nos motiva a considerar una formulación multi-objetivo para optimizar simultáneamente varias funciones objetivo, presentando al menos una aproximación del conjunto Pareto óptimo a los tomadores de decisiones (9).

Al considerar los problemas de tráfico en grandes ciudades, como Asunción, Quito, o Guayaquil en el caso de los autores, puede aparentar imposible o por lo menos no factible modelar todo el tráfico de una metrópoli entera y aplicar la estrategia anteriormente mencionada a toda la ciudad en un intento de reducir la congestión de tráfico. Sin embargo, inspirados por el clásico método divide-y-vencerás tan utilizado para resolver grandes instancias de problemas, la meta puede ser reducir la congestión de tráfico en solo un área relativamente pequeña, por ejemplo, una parte del centro de la ciudad con intensa actividad comercial. Esta área puede ser el área restringida o el segundo nivel, mientras que los viajes de los proveedores a los CDCs o satélites conformarían el primer nivel (Figura 1).

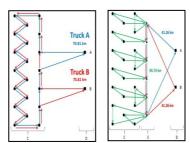


Figura 1:- VRP Convencional (izquierda) y 2E-VRP (derecha).

Eitzen H, López-Pire F, Barán B, Sandoya F, Chicaiza JL, Suárez Núñez JL. Ruteo de vehículos multi-objetivo en dos niveles para logística urbana inteligente

Como se puede apreciar en la (Figura 1), un VRP convencional de un solo nivel de depósitos a clientes (D - C) tomaría un recorrido de 70.81 km para ambos camiones de gran porte (*Truck A* y *Truck B*), recorriendo todos los clientes.

Sin embargo, un 2E-VRP con niveles de depósitos a satélites (D-S) y de satélites a clientes (S-C), tomaría sólo 41.26 km a los mismos camiones de gran porte, recorriendo todos los satélites para un primer nivel de entrega. Desde los satélites hasta los clientes, se propone la utilización de vehículos de menor porte para un segundo nivel, incluso vehículos de bajo nivel de emisión como vehículos eléctricos, mejorando de esta manera varios aspectos del esquema de distribución.

El 2E-VRP es una generalización del VRP que se conoce como un problema NP-Difícil

(7) por lo que no es hoy posible encontrar una solución óptima en tiempo polinomial. La dificultad aumenta aún más considerando la gran cantidad de parámetros de entrada para el problema dado, como la cantidad de vehículos, clientes, y rutas. Por este motivo, en este trabajo los autores proponen un Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo (MOEA, *Multi-Objective Evolutionary Algorithm*) para resolver el problema planteado.

El resto de este trabajo se estructura de la siguiente forma: en la Sección 2 se detallan las investigaciones relacionadas y la motivación para este trabajo, en la Sección 3 se describe la formulación propuesta del problema, siguiendo en la Sección 4 con la presentación del MOEA propuesto. La Sección 5 resume los primeros resultados experimentales, mientras que en la Sección 6 se dejan las principales conclusiones y trabajos futuros.

2.- INVESTIGACIONES RELACIONADAS Y MOTIVACIÓN

La primera definición formal del 2E-VRP fue presentada por González-Feliu (4), específicamente considerando el *Problema del Ruteo de Vehículos con Capacidades en Dos Niveles* (2E-CVRP).

Cuda et al. (6) revisan los problemas de ruteo en dos niveles proveyendo una visión resumida de los sistemas de distribución de dos niveles. Ellos consideran tres clases de problemas: el *Problema de Ruteo de Ubicaciones en Dos Niveles* (2E-LRP), el 2E-VRP ya enunciado, y el *Problema de Ruteo del Camión y Tráiler* (TTRP). Específicamente, el 2E-VRP es descripto como una clase bien general del problema, siendo el 2E-CVRP el problema más estudiado de la clase.

Los trabajos listados y resumidos en (6) fueron seleccionados para la revisión bibliográfica en este trabajo, resultando en el estudio de 9 de los artículos más relevantes relacionados al 2E-VRP (7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17) para esta sección. La Tabla 1 compara los artículos citados y estudiados por Cuda et al. (6) como los más relevantes relacionados al 2E-VRP entre sí y a este trabajo en particular de acuerdo a las siguientes características: si la formulación es Multi-Depósito (MD), Multi-Proveedor (MP), si la flota (Flot)a de vehículos en el mismo nivel es considerada homogénea o heterogénea, si se consideran Ventanas de

Tiempo (VT), y el objetivo a ser minimizado.

Tabla 1 - Resumen de trabajos relacionados.

