

Información Importante

La Universidad de La Sabana informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad de La Sabana.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, La Universidad de La Sabana informa que los derechos sobre los documentos son propiedad de los autores y tienen sobre su obra, entre otros, los derechos morales a que hacen referencia los mencionados artículos.

BIBLIOTECA OCTAVIO ARIZMENDI POSADA
UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Chía - Cundinamarca

Solución de los problemas de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de sus vehículos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magíster en Gerencia de Operaciones
(Modalidad de investigación)

Andrés Felipe Muñoz Villamizar

Director:
Jairo Rafael Montoya Torres, Ph.D.

Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2013

Resumen:

En la mayoría de las grandes y medianas ciudades, las operaciones de transporte de mercancías tienen un impacto notable en la movilidad del tráfico urbano, así como en las actividades comerciales de la ciudad. La creación de centros urbanos de distribución cerca del centro de las ciudades para consolidar las cargas, es una iniciativa implementada alrededor del mundo que busca disminuir la congestión del tráfico vehicular en las calles y la calidad de vida sus habitantes. Este trabajo considera el problema de localizar los centros de distribución en las zonas urbanas y propone un enfoque para la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo. Se busca resolver, de manera integral, los problemas de localización, dimensionamiento y operación (ruteo de camiones) en estas terminales logísticas. El enfoque es validado usando datos de la vida real provenientes de la ciudad de Saint-Étienne, Francia. Así mismo, se realizan comparaciones experimentales con procedimientos existentes en la literatura. Los resultados muestran la eficiencia y efectividad del enfoque propuesto y su aplicabilidad en la realidad, para instancias hasta de tamaño grande donde, las salidas del enfoque, deben ser analizadas por el tomador de decisiones y pueden mejorar la competitividad del sistema logístico y las condiciones ambientales y sociales de la ciudad en cuestión.

Palabras clave: transporte de mercancías, centros urbanos de distribución, consolidación de cargas, tráfico vehicular, niveles de decisión

Abstract: In most medium and large sized cities, freight transportation operations have a noticeable impact on urban traffic mobility as well as on city commercial activities. The implementation of urban distribution centers near to city centers to allow freight consolidation is a widely worldwide extended initiative, seeking to reduce traffic congestion and quality of life in downtown, among others. This work considers the problem of locating distribution centers in urban areas and proposes an approach for strategic, tactical and operational decision-making. The aim is to solve, in an integer manner, location, sizing and operation (vehicle routing) problems in these logistics platforms. The model is validated using real-life data taken from the city of Saint-Étienne, France. Also, computational experiments are carried out in order to compare the proposed model with existing procedures from the literature. Results show the efficiency and effectiveness of the proposed approach and its applicability in real decision-making for large sized data sets where, the approach outputs, must be evaluated by the decision maker and can improve the competitiveness of the logistics system and environmental and social conditions of the city under study.

Keywords: freight transportation, urban distribution centers, freight consolidation, traffic, decision levels

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Lista de Figuras | 5 |
| Lista de Tablas..... | 6 |
| Capítulo 1. Introducción..... | 7 |
| 1.1. Logística Urbana | 7 |
| 1.2. Location-Routing Problem | 7 |
| 1.3. Enfoque de la Solución Propuesto | 8 |
| 1.4. Organización del Documento | 9 |
| Capítulo 2. Planteamiento del Problema | 10 |
| 2.1. Introducción..... | 10 |
| 2.2. Centros Urbanos de Distribución | 10 |
| 2.3. Preguntas y Objetivos de la Investigación..... | 11 |
| 2.3.1. Preguntas de la Investigación..... | 11 |
| 2.3.2. Objetivo General | 11 |
| 2.3.3. Objetivos Específicos | 11 |
| 2.4. Justificación y Delimitación del Estudio | 12 |
| 2.5. Revisión de la Literatura..... | 12 |
| 2.5.1. Conceptualización de Localización-Ruteo | 12 |
| 2.5.1.1. Localización y Dimensionamiento: Problema p -Mediana..... | 13 |
| 2.5.1.2. Dimensionamiento: Problema de Transporte | 13 |
| 2.5.1.3. Ruteo de Vehículos..... | 13 |
| 2.5.1.4. Dimensionamiento y Ruteo de Vehículos..... | 15 |
| 2.5.1.5. Problema Localización-Ruteo | 16 |
| 2.5.2. Clasificación del LRP..... | 17 |
| 2.5.3. Métodos Exactos | 17 |
| 2.5.4. Métodos Heurísticos..... | 18 |
| 2.5.5. Aplicaciones y Soluciones del LRP | 18 |
| 2.6. Conclusiones del capítulo..... | 19 |
| Capítulo 3. Modelamiento Matemático..... | 20 |
| 3.1. Formulación del modelo de programación lineal entera mixta..... | 20 |
| 3.2. Experimentos y análisis de resultados | 23 |

| | |
|---|----|
| 3.2.1. Resultados de la primera fase..... | 24 |
| 3.2.2. Resultados de la segunda fase..... | 26 |
| 3.3. Conclusiones sobre el modelo matemático..... | 27 |
| Capítulo 4. Procedimiento Heurístico..... | 28 |
| 4.1. Introducción..... | 28 |
| 4.1. Conceptos del Enfoque Propuesto..... | 28 |
| 4.1.1. Aleatorización Sesgada..... | 28 |
| 4.1.2. Búsqueda Local Iterada..... | 29 |
| 4.1.3. Clarke and Wright's Savings (CWS)..... | 30 |
| 4.1.4. Centro de Masa..... | 30 |
| 4.2. Enfoque Propuesto..... | 30 |
| 4.2.3. Localización..... | 31 |
| 4.2.4. Dimensionamiento y ruteo de vehículos..... | 33 |
| 4.5. Experimentos y análisis de resultados..... | 34 |
| 4.5.1. Escenario A: 20 clientes y 20 ubicaciones potenciales para un Depósito..... | 34 |
| 4.5.2. Escenario B: 50 clientes y 8 ubicaciones potenciales para un Depósito..... | 36 |
| 4.5.3. Escenario C: 100 clientes y 8 ubicaciones potenciales para un Depósito..... | 37 |
| 4.5.4. Escenario D: 1227 clientes y 12 ubicaciones potenciales para un Depósito..... | 38 |
| 4.5.6. Escenario E: Depósito en la Periferia..... | 38 |
| 4.6. Conclusiones del capítulo..... | 40 |
| Capítulo 5. Conclusiones y Perspectivas..... | 41 |
| 5.1. Conclusiones..... | 41 |
| 5.2. Perspectivas de investigación..... | 42 |
| Referencias..... | 43 |
| Anexo 1. Datos de los Comercios de la Ciudad de Saint-Étienne..... | 46 |
| Anexo 2. Datos de las Posibles Ubicaciones del UDC de la Ciudad de Saint-Étienne..... | 50 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de operación de un Centro de distribución urbano..... | 10 |
| Figura 2. Comparación entre distribución tradicional y distribución con Centros Urbanos de Distribución | 11 |
| Figura 3. Representación Gráfica TSP..... | 14 |
| Figura 4. Representación Gráfica m-TSP..... | 14 |
| Figura 5. Representación Gráfica VRP..... | 15 |
| Figura 6. . Representación Gráfica MDVRP..... | 16 |
| Figura 7. Representación Gráfica LRP | 16 |
| Figura 8. Distribución de los 20 clientes seleccionados, los comercios y sitios importantes de la ciudad de Saint-Étienne..... | 24 |
| Figura 9. Comparación entre los enfoques óptimo y jerárquico para 20 clientes | 25 |
| Figura 10. Soluciones de las instancias con 50 y 100 clientes | 27 |
| Figura 11. Distribuciones geométricas para diferentes valores de alfa | 29 |
| Figura 12. Diagrama de flujo enfoque propuesto | 31 |
| Figura 13. Distribuciones Geométricas para $\alpha=0,2$ y $\alpha=0,3$ | 32 |
| Figura 14. Soluciones del procedimiento heurístico para el Escenario A con 20 clientes y una, dos y tres rutas | 35 |
| Figura 15. Soluciones obtenidas para el Escenario B con 50 clientes usando ambos métodos..... | 36 |
| Figura 16. Soluciones obtenidas para el Escenario C con 100 clientes usando ambos métodos | 37 |
| Figura 17. Solución del Escenario D con 1227 clientes y tres rutas | 38 |
| Figura 18. Solución del Escenario E con 50 clientes, tres rutas y el depósito ubicado en la periferia | 39 |
| Figura 19. Solución del Escenario E con 1227 clientes, tres rutas y depósito ubicado en la periferia. | 40 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Aplicaciones del LRP en Casos Reales. Adaptado de: Nagy y Salhi (2005) | 19 |
| Tabla 2. Comparación de resultados del modelo jerárquico con el modelo óptimo propuesto | 25 |
| Tabla 3. Resultados del modelo integral con 5 posibles ubicaciones para UDC y 50 clientes..... | 26 |
| Tabla 4. Resultados para el Escenario A con 20 clientes y una, dos y tres rutas..... | 35 |
| Tabla 5. Resultados para el Escenario B con 50 clientes y tres rutas..... | 36 |
| Tabla 6. Resultados para el Escenario C con 100 clientes y una ruta. | 37 |
| Tabla 7. Resultados del Escenario E con 50 clientes, tres rutas y el depósito ubicado en la periferia. | 39 |
| Tabla 8. Resultados del Escenario E con 1227 clientes, tres rutas y depósito ubicado en la periferia | 39 |
| Tabla 9. Tiempo de ejecución del método heurístico por escenario | 40 |
| Tabla 10. Datos de 20 Clientes de Montoya-Torres et al. (2012) Saint-Étienne | 46 |
| Tabla 11. 50 clientes de la ciudad de Saint-Étienne. Fase 2 – Escenarios B y C..... | 46 |
| Tabla 12. 51-100 Clientes Fase 2 – Escenario D | 48 |
| Tabla 13. 5 Posibles Ubicaciones del UDC – Fase 2..... | 50 |
| Tabla 14.6 a 8 Posibles Ubicaciones del UDC – Escenarios B y D..... | 50 |
| Tabla 15. 9 a 12 Posibles Ubicaciones del UDC – Escenarios E..... | 50 |

Capítulo 1. Introducción

1.1. Logística Urbana

La distribución de mercancías urbanas es crucial para la vitalidad económica de las ciudades, pero al mismo tiempo es causa de varios problemas con respecto a la congestión del tráfico y el medio ambiente (Roca-Riu y Estrada 2012). Para los gobiernos es un reto establecer medidas operativas eficaces para mejorar la logística urbana puesto que el mercado es heterogéneo: con múltiples tipos de productos, funciones y objetivos o intereses en conflicto.

Una solución estratégica para esta problemática es la cooperación entre los transportadores de carga a través del uso de un terminal de carga pública. Los operadores de transporte pueden llevar la carga a un centro de consolidación con vehículos más grandes y con menos restricciones de tiempo.

La idea de implementar plataformas de consolidación de carga dentro de las áreas urbanas se conoce en la literatura académica como Centros Urbanos de Distribución UDC (por sus siglas en inglés, Urban Distribution Centers). El objetivo de estas plataformas es resolver, o al menos reducir, los problemas de congestión de tráfico, contaminación ambiental y consumo alto de energía (Taniguchi et al. 1999) en las ciudades que no poseen una estructura vial apta para los pequeños pero abundantes comercios que se presentan en sus zonas centrales (Ligocki y Zonn 1984). Esta estructura es bastante típica en ciudades europeas con historia medieval, pero también existente en otras partes del mundo (en Colombia, por ejemplo, estas dificultades se encuentran en la parte amurallada de Cartagena o en el centro de Bogotá, por citar sólo dos casos).

Entre las ventajas nombradas por Taniguchi et al. (1999), se concluye que la creación de UDC's permite la formación de un sistema de logística urbana mucho más eficiente, con las mismas o mejores capacidades de servicio que los sistemas convencionales y con un menor impacto ambiental. Así, varias ciudades han decidido poner en práctica estos UDC's que pueden ofrecer diferentes posibilidades: como el uso de vehículos eléctricos (cuya autonomía limitada impide viajar largas distancias), la programación de varias entregas o rutas de recogida sucesivas (que no es manejable con plataformas a distancia) (Guyon et al. 2011b) y la implementación de sistemas cooperativos de transporte de mercancías (Nemoto 1997, Yang y Odani 2006).