Referencia	MD	MP	Flota	VT	Objetivo (minimizar)		
(10)							
(11)				NI -	Costo de tráfico sobre la red		
(12)							
(7)	NI -	NI-	TT		Costo de traslado y operación		
(14)	No	No	Homogénea	No			
(15)							
(16)							
(17)							
(13)				Sí	Número de vehículos		
Este trabajo	Sí	Sí	Heterogénea	No	Múltiples como: costo de transporte, uso de vehículos y polución (emisiones)		

Se puede observar en la Tabla 1, como también lo resaltan Cuda et al., que solo Crainic et al. (13) consideran el 2E-VRP con características adicionales, es decir, una formulación multidepósito, multi-proveedor, con flotas heterogéneas de vehículos en cada nivel y con ventanas de tiempo. Sin embargo, los autores de (13) proveen únicamente una formulación del problema y alguna metodología para su tratamiento, pero no proponen un algoritmo para su solución. A diferencia de lo propuesto en este trabajo, su formulación es mono-objetivo. Por lo tanto, los autores en este trabajo identifican el 2E-VRP multi- objetivo con múltiples depósitos y proveedores, considerando otras características apropiadas para el contexto de Logística Urbana y UGM, como un problema aún propuesto.

El principal fin de esta investigación es ayudar a gobiernos municipales en el desarrollo y la implementación de sistemas (software) de distribución multinivel de carga basado en el 2E-VRP en un contexto UGM, y para que esto sea seriamente considerado, es necesario el desarrollo de una formulación que vaya más allá del simple modelo de un solo depósito y un solo proveedor. Los autores consideran que este modelo debe ser multi-objetivo ya que hay múltiples interesados con objetivos potencialmente en conflicto en el contexto estudiado.

Las principales contribuciones de este trabajo se resumen en: una formulación multi- objetivo del 2E-VRP multi-proveedor con flotas vehiculares heterogéneas, desde la perspectiva de un gobierno municipal, y un primer MOEA para resolver el problema planteado, validando la calidad de las soluciones obtenidas en comparación con las soluciones óptimas.

3.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA PROPUESTO

En esta sección se presenta la propuesta para formular y modelar matemáticamente el 2E-VRP Multi-Objetivo y Multi-proveedor (*Multi-Objective Multi-Commodity 2E-VRP* (representado como M²-2E-VRP)) con flotas heterogéneas. Esta formulación considera los siguientes interesados:

proveedores;

Eitzen H, López-Pire F, Barán B, Sandoya F, Chicaiza JL, Suárez Núñez JL. Ruteo de vehículos multi-objetivo en dos niveles para logística urbana inteligente

- distribuidores independientes o negocios urbanos (clientes);
- gobierno municipal y residentes (tomados en conjunto ya que sus objetivos pueden ser considerados similares).

Dados estos interesados, las cuatro funciones objetivo a ser optimizadas son:

 $f_l(s)$: costo de transporte en el primer nivel, relacionado con los costos de los proveedores (ver Ecuación (1));

 $f_2(s)$: costo de transporte en el segundo nivel, que concierna a los distribuidores o clientes, dependiendo de quién carga con la mayor parte de los costos de distribución en este nivel (ver Ecuación (2));

 $f_3(s)$: número de vehículos utilizados, relacionado a la contribución al tráfico, de interés para el gobierno municipal y los residentes (ver Ecuación (3)); así como,

 $f_4(s)$: emisiones de CO₂ (u otros materiales que generen polución ambiental), de interés para el gobierno y los residentes (ver Ecuación (4)).

3.1. Representación del Problema

La formulación propuesta del M²-2E-VRP asume como datos conocidos los conjuntos de depósitos, satélites, clientes y vehículos separados en sus respectivos niveles. Estos conjuntos se representan en este trabajo como sigue:

- un conjunto D de n_D depósitos;
- un conjunto S de n_s satélites;
- un conjunto C de n_c clientes;
- un conjunto L1 de m_1 vehículos del primer nivel; y
- un conjunto L2 de m_2 vehículos del segundonivel.

En la versión actual de la formulación del problema, cada depósito i está asociado a un único producto p; consecuentemente, hay n_D productos. En cuanto a los depósitos, satélites, y clientes, se provee también el siguiente dato:

 d_{ij} : distancia de *i* a *j* (longitud del arco)

i y *j* pueden ser cualquier depósito, satélite, o cliente donde exista un arco. Por practicidad y considerando los parámetros utilizados más adelante, la unidad de medida de distancia será en kilómetros.

Como esta formulación considera flotas heterogéneas con características distintas en cada vehículo, los parámetros referentes a capacidad y emisiones de carbono no describen conjuntos enteros de vehículos, pero están asociados a vehículos individuales. En este trabajo, k se usa para capacidad, c para costo por kilómetro y g para emisiones de carbono. Costo por kilómetro es un parámetro único para cada vehículo que resume los costos inherentes de operación, como consumo de combustible y mantenimiento. Se representan de la siguiente forma:

 k_q^1 : capacidad de vehículo q del primer nivel

 ${m k}_{{m q}'}^2$: capacidad de vehículo q ' del segundo nivel

: costo por kilómetro de vehículo q del primer nivel

 $c_{q'}^2$: costo por kilómetro de vehículo q' del segundo nivel

: g CO₂ / km (emisiones) de vehículo q del primer nivel $g_{q'}^2$: g CO₂ / km (emisiones)

de vehículo q' del segundonivel

En el VRP clásico y formulaciones siguientes, un peso o demanda (no-negativo) puede ser asociado a cada ciudad, o cliente, que debe ser satisfecho en nuestro contexto (2). Esta demanda típicamente es unidimensional para cada cliente. En la presente formulación, sin embargo, múltiples productos son considerados, situación conocida en inglés como multicommodity, y la representación de la demanda debe reflejar esta multi-dimensionalidad.

Por lo tanto, esta formulación considera una variable demanda (representada por r como en requiere) asociada tanto a un cliente como a un producto específico, resultando en la práctica en un arreglo de demandas por cada cliente:

 r_i^p : demanda del producto p por el cliente i

3.2. Representación de la Solución

Las soluciones resultantes son conjuntos de rutas asignadas a los vehículos y la combinación de carga llevadas y entregadas por cada uno a cada punto en su ruta asociada. Esta información puede ser construida con los siguientes datos:

- el uso de arco (i, j) por un vehículo q en cada nivel $(x_{ij}^q$ para L1 e y_{ij}^q para L2); y
- el volumen del producto p llevado por un vehículo q en cada arco (i, j) que transita

Las variables previamente mencionadas son definidas como sigue: $x_{ij}^q = \begin{cases} 1 & \text{si vehículo L1 } q \text{ transita } (i,j) \text{ donde } i,j \in D \cup S \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$ $y_{ij}^{q'} = \begin{cases} 1 & \text{si vehículo L2 } q' \text{ transita } (i,j) \text{ donde } i,j \in S \cup C \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$ $z_{ij}^{pq} \quad \text{: cantidad del producto } p \text{ llevado en vehículo } q \text{ al transitar arco } (i,j)$

Además, una variable de uso de vehículo se deriva de x e y:

 $u_q^1 = \begin{cases} 1 & \text{si vehículo L1 } q \text{ es utilizado} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$ $u_{q'}^2 = \begin{cases} 1 & \text{si vehículo L2 } q' \text{ es utilizado} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$

Eitzen H, López-Pire F, Barán B, Sandoya F, Chicaiza JL, Suárez Núñez JL. Ruteo de vehículos multi-objetivo en dos niveles para logística urbana inteligente

3.3. Funciones Objetivo

Aunque en general algunas funciones objetivo pueden ser minimizadas mientras se maximizan otras, en este trabajo cada una de las funciones objetivo consideradas está formulada en un solo contexto de optimización (solo minimización). En este trabajo, se propone optimizar las siguientes cuatro funciones dentro de un programa multi-objetivo:

- minimización del costo de transporte en el primer nivel;
- minimización del costo de transporte en el segundo nivel;
- minimización de la cantidad de vehículos; y
- minimización de las emisiones de CO₂.

•

Minimización del Costo de Transporte. Típicamente, como se ha visto en la Tabla 1, la mayoría de los trabajos sobre el 2E-VRP consideran alguna forma de minimización de costo de transporte o tráfico como el único objetivo a ser optimizado, el cual está incluido en este trabajo como costo de transporte. Sin embargo, este costo está dividido en dos funciones objetivo separadas, uno para el primer nivel y otro para el segundo, dado que pueden afectar a interesados distintos como se mencionó anteriormente (proveedores y distribuidores o clientes). Esto toma en cuenta que dos soluciones diferentes pueden tener el mismo o similar costo de transporte, pero uno con más ruteo (y por ende costo) en el primer nivel, y el otro en el segundo nivel. Además, aunque trabajos previos utilizan un solo parámetro de costo en cada arco para calcular el costo de transporte (18), en este trabajo se utilizan dos parámetros diferentes (c y d). Esto se debe al uso de flotas homogéneas en trabajos previos, donde el costo de operación de todos los vehículos será el mismo y por lo tanto el costo total sería directamente proporcional a la distancia total acumulada cubierta por todos los vehículos. Por esta razón, no había necesidad de considerar el costo de operación de forma separada de la distancia. Sin embargo, en el presente trabajo, las flotas son heterogéneas y el costo de operación probablemente diferirá entre vehículos (por ejemplo, el consumo de combustible de un vehículo diésel comparado con un vehículo naftero de la misma o similar capacidad). Las funciones objetivo relacionadas al costo de transporte están matemáticamente formuladas abajo.