Según lo anterior, el determinar de forma óptima la ubicación de estos UDC's tendría un impacto no solo económico sino también ambiental y social. En la literatura académica, Montoya-Torres et al. (2012) proponen un modelo jerárquico en donde se evalúa, no solo la ubicación de los UDC's (nivel estratégico), sino también su tamaño (nivel táctico) y las rutas de transporte de los vehículos asignados al mismo (nivel operativo). Sin embargo, con miras a implementar un proceso de diseño y operación de UDC, estos tres niveles de decisión (estratégico, táctico y operativo) se pueden integrar en un solo modelo si el problema es modelado como un problema de localización-ruteo (LRP, por sus siglas en inglés, Location-Routing Problem).

1.2. Location-Routing Problem

La conceptualización del Location-Routing Problem no es sencilla; puesto que la localización-ruteo no aborda un único problema, como el problema de Weber (localización de instalaciones) o el famoso problema del Agente Viajero TSP (por sus siglas en inglés, Traveling Salesman Problem) (Nagy y Salhi 2007).

El LRP es conceptualmente más difícil que el problema clásico de ubicación FLP (por sus siglas en inglés Facility Location Problem), y más difícil que el problema clásico de ruteo de vehículos VRP (por sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem). Ambos problemas pueden verse como casos especiales del LRP. Si todos los clientes son visitados directamente desde un depósito, el LRP, se convierte en un FLP. Y si se determina la ubicación del depósito, el LRP, se convierte en un VRP. (Nagy y Salhi 2007). Así el LRP es un problema NP-duro, ya que abarca dos problemas NP-duros (ubicación de las instalaciones y enrutamiento de vehículos). Esto quiere decir que no puede ser resuelto de una manera exacta (óptima) dentro de una cantidad razonable de tiempo.

Este problema, al igual que los problemas de investigación de operaciones, puede resolverse de forma óptima (a través de métodos exactos) o de forma eficiente (utilizando heurísticas y/o meta-heurísticas); de acuerdo con la complejidad y tamaño de los datos.

Bruns (1998) define el LRP como la planificación de la ubicación con aspectos de programación de rutas tomados en cuenta. Nagy y Salhi (2007) lo definen, como un problema jerárquico donde el objetivo es resolver el problema de ubicación de la instalación (problema principal), pero para lograrlo se necesita resolver, al mismo tiempo, el problema de ruteo de vehículos (sub-problema). Por su parte, el dimensionamiento, es un proceso intrínseco en la dinámica de localización-ruteo en donde se asigna a cada instalación (en caso de ser más de una) los clientes a visitar, para posteriormente realizar las rutas que los contengan.

Estas definiciones implican un enfoque integrado para la solución, es decir, tanto la ubicación como el ruteo están interrelacionados e influyen en la respuesta del problema.

1.3. Enfoque de la Solución Propuesto

Con el presente ejercicio, se busca caracterizar el problema integral de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de vehículos empleando modelos matemáticos con el fin de analizar su complejidad y proponer métodos eficientes de solución.

Para caracterizar el problema, en primer lugar se identifica y desarrolla un modelo matemático, basado en programación lineal entera, que optimiza de forma integral la localización del (o de los) centro(s) de distribución urbanos en una ciudad y las rutas para visitar a sus clientes. Es de notar que el concepto de UDC es relativamente nuevo y necesita más investigación intensiva en distintas áreas, tales como su función, tamaño, ubicación, administración, etc. Por otra parte, dado que el problema bajo estudio puede modelarse como un Problema de Localización-Ruteo (LRP), autores como Nagy y Salhi (2005) concluyen que los métodos exactos son, a menudo, muy exitosos para resolver casos especiales del LRP.

Dado que el LRP es un problema NP-duro, la resolución a través de modelos matemáticos y otros métodos exactos es eficiente (en términos de tiempo de cálculo) únicamente para casos y/o instancias de tamaño pequeño o mediano. Para casos y/o instancias de gran tamaño, más cercanos a la realidad, se ha preferido el uso de procedimientos heurísticos (Jourdan et al., 2009). Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto, que exige que la solución aportada sea óptima. De esta forma, se hace necesario realizar un procedimiento heurístico que permita resolver el problema, para instancias grandes, de forma eficiente, con soluciones cercanas al óptimo y en tiempos de cómputo razonables.

Tanto el método exacto como el método heurístico serán validados y comparados con los datos y los resultados obtenidos de la aplicación del modelo jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012), cuyos datos están tomados de la situación actual en la ciudad de Saint-Étienne, Francia*.

1.4. Organización del Documento

El presente documento está organizado de la siguiente manera. El capítulo 2 presenta el alcance y objetivo de la investigación, describe en detalle el problema bajo estudio y muestra la revisión de la literatura relacionada con el mismo. Los capítulos 3 y 4 presentan, respectivamente, el modelo matemático y el método heurístico planteados, su respectiva formulación, los resultados experimentales obtenidos y el análisis de los mismos. Finalmente, el capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo y sugiere algunas líneas para futuras investigaciones.

* Se estudia el caso particular de la ciudad de Saint-Étienne, Francia, como resultado de la colaboración entre el grupo de investigación “Logística y Negocios Internacionales” de la Universidad de La Sabana y el equipo de investigación PIESO del Institut Henri Fayol de la Ecole des mines de Saint-Étienne. En el marco de esta colaboración, la Universidad de La Sabana debe proponer los algoritmos necesarios para definir de forma eficiente la localización de los Centros de Distribución y el ruteo de vehículos. Los resultados preliminares de esta colaboración llevaron a la formulación de un proyecto formal conjunto para continuar profundizando el tema en Saint-Étienne y extender su aplicación en Colombia. Este proyecto (cuyo acrónimo es ANNONA) fue aprobado recientemente por parte de la Agencia Francesa de Investigación (ANR) y dará inicio a inicios del 2014.

Capítulo 2. Planteamiento del Problema

2.1. Introducción

Antes de iniciar el desarrollo de los métodos de solución, es necesario definir el problema de investigación y buscar, en la literatura existente, los trabajos relacionados con el problema en cuestión.

En primer lugar, se define el concepto de centros urbanos de distribución en la sección 2.2. A continuación, en la sección 2.3, se exponen las preguntas y los objetivos de la investigación y sección 2.4 se presentan la justificación y las limitaciones de la misma. La revisión de la literatura se realiza en la sección 2.5. La sección 2.6 concluye el capítulo.