Minimizar el costo de transporte en el primer nivel:

$$f_1(s) = \sum_{q \in L1} \sum_{i \in D \cup S} \sum_{j \in D \cup S} d_{ij} x_{ij}^q c_q^1$$
(1)

Minimizar el costo de transporte en el segundo nivel:

$$f_2(s) = \sum_{q' \in L2} \sum_{i \in S \cup C} \sum_{j \in S \cup C} d_{ij} y_{ij}^{q'} c_{q'}^2$$
(2)

3.3.2. Minimización de Cantidad de Vehículos. Es posible que surja una situación en la que la solución con el menor costo de transporte utiliza a todos los vehículos disponibles. Sin embargo, puede ser deseable mantener un número bajo de vehículos viajando de modo a evitar saturar la red de transporte. Por lo tanto, minimizar la cantidad de vehículos es

considerado una función objetivo, formulada como sigue:

$$f_3(s) = \sum_{q \in L1} u_q^1 + \sum_{q' \in L2} u_{q'}^2$$
 (3)

3.4.3. Minimización de Emisiones de Carbono. Pocos artículos sobre el 2E-VRP explícitamente consideran la minimización del impacto ambiental como una función objetivo a ser optimizada. El impacto ambiental sin embargo es un tópico más estudiado en el contexto de Logística Urbana (*City Logistics*) y UGM, específicamente en el campo de sustentabilidad de logística urbana (19). El 40% de todas las emisiones de CO₂ en el transporte caminero y hasta 70% de otros agentes contaminantes del transporte surgen de la movilidad urbana, y las emisiones de tráfico en general son responsables del 70% de las sustancias cancerígenas y otras sustancias peligrosas en el ambiente (20). Como este trabajo trata el 2E-VRP desde una perspectiva UGM en el contexto de Logística Urbana, los autores consideran la minimización del impacto ambiental una meta necesaria. Esta función objetivo está formulada como sigue:

$$f_4(s) = \sum_{q \in L1} \sum_{i \in D \cup S} \sum_{j \in D \cup S} d_{ij} x_{ij}^q g_q^1 + \sum_{q' \in L2} \sum_{i \in S \cup C} \sum_{j \in S \cup C} d_{ij} y_{ij}^{q'} g_{q'}^2$$
 (4)

La función objetivo (4) está potencialmente en conflicto con las primeras dos relacionadas al costo de transporte, ya que los vehículos con menores tasas de emisiones (por ejemplo, eléctricos o híbridos) pueden tener costos operativos más altos, dependiendo de cómo estos se calculen, debido a costos mayores de adquisición, mantenimiento y consumo de energía (como combustible), o el suministro limitado de este (21).

Debe ser mencionado que otros contaminantes, como el monóxido de carbono u óxidos de nitrógeno, también pueden ser considerados y añadidos como funciones objetivo adicionales con esta nueva formulación. Es solo cuestión de agregar la información requerida a los vehículos y formular la función objetivo basándose en Ecuación (4).

4.- ALGORITMO PROPUESTO

Los Algoritmos Evolutivos (EA, Evolutionary Algorithms) se basan en una población, la cual evoluciona iterativamente hacia mejores soluciones. Los Algoritmos Genéticos (GA, Genetic Algorithms) son los EAs más usados, que emulan el proceso de evolución biológica, representando posibles soluciones como cromosomas y utilizando mecanismos inspirados en la biología evolutiva, como la reproducción y la mutación. Se ha encontrado que los MOEA son especialmente adecuados para problemas de optimización multi- objetivo (27). Teniendo en cuenta la gran cantidad de parámetros de entrada y la naturaleza multi-objetivo de la formulación considerada en este trabajo, un algoritmo que garantice la búsqueda de soluciones óptimas resultaría inviable para las instancias de problemas del mundo real. En consecuencia, a continuación, se presenta un MOEA propuesto. El algoritmo propuesto se basa en el bien conocido Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) propuesto

por Deb et al. En (25) que, de acuerdo con la literatura especializada, es actualmente un algoritmo de referencia utilizado incluso para la comparación con nuevos métodos (9).

El MOEA propuesto en este trabajo considera un cromosoma de dos partes diseñado para representar la asignación de clientes y satélites a vehículos, así como sub-algoritmos considerados para el enrutamiento de vehículos en ambos niveles, que se ejecutan para cada cromosoma modificado en cada generación. También se diseñaron operadores especializados de cruce y mutación que tengan en cuenta la estructura única del cromosoma, así como los mecanismos de reparación de la solución.

4.1. Cromosoma Propuesto

En los EAs, la representación de soluciones es conocida como cromosoma. Para el problema considerado en este trabajo, se ha diseñado un cromosoma con dos partes. La primera parte diseñada es una matriz de longitud m_2 (número de vehículos en el segundo nivel) y denotada como puntos de partida.

La segunda parte diseñada es una matriz de \mathbf{n}_C (número de clientes en el segundo nivel) filas por \mathbf{n}_D (número de depósitos, igual a la cantidad de productos a medida que cada depósito tiene asignado exactamente un producto) columnas, denotada como **entrega de productos**. Los puntos de partida del cromosoma representan los satélites en los que los vehículos en el segundo nivel comienzan y terminan sus rutas. Cada celda representa el satélite inicial y final para un vehículo de segundo nivel y puede tener cualquier valor entero en $[0, \mathbf{n}_S]$ (número de satélites). Un valor de 0 indica que el vehículo no se está utilizando.

La porción de entrega del producto del cromosoma representa qué vehículos entregan qué productos a qué clientes. Cada celda representa la entrega de la demanda de un solo producto a un solo cliente, y puede tener cualquier valor entero en [1, m2], a menos que la demanda de dicho cliente por dicho producto sea 0, en cuyo caso el valor del afectado la celda será 0 en todas las personas.

Un escenario de ejemplo con 6 vehículos en el segundo nivel, 3 depósitos y productos, 3 satélites, 5 clientes y sin demanda por parte de los clientes 2 y 4 para los productos 1 y 2 respectivamente, dará como resultado el siguiente cromosoma presentado en la Ecuación (5):

Puntos de Partida = [1 3 0 2 2 3] Entrega de Productos =
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 6 \\ 2 & 0 & 4 \\ 6 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$
 (5)

En la solución presentada en la Ecuación (5), solo se utilizan 5 de los 6 vehículos de segundo nivel; el vehículo 3 no es usado, como lo indica el valor 0 en la celda 3 de los **puntos de partida**.

Además, los valores 0 en (2,1) y (4,2) de la **entrega de productos** reflejan la falta de demanda de los productos 1 y 2 por los clientes 2 y 4, respectivamente.

4.2. MOEA Propuesto

En el Algoritmo 1 se muestra un esquema de alto nivel del MOEA propuesto basado en NSGA-II para el problema formulado en la Sección 3. El MOEA propuesto recibe los siguientes datos de entrada:

- Número de depósitos n_D , número de satélites n_S y número de clientes n_C ;
- Una matriz de distancia de primer nivel de tamaño $(n_D+n_S)^2$, que contiene las distancias entre depósitos y satélites, representada por $D_1 = \{d_i, j\}$;
- Una matriz de distancia de segundo escalón de tamaño $(n_s+n_c)^2$, que contiene las distancias entre los satélites y los clientes, representada por $D_2 = \{d_i, j\}$;
- La matriz de demanda de tamaño ($\mathbf{n}_{C} \mathbf{x} \mathbf{n}_{D}$), que contiene la demanda de cada producto por cada cliente, representada por $\mathbf{R} = \mathbf{r}_{i,p}$;
- Las listas de vehículos, de tamaños m_1 y m_2 , que contienen cada vehículo representado por L_1 y L_2 ;
- El tamaño N de la población inicial; y
- El número máximo de generaciones **maxgen**.

```
Algoritmo 1: MOEA basado en NSGA-II para resolver M<sup>2</sup>-2E-VRP
```

```
Datos de entrada: n_D, n_S, n_C, D_1, D_2, R, L_1, L_2, N, maxgen
Salida: aproximación del conjunto Pareto P_{conocido}
1.
            inicializar conjunto de soluciones P_{\theta}
2.
            P_0' = reparar soluciones no válidas de P_0
3.
            P_{\theta}'' = resolver sub-problemas CVRP en primer nivel de P_{\theta}'
4.
            P_{\theta} " = reparar soluciones no válidas de P_{\theta}"
           actualizar conjunto de soluciones P_{conocido} de P_0'''
5.
            t = 0; P_t = P_0'''
6.
7.
            mientras no se cumpla el criterio de parada
                       Q_t = selección de soluciones de P_t \cup P_{conocido}
8.
                       Q_t' = cruzamiento y mutación de soluciones de Q_t
9.
              Q_t'' = reparar soluciones no válidas de Q_t'
10.
             Q_t''= resolver sub-problemas CVRP en primer nivel de Q_t''
11.
              actualizar conjunto de soluciones P_{conocido} de Q_t"
12.
13.
              incrementar t
             P_t = ordenamiento no dominado de P_t \cup Q_t"
14.
15.
      fin mientras
      retornar aproximación del conjunto Pareto P<sub>conocido</sub>
16.
```