2.2. Centros Urbanos de Distribución

Los UDC's son terminales públicas de logística con instalaciones complejas y múltiples funciones, incluyendo patios de transbordo, almacenes, mercados mayoristas, centros de información, salas de exposiciones y salas de reuniones, etc. (Taniguchi et al. 1999). Estos UDC's, están diseñados para satisfacer las diversas necesidades del sistema logístico urbano mediante el uso de sistemas avanzados de información. Con estos sistemas avanzados de información se pueden desarrollar algoritmos y heurísticas para determinar rutas de transporte y sistemas de programación más eficientes; que permitan reducir el número de vehículos que se requieren para proporcionar a los clientes el mismo nivel de servicio, o incluso superior, que el que se tiene con los sistemas de logística convencionales. . La Figura 1 muestra una representación esquemática de un UDC.

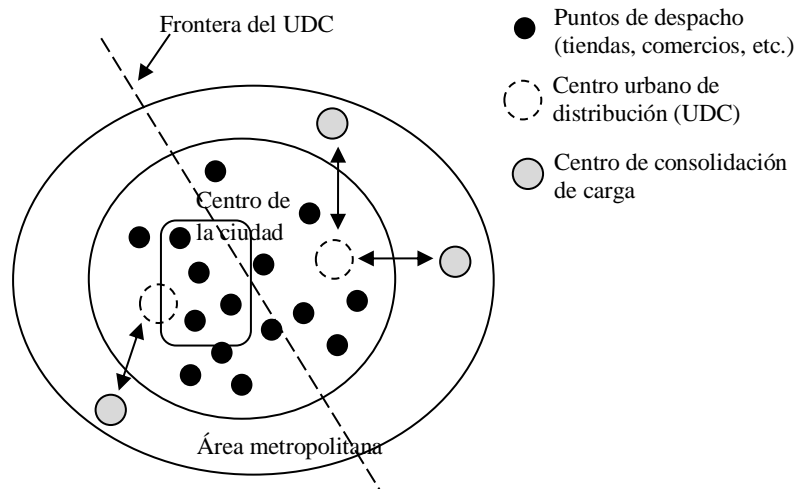


Figura 1. Esquema de operación de un Centro de distribución urbano. Fuente: Montoya-Torres et al. (2012)

Los UDC's también pueden ayudar a las pequeñas y medianas empresas a realizar un transporte eficiente de mercancías a través de la mecanización y automatización de la manipulación de los bienes. Estas terminales, además, pueden facilitar la aplicación de sistemas cooperativos de

transporte de carga, que permiten compartir y amortiguar los costos generados por la distribución de los productos; reduciendo los costos de recogida y/o entrega de bienes y los costos de adquisición y mantenimiento de los vehículos y de las instalaciones necesarias para la operación.

Faure et al. (2013) comprueban que los sistemas cooperativos de distribución, que utilizan centros urbanos de distribución, son más eficientes que los sistemas tradicionales de transporte de carga (Ver Figura 2) y Taniguchi et al. (1995), concluyen que el tráfico de camiones se puede reducir mediante la adopción de estos sistemas cooperativos de distribución. La reducción de vehículos, no solo conlleva a un ahorro monetario para las empresas, sino que descongestiona el nivel vehicular de la ciudad, disminuye el impacto ambiental (hay menos agentes contaminantes) y mejora, como consecuencia, la calidad de vida de los habitantes de la misma.

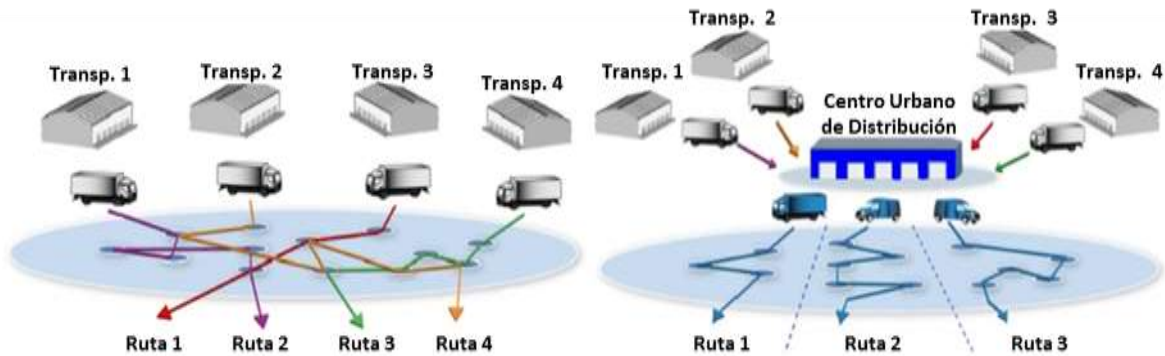


Figura 2. Comparación entre distribución tradicional y distribución con Centros Urbanos de Distribución.
Adaptado: Muñoz-Villamizar et al. (2013a)

2.3. Preguntas y Objetivos de la Investigación

2.3.1. Preguntas de la Investigación

-¿Cómo solucionar de forma eficiente el problema integral de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de vehículos empleando métodos matemáticos y/o heurísticos?

-¿Cuáles son los elementos claves del problema integral de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de vehículos?

-¿Cómo se puede resolver el problema de forma óptima?

-¿Cómo se puede resolver el problema de forma eficiente con grandes conjuntos de datos?

2.3.2. Objetivo General

Diseñar un procedimiento de solución eficiente para el problema integral de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de vehículos.

2.3.3. Objetivos Específicos

- Caracterizar el problema de la localización y el enrutamiento de vehículos con el fin de identificar los elementos claves que permitan diseñar un método de resolución eficiente.

- Diseñar un modelo de programación matemática para la localización y el enrutamiento de vehículos con el fin de encontrar la solución óptima para esos propósitos.

- Formular un modelo meta-heurístico que permita resolver de forma eficiente la localización y el enrutamiento de vehículos en centros de distribución urbanos para grandes conjuntos de datos.

Como se verá a lo largo del documento, estos objetivos específicos se abordan en diferentes etapas de la investigación desarrollada. En particular, el logro del primer objetivo (la caracterización del problema) se evidencia en la Subsección 2.5 de este capítulo. El logro de los otros dos objetivos específicos se evidencian, respectivamente, en los capítulos 3 y 4 de esta manuscrito.

2.4. Justificación y Delimitación del Estudio

Montoya-Torres et al. (2012) afirman que el concepto de UDC es relativamente nuevo y necesita más investigación intensiva en distintas áreas, tales como su función, tamaño, ubicación, administración, etc. Faure et al. (2013) comprueban que los sistemas cooperativos de distribución, que utilizan centros urbanos de distribución, son más eficientes que los sistemas tradicionales de transporte de carga. Nagy y Salhi (2007), por otro lado, sustentan que los métodos exactos son, a menudo, muy exitosos para casos especiales del LRP; mientras Jourda et al. (2009) afirman que el uso de metaheurísticas es preferible al momento de resolver problemas más cercanos a la realidad.

En particular, la literatura científica no ha estudiado, a excepción del trabajo de Montoya-Torres et al. (2012), el caso de problemas de logística urbana, donde se desea distribuir materias primas y mercancías a tiendas y comercios localizados en el centro histórico de una ciudad. El único trabajo disponible es el presentado por Montoya-Torres et al. (2012) donde se propone la aplicación de un procedimiento heurístico jerarquizado. Si bien este es el primer enfoque existente en la literatura, aún quedan abiertas más oportunidades para resolver el problema ya sea de manera integral y/o empleando métodos más eficientes de resolución (por ejemplo, algoritmos meta-heurísticos).

Teniendo en cuenta estas apreciaciones, realizar un modelo matemático y un método eficiente que permitan determinar la ubicación, tamaño y operación de centros urbanos de distribución, de acuerdo al tamaño y/o complejidad de los datos, podría servir como una herramienta importante para la toma de decisiones; que aplicada a los casos de la vida real, donde las ciudades estén dispuestas a crear estas terminales públicas de logística, puede mejorar la competitividad del sistema logístico y las condiciones ambientales y sociales previamente nombradas.

2.5. Revisión de la Literatura

2.5.1. Conceptualización de Localización-Ruteo

La conceptualización, paso a paso, del problema de Localización-Ruteo desde la perspectiva de Investigación de Operaciones se explica a continuación, indicando los diferentes enfoques planteados para resolver los distintos problemas a tratar: Localización, Dimensionamiento y Enrutamiento de Vehículos. La conceptualización del problema de localización-ruteo y el estudio de la literatura académica publicada permitirán dar respuesta al primer objetivo específico planteado para esta investigación.

2.5.1.1. Localización y Dimensionamiento: Problema p-Mediana

La localización de las instalaciones es un componente crítico en la planificación estratégica de una gran cantidad de empresas públicas y privadas (Owen y Daskin, 1998). Para esto, es necesario tener en cuenta muchos criterios tales como el costo o la distancia de los puntos de demanda. Se han hecho muchos modelos para ayudar a la toma de decisiones en este ámbito (Zanjirani et al. 2012). Uno de estos modelos es el p-Mediana. Con este enfoque, se determina la ubicación de la instalación mediante la asignación de clientes que minimicen la distancia total. Es decir, la localización y el dimensionamiento están interrelacionados para establecer la mejor solución. Kariv y Hakimi (1979) demostraron que el problema del p-mediana es NP-Complejo.

En el clásico problema del p-Mediana el objetivo es seleccionar las ubicaciones de las p instalaciones para servir a n clientes de manera que la suma de las distancias de las instalaciones a los clientes se reduce al mínimo (Fathali 2006). Por lo general, cada cliente v_i tiene un peso w_i asociado y problema busca que la suma ponderada sea mínima, como lo muestra la ecuación (1). Donde X es el conjunto de las instalaciones y $d(X, v_i)$ se define como la distancia más corta desde v a la instalación $x \in X$.

$$\min f(X) = \sum_{i=1}^n w_i * d(X, v_i) \quad (1)$$

2.5.1.2. Dimensionamiento: Problema de Transporte

El clásico problema de transporte busca minimizar el coste del abastecimiento a un conjunto m de puntos de demanda a partir de un conjunto n puntos de oferta, teniendo en cuenta los costos unitarios de transporte c_{ij} de cada punto de oferta i a cada punto de demanda j . Cada punto j tiene asociada una demanda d_j y cada punto i puede tener, o no, una oferta s_i asociada (Winston 2005). La función objetivo del problema se puede ver en la ecuación (2), donde x_{ij} representa el número de unidades enviadas desde el punto de oferta i al punto de demanda j .

Con este enfoque, al asignarle a cada instalación (puntos de oferta) los clientes a abastecer (puntos de demanda), se determina la dimensión o el tamaño de las instalaciones para satisfacer la demanda de los clientes.

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} * x_{ij} \quad (2)$$

2.5.1.3. Ruteo de Vehículos

El problema más básico en ruteo es el Problema del Agente Viajero TSP (por sus siglas en inglés, Traveling Salesman Problem). Este es uno de los problemas más estudiados en la investigación de operaciones y constituye la situación general y de partida para formular otros problemas de ruteo de vehículos. El objetivo es minimizar el costo de visitar todo el conjunto de n ciudades y regresar al punto de partida o ciudad de origen, teniendo en cuenta los gastos de viaje entre cada par de ellas (Ver Figura 3). En la versión estándar, los gastos de viaje son simétricos, es decir el costo de viajar de ciudad i a la ciudad j es igual al costo de viajar de j a i . Aunque el

planteamiento del problema es sencillo, el TSP es NP-complejo (Karp 1972) y muchos procedimientos exactos y heurísticos se han sugerido para resolverlo (Husban 1989).

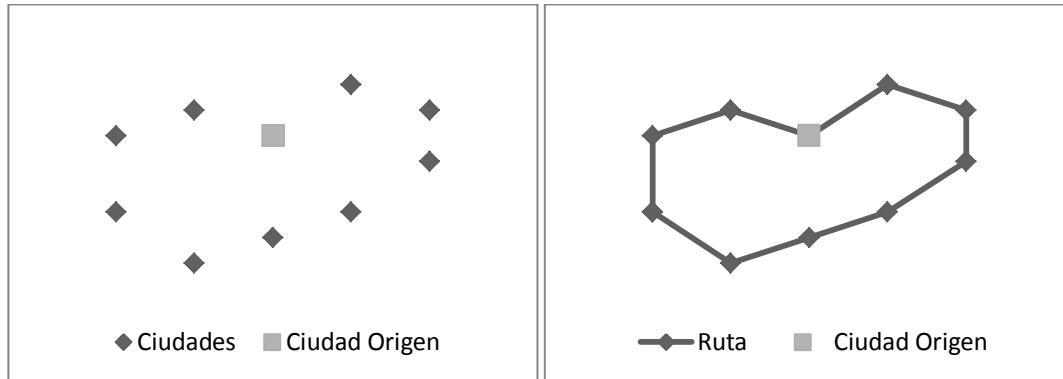


Figura 3. Representación Gráfica TSP. Fuente: Elaboración propia del autor.