En el paso 1, se inicializa un conjunto de N candidatos aleatorios P_0 , cuyas soluciones se reparan en el paso 2 para garantizar que P_0 contenga solo soluciones factibles. En el paso 3, se encuentra una solución para el primer nivel de cada individuo usando un enfoque óptimo. Las soluciones se evalúan en el paso 4 utilizando un proceso de *Non-Dominated Rank* del NSGA-II, a través del cual se obtienen soluciones no dominadas. El primer conjunto P_{conocido}

(aproximación de conjunto de Pareto) se genera en el paso 5. Después de la inicialización en el paso 6, comienza la evolución (iteraciones entre pasos 7 y 14). El proceso evolutivo básicamente sigue el mismo comportamiento, finalmente devuelve el conjunto de soluciones no dominadas Pconocido en el paso 16.

5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar el enfoque evolutivo presentado en la Sección 4 para el problema propuesto en la Sección 3, se realizó el siguiente experimento. Este experimento valida el correcto funcionamiento y la buena calidad de soluciones obtenidas por el MOEA propuesto, en comparación con soluciones óptimas obtenidas mediante un Algoritmo de Búsqueda Exhaustivo (ESA, *Exhaustive Search Algorithm*).

El algoritmo basado en NSGA-II presentado en la sección anterior se implementó en Python disponible públicamente en línea en el siguiente https://github.com/HaikoEitzen/ea m2-2e-vrp. Los autores diseñaron e implementaron cromosomas, así como los operadores de cruzamiento y mutación, reparación de soluciones y evaluación, mientras que para el NSGA-II, incluyendo el proceso de Non- Dominated Rank de las poblaciones y la adquisición de la aproximación del conjunto de Pareto, se utilizó la implementación de DEAP. también disponible públicamente https://github.com/DEAP/deap. El experimento considerado se realizó en una computadora con: Procesador AMD A4-3300M de doble núcleo a 1.9 GHz con 4 GB de RAM DDR3 (512 MB reservados para hardware, 3.5 GB disponibles) con Windows 7 Home Premium 64 bits OS. La versión de Python utilizada fue 2.7.9. Se consideró una pequeña instancia de problema, con las características descritas en la Tabla 2.

Tabla 2: Tipos de vehículos usados en la instancia del experimento.

Tipo de Vehículo	Nivel	Capacidad (kg)	Costo (Guaraníes/km)	Emisiones (gCO ₂ /km)	
Fuso Canter 7C15	1	5500	673.53	408	
Renault Master SWB		1600	443.82	204	
Renault Master LWB		1400	415.37	189	
Renault Kangoo	2	800	400	180	
Fiat Fiorino Van		700	392.61	161	

La matriz de demanda se generó aleatoriamente, asignando demandas entre 0 y 700 kilogramos (la capacidad de carga del vehículo más pequeño) a cada intersección cliente-producto, de tal manera que la demanda total de un solo producto no exceda la capacidad disponible del tipo de vehículo de primer nivel, y que la demanda combinada de todos los productos sea menor que la capacidad combinada disponible de vehículos de segundo nivel,

para permitir soluciones con cantidades variables de vehículos. La cantidad de vehículos disponibles en cada instancia se estableció arbitrariamente.

Un resumen de las características de la instancia del problema considerado puede verse en la Tabla 3, incluyendo el número de depósitos, satélites y clientes considerados, la demanda total de todos los productos por parte de los clientes, la capacidad combinada de todos los vehículos de segundo nivel y la cantidad de dichos vehículos disponibles.