Una de las restricciones más importantes para este problema, desde el punto de vista de la programación del algoritmo de solución, es la eliminación de los *subtours*. Miller, Tucker y Zemlin, (1960) determinaron una alternativa, fácil de programar, para evitar la formación de los *subtours* en el TSP (Ver ecuación 3). Esta alternativa, supone la incorporación de una cantidad polinómica de restricciones que depende del número n de clientes del problema y las variables de decisión $x_{ij} = 1$, si el vendedor viaja de la ciudad i a la ciudad j , y $x_{ij} = 0$ en caso contrario.

$$u_i - u_j + n * x_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

El problema del multi-Agente Viajero m -TSP (por sus siglas en inglés, multi-Traveling Salesman Problem), es presentado como una de las variaciones más interesantes y aplicables del TSP, donde hay m viajeros en la ciudad de origen y se debe visitar a todos los clientes exactamente una vez, minimizando la distancia total de las m rutas (Husban 1989). La Figura 4 muestra la representación gráfica del problema con $n=9$ y $m=2$. Los enfoques para solucionar el TSP han sido los métodos dominantes para la solución del m -TSP; ya que se ha demostrado que el m -TSP con n ciudades y m vendedores puede ser transformado a un solo TSP con $n + m - 1$ ciudades (Bellmore y Hong 1974).

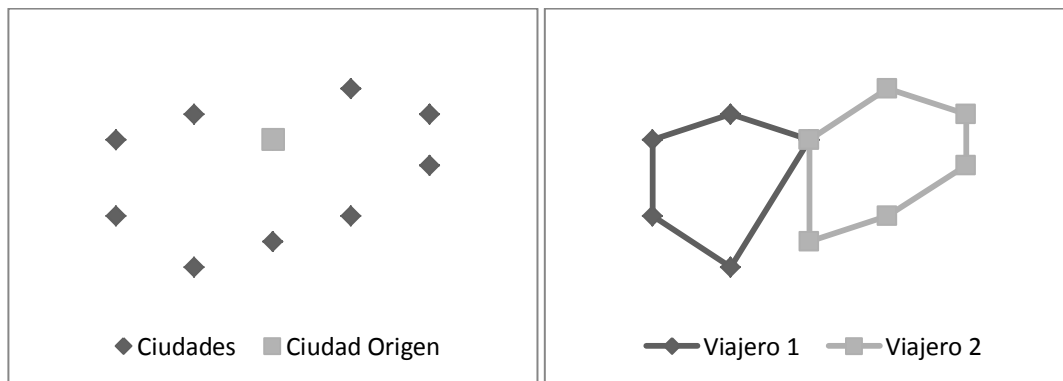


Figura 4. Representación Gráfica m-TSP. Fuente: Elaboración propia del autor.

El problema del multi-agente viajero se hace más complejo y cercano a la realidad, al agregar dos componentes adicionales: capacidad y demanda. En este momento los viajeros pasan a ser vehículos, la ciudad de origen se convierte en un depósito y las demás ciudades en clientes o consumidores. Este problema es conocido en la literatura como el problema de Ruteo de Vehículos VRP (por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem). Según lo anterior el objetivo del VRP es encontrar las rutas óptimas, de entrega o recogida, de un depósito a un número de ciudades o clientes, al tiempo que satisface algunas limitaciones de capacidad y demanda (ver Figura 5). El VRP es claramente NP-Complejo. Algunas de las aplicaciones más utilizadas del VRP son: recolección de basuras, camiones de reparto de gasolina, distribución de mercancías, quitanieves y entrega de correo (Liong et al. 2008). Barker (2003), por su parte, describe varios casos en que la aplicación de algoritmos para solucionar el VRP ha dado lugar a importantes ahorros en los costos asociados al transporte.

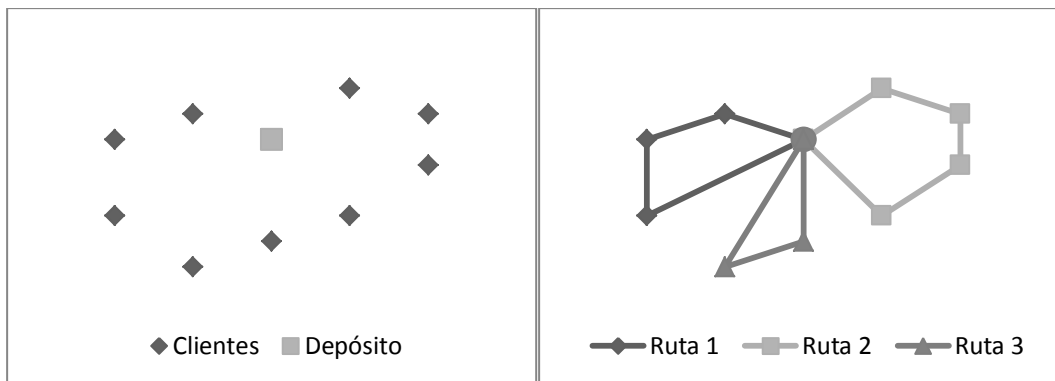


Figura 5. Representación Gráfica VRP. Fuente: Elaboración propia del autor.

Liong et al. (2008) afirman que se han escrito miles de artículos sobre varias variantes del VRP como: el Problema de Ruteo de Vehículos con ventanas de tiempo VRPTW (por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem with Time Windows); el Problema de Ruteo de Vehículos con recogida y entrega VRPPD (por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivery); y el Problema de Ruteo de Vehículos MDVRP (por sus siglas en inglés, Multi-Depot Vehicle Routing Problem). Todas estas variantes le agregan complejidad al problema teórico para hacerlo más semejante, y a su vez aplicable, a la realidad.

2.5.1.4. Dimensionamiento y Ruteo de Vehículos

El MDVRP es interesante para abordar los casos de la vida real donde se cuenta con un número de depósitos fijos superior a uno. Con este enfoque se resuelve simultáneamente los problemas de dimensionamiento y ruteo de vehículos; dado que asigna a cada depósito los clientes a abastecer, dimensionado cada instalación disponible, para luego realizar el ruteo de cada depósito con los clientes asignados al mismo.