Tabla 3: Resumen de características de instancia de problema considerada	Tabla 3:	Resumen d	le características	de instancia	a de pro	blema coi	nsiderada.
---	----------	-----------	--------------------	--------------	----------	-----------	------------

Características	Instancia
Depósitos (n _D)	2
Satélites (ns)	3
Clientes (n_C)	5
Demanda Total	4050
Capacidad Total L_2	6000
Vehículos Disponibles <i>L</i> ₂	6

Se realizó una comparación del conjunto de Pareto óptimo obtenido por el ESA y la aproximación de conjunto de Pareto obtenida por el MOEA propuesto, con el fin de evaluar la calidad de las soluciones obtenidas. Para este experimento, se realizó una ejecución del ESA para obtener el conjunto de Pareto óptimo para dicha instancia, y posteriormente se comparó con la aproximación de conjunto de Pareto combinada de 10 ejecuciones del MOEA propuesto con la misma instancia. El tamaño del espacio de decisión en la instancia considerada resulta en 44.079.842.304 posibles soluciones, de las cuales 184.112.838 son válidas según las restricciones formuladas y evaluadas por la ESA. Debido al tamaño del espacio de decisión y el consumo de tiempo por parte del ESA, este experimento solo se realizó en una instancia problema con pequeñas entradas. Las ejecuciones del MOEA se realizaron con un tamaño de población de 200 (N = 200) durante 200 generaciones (maxgen = 200).

Después de combinar las 10 aproximaciones de conjunto de Pareto producidas por el MOEA en un solo conjunto de soluciones no dominadas, se obtuvo el frente de Pareto óptimo, y en un tiempo considerablemente menor (17 horas frente a 17 minutos). De esta manera, se demuestra que el MOEA propuesto puede proporcionar soluciones de buena calidad en comparación con una solución óptima establecida en un tiempo de ejecución razonable.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado una estrategia de distribución multi-nivel multi-objetivo considerando a todos los interesados significativos, tanto empresas como autoridades municipales, como método para reducir la congestión de tráfico y su contaminación resultante en un contexto urbano y simultáneamente minimizando pérdidas económicas. La estrategia propuesta está basada en organizar el tráfico comercial relacionado al movimiento de bienes urbanos, desde el punto de vista de un gobierno municipal que busca un método de

solución holístico, en el marco de un esquema de distribución en dos niveles conocido como el *Problema de Ruteo de Vehículos en Dos Niveles* (2E-VRP). Esta estrategia adapta el 2E-VRP al contexto de Logística Urbana y Movimiento de Bienes Urbanos considerando múltiples proveedores, productos, depósitos, interesados y objetivos, y flotas vehiculares heterogéneas, recibiendo el nombre de *Problema de Ruteo de Vehículos en Dos Niveles Multi-Proveedor Multi-Objetivo* (M²-2E-VRP).

Varios interesados fueron considerados, específicamente proveedores, distribuidores independientes, clientes, residentes, y el gobierno municipal. Basado en los objetivos de estos interesados, cuatro funciones objetivo fueron consideradas y formuladas para la optimización multi-objetivo: (i) minimización de costo en el primer nivel (objetivo de proveedores), (ii) minimización de costo en el segundo nivel (objetivo de clientes o distribuidores independientes), (iii) minimización de la cantidad de vehículos (objetivo de gobierno municipal y residentes) y (iv) minimización de la contaminación ambiental, por ejemplo por emisiones de anhídrido carbónico (objetivo de gobierno municipal y residentes). Las soluciones al problema anteriormente mencionado considerando estos objetivos proveerán esquemas de ruteo que simultáneamente minimizan el tráfico y sus costos relacionados como también la contaminación debido a emisiones de CO₂. Este modelo sin embargo es flexible y no limitado a estos objetivos, y puede ser fácilmente modificado para considerar más o diferentes objetivos, como minimizar otros tipos de emisiones, maximizar el uso de vehículos eléctricos, o minimizar el uso de satélites.

Además, este trabajo presentó un MOEA para resolver una formulación multi-objetivo propuesta. Una primera evaluación experimental realizada demostró que el algoritmo propuesto es capaz de encontrar soluciones de buena calidad en comparación con las soluciones óptimas en una instancia pequeña del problema.

Las direcciones futuras incluyen la evaluación del MOEA propuesto con otras instancias de problemas, así como la evaluación de la escalabilidad del algoritmo propuesto para resolver instancias del problema con una gran cantidad de depósitos, satélites y clientes. Dada la novedad de los enfoques y perspectivas propuestas, varias otras formulaciones, funciones objetivo y técnicas de resolución deben ser evaluadas como una herramienta real su exitosa implementación en ciudades en las que se enfoca el proyecto DEMOSDUM.

6. Agradecimiento

Este trabajo fue parcialmente posiblemente gracias al proyecto DEMOSDUM¹ del programa Math AmSud.