En el MDVRP, se predeterminan el número y la ubicación de los depósitos. Cada depósito es lo suficientemente grande para almacenar todos los productos solicitados por los clientes. Al igual que en el VRP clásico, cada vehículo se inicia y termina en el mismo depósito. La ubicación y la demanda de cada cliente también se conocen de antemano y cada cliente es visitado por un vehículo

exactamente una vez (Surekha y Sumanthi 2011). La Figura 6 muestra un ejemplo de la MDVRP con 2 depósitos y 14 clientes.

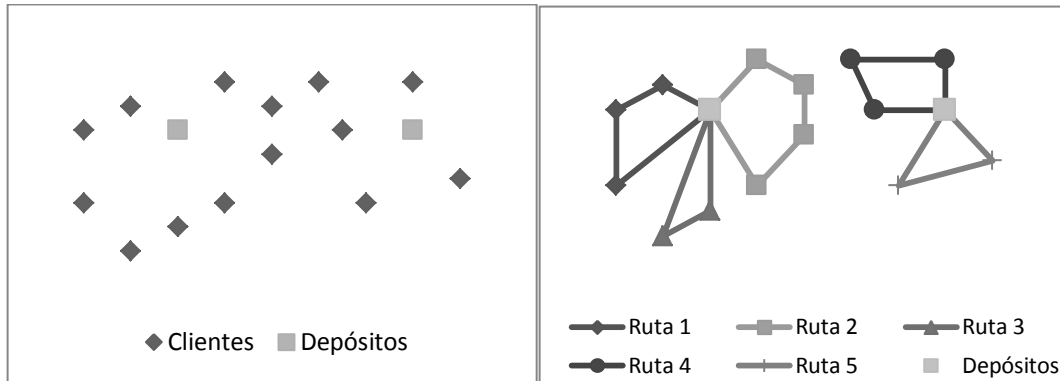


Figura 6. . Representación Gráfica MDVRP. Fuente: Elaboración propia del autor

2.5.1.5. Problema Localización-Ruteo

La ubicación, tamaño y operación de los centros urbanos de distribución se puede trabajar como un problema LRP. El Location Routing Problem maneja, de forma simultánea, la ubicación de las instalaciones y el ruteo de los vehículos asignados; permitiendo, como consecuencia, determinar la capacidad y/o tamaño de las instalaciones y, si se quiere, de los vehículos.

El problema puede enunciarse de la siguiente manera (ver Figura 7): Una empresa tiene que suministrar productos a sus clientes. El número, la ubicación, y la demanda de los clientes se conocen o se pueden estimar. La distribución a los clientes se da de una o más instalaciones, por ejemplo, fábricas, almacenes, centros de distribución, etc. (denominados depósitos), de tal manera que cada cliente se abastece desde, exactamente, un depósito. Las ubicaciones de los potenciales depósitos son conocidas, y el problema es determinar cuál de estas ubicaciones potenciales escoger, con el fin de minimizar los costos totales. Cada uno de los depósitos potenciales tiene una capacidad limitada y unos costos fijos relacionados. Hay un costo lineal asociado a las distancias. También, la capacidad y el número de los camiones son limitados.

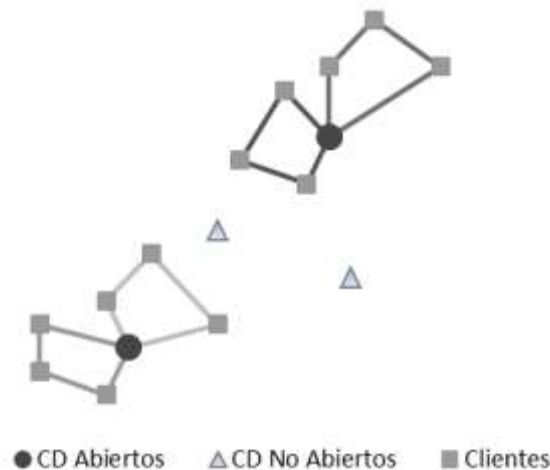


Figura 7. Representación Gráfica LRP. Fuente: Elaboración propia del autor.

El problema es, básicamente, encontrar el equilibrio entre los costos de los depósitos o centros de distribución y los costos de distribución, de acuerdo a las restricciones mencionadas.

2.5.2. Clasificación del LRP

En la literatura académica, la revisión bibliográfica elaborada por Nagy y Salhi (2005) sugiere la siguiente clasificación sobre los estudios hechos para el problema de LRP:

- a) *Según la función Objetivo.* El objetivo habitual de problemas de localización-ruteo es la minimización de los costos globales, donde los costos se pueden dividir en los costos de depósito (costos fijos) y los costos de las rutas de los vehículos. Hay sólo unos pocos trabajos donde prevalece un objetivo diferente o se consideran múltiples objetivos elaborados por Averbakh y Berman (1994, 1995, 2002), Averbakh et al. (1994) y Jamil et al. (1994).
- b) *Según el espacio de solución.* Éste puede ser discreto o continuo. La mayoría de las publicaciones sobre el LRP, manejan espacios de soluciones discretos.
- c) *Según el número de depósitos,* el problema puede ser de único depósito o de múltiples depósitos. La mayoría de los trabajos sobre el LRP manejan depósitos múltiples, excepto Laporte y Norbert (1981), Averbakh y Berman (1994, 2002), Simchi-Levi (1991) y Schwardt y Dethloff (2005), quienes se limitan a depósitos individuales. Sin embargo, algunos casos especiales se resuelven sólo para un depósito, tal como el Problema de Ubicación de Agente Viajero. Por otra parte, cuando se consideran los múltiples depósitos se supone, generalmente, que el número de depósitos no es un parámetro dado. Las excepciones a este supuesto son Branco y Coelho (1990).
- d) *Según el número y tipo de vehículos.* Para la mayoría de los problemas localización-ruteo, el número de vehículos no está fijado de antemano y se supone una flota homogénea. Sin embargo, la flota heterogénea es considerada por Bookbinder y Reece (1988), Salhi y Fraser (1996) y Wu et al. (2002) y Ambrosino y Scutellà (2005). Laporte y Nobert (1981) y Averbakh y Berman (2002) investigan problemas cuando el número de vehículos se da por adelantado. Además, Laporte et al. (1983) y Branco y Coelho (1990) miran el caso especial de exactamente un vehículo por cada depósito; el Problema de localización de Agente Viajero tiene esta misma estructura.
- e) *Según la estructura de la ruta.* La estructura habitual de rutas de los vehículos en un LRP es empezar en un depósito, y a partir de éste visitar una serie de nodos-cliente, entregar los productos en cada cliente visitado y, finalmente, volver al mismo almacén. Se pueden presentar sin embargo excepciones tales como vehículos que pueden realizar múltiples viajes (Lin et al. 2002) o las rutas de vehículos que pueden contener tanto las entregas como recogidas (Mosheiov 1995), entre otros.