¹ Disponible en: https://www.researchgate.net/project/Math-AmSud-DEMOSDUMDesign-and-Model-of-an- Optimal-System-for-Urban-Freight-Distributionfor-critical-and-heterogeneous-Km2-in-Guayaquil- and-Quito-cities-in-Ecuador

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. Cattaruzza D, Absi N, Feillet D, González-Feliu J. Vehicle Routing Problems for City Logistics. EURO. Journal on Transportation and Logistics. 2015;1-29.
- 2. Laporte G. The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms. European Journal of Operational Research. 1992;59(3):345-358.
- 3. Crainic TG, Ricciardi N, Storchi G. Advanced Freight Transportation Systems for Congested Urban Areas: Transportation Research Part C. Emerging Technologies. 2004;12(2):119-137.
- 4. González-Feliu J. Models and Methods for the City Logistics: the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. Disertación Ph.D., Politecnico di Torino; 2008.
- González-Feliu J. Vehicle Routing in Multi-echelon Distribution Systems with Cross-docking: A Systematic Lexical-metanarrative Analysis. Computer and Information Science. 2013;6(3):28-37.
- Cuda R, Guastaroba G, Speranza MG. A Survey on Two-Echelon Routing Problems. Computers & Operations Research. 2015;55:185-199.
- Hemmelmayr VC, Cordeau JF, Crainic TG. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems Arising in City Logistics. Computers & Operations Research. 2012;39(12):3215-3228.
- 8. Hernández-Pérez H, Salazar-González JJ. The Multi-commodity Pickup-and-Delivery Traveling Salesman Problem. Networks. 2014;63(1):46-59.
- 9. Coello Coello CA, Lamoun GB, Van Veldhuizen DA. Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems; 2007.
- 10. Crainic TG, Mancini S, Perboli G, Tadei R. Clustering-based Heuristics for the Two- Echelon Vehicle Routing Problem. Montreal, Canada: Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation; 2008.
- 11. Crainic TG, Mancini S, Perboli G, Tadei R. Multi-start Heuristics for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem. En European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Springer; 2011. p. 179-190.
- 12. Crainic TG, Mancini S, Perboli G, Tadei R. GRASP with Path Relinking for the Two- Echelon Vehicle Routing Problem. En Advances in Metaheuristics. Springer; 2013, p. 113-125. 13.
- 13. Crainic TG, Ricciardi N, Storchi G. Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. Transportation Science. 2009;43(4):432-454.
- 14. Perboli G, Tadei R. New Families of Valid Inequalities for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem. Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2010;36:639-646.
- 15. Perboli G, Tadei R, Vigo D. The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem: Models and Math-based Heuristics. Transportation Science. 2011;46(3):364-380.
- 16. Jepsen M, Spoorendonk S, Ropke S. A Branch-and-Cut Algorithm for the Symmetric Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. Transportation Science.2013;47(1):23-37.
- 17. Baldacci R, Mingozzi A, Roberti R, Calvo RW. An Exact Algorithm for the Two- Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. Operations Research. 2013;61(2):298-314.
- 18. González-Feliu J, Perboli G, Tadei R, Vigo D. The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem; 2008.
- 19. Russo F, Comi A. City Characteristics and Urban Goods Movements: A Way to Environmental Transportation System in a Sustainable City. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2012;39: 61-73.
- 20. Silva AB, Ribeiro A. An Integrated Planning for Cities to Promote Sustainable Mobility. En Proceedings of European Transport Conference. Citeseer, 2009.
- 21. Van Vliet O, Brouwer AS, Kuramochi T, van Den Broek M, Faaij A. Energy Use, Cost, and CO 2

- Emissions of Electric Cars. Journal of Power Sources. 2011;196(4):2298-2310.
- 22. Barán B, Scharer M. A Multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows. En Applied Informatics. 2003; p. 97-102.
- Andrade CE, Miyazawa FK, Resende MG. Evolutionary Algorithm for the K- interconnected Multi-depot Multi-traveling Salesmen Problem. En Proceedings of the 15th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation; 2013. p. 463-470.
- 24. Gee SG, Arokiasami WA, Jiang J, Tan KC. Decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm for vehicle routing problema with stochastic demands. Soft Computing. 2016;20(9):3443-3453.
- 25. Deb K, Pratap A, AgarwalS, Meyarivan TAMT. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation.2002;6(2):182-197.
- 26. Han S, Tabata Y. A Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle-Routing Problem with Controlling Lethal Gene. Asia Pacific Management Review. 2002;7(3):405-425.
- 27. Zitzler E, Thiele L. Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999;257-271.