2.5.3. Métodos Exactos

Los métodos exactos permiten definir y caracterizar los problemas e identificar los elementos importantes para su solución pero, debido a la complejidad del LRP, sólo pueden solucionar instancias relativamente pequeñas: instancias de 40 ubicaciones potenciales de los depósitos y 80 clientes, se han resuelto de forma óptima (Laporte et al., 1983, 1988).

Como apuntan Nagy y Salhi (2007), estos métodos generalmente se basan en modelos de programación matemática que, a menudo, incluyen la relajación y la reintroducción de restricciones durante la ejecución del algoritmo. Las restricciones que se manipulan son: (a) eliminación de

subtours (todos los recorridos deben contener un depósito, (b) bloqueo de cadena (no se permiten rutas entre depósitos) y (c) variables enteras. En este trabajo, el método exacto propuesto no utilizará esta metodología.

2.5.4. Métodos Heurísticos

Los métodos heurísticos, permiten calcular soluciones eficientes para problemas relativamente grandes y complejos. Por soluciones eficientes se entiende: soluciones muy buenas en tiempos computacionales relativamente cortos.

Nagy y Salhi (2007) clasifican las diferentes metodologías de los métodos heurísticos en: (a) Secuenciales, (b) Basado en Agrupación, (c) Iterativos y (d) Jerárquicos.

Los métodos secuenciales solucionan, primero, el problema de localización y luego el problema de ruteo. El concepto de solución secuencial no permite la retroalimentación entre ambas fases. Srivastava y Benton (1990) anotan que estos métodos pueden arrojar resultados y/o soluciones de buena calidad que pueden servir como benchmark de otras heurísticas.

Los métodos basados en agrupación comienzan dividiendo los clientes en grupos para luego seleccionar una instalación y asignarla a cada conjunto de clientes finalizando el ruteo a través de la solución de un VRP. Para esta investigación es de interés los modelos heurísticos de: Branco y Coelho (1990), en donde un número exacto de instalaciones debe ser ubicado; y los de Srivastava y Benton (1990) y Srivastava (1993) que consideran, sucesivamente, de uno a “n” números de depósitos o instalaciones a abrir.

Los métodos iterativos, como su nombre lo indica, manejan iterativamente las fases de localización y ruteo; descomponiendo el problema en dos sub-problemas y utilizando, en repetidas ocasiones, la solución de una fase para alimentar la otra hasta encontrar la mejor solución.

Los métodos jerárquicos tienen una definición diferente a la usada por Montoya-Torres et al. (2012). La definición de Nagy y Salhi (2007), consiste en la priorización del problema de localización sobre el problema de ruteo; donde el algoritmo principal se dedica a resolver el problema de localización y remite, en cada paso, a una subrutina que resuelve el problema de ruteo. En el presente trabajo no se usara la definición de jerárquico de Nagy y Salhi (2007) sino la de Montoya-Torres et al. (2012).

2.5.5. Aplicaciones y Soluciones del LRP

En la Tabla 1 se resumen los diferentes artículos del LRP aplicados a casos reales; señalando el área específica y el lugar de aplicación, así como el número de instalaciones a ubicar y el número de clientes de la red.

Tabla 1. Aplicaciones del LRP en Casos Reales. Adaptado de: Nagy y Salhi (2005)

| Paper | Método | Area de Aplicación | Lugar | Instalaciones | Clientes |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------------|--------------|----------------------|-----------------|
| Watson-Gandy and Dohrn (1973) | Heurístico | Distribución de comida | Reino Unido | 40 | 300 |
| Bednar and Strohmeier (1979) | Heurístico | Distribución de bienes de Consumo | Austria | 3 | 50 |
| Or and Pierskalla (1979) | Heurístico | Ubicación Banco de Sangre | EE.UU | 3 | 117 |
| Nambiar et al. (1981) | Heurístico | Ubicación planta de caucho | Malasia | 15 | 300 |
| Perl and Daskin (1984, 1985) | Heurístico | Distribución de bienes | EE.UU | 4 | 318 |
| Nambiar et al. (1989) | Heurístico | Ubicación planta de caucho | Malasia | 10 | 47 |
| Chan et al. (2001) | Heurístico | Evacuación médica | EE.UU | 9 | 52 |
| Lin et al. (2002) | Heurístico | Entrega de facturas | Hong Kong | 4 | 27 |
| Lee et al. (2003) | Exacto | Diseño de Red Óptica | Korea | 50 | 50 |
| Billionnet et al. (2005) | Exacto | Diseño de red de telecomunicaciones | Francia | 6 | 70 |

2.6. Conclusiones del capítulo

La implementación de centros urbanos de distribución permite la formación de un sistema de logística urbana mucho más eficiente, con las mismas o mejores capacidades de servicio que los sistemas convencionales y con un menor impacto ambiental.

Aplicar un modelo matemático o un método eficiente que permitan determinar la ubicación, tamaño y operación de centros urbanos de distribución, de acuerdo al tamaño y/o complejidad de los datos, podría servir como una herramienta importante para la toma de decisiones y mejorar la competitividad del sistema logístico y las condiciones ambientales y sociales de las ciudades donde se aplique.

Capítulo 3. Modelamiento Matemático[†]

La formalización del problema de localización, dimensionamiento y operación de UDC empleando programación matemática busca contribuir a la comprensión y resolución del problema de forma integral. Para el diseño del modelo se tuvo en cuenta las diferentes restricciones encontradas, en el proceso de investigación, para la resolución del VRP, como son; el número de clientes y su demanda y el número de vehículos disponibles y su capacidad. Después se añadieron, las variables de decisión y las restricciones, para determinar la ubicación de los UDC's, de forma integral, con el ruteo de los vehículos. Es decir, se partió de un modelo para solucionar el VRP sencillo, para luego desarrollar el modelo de solución integral para el LRP.

Para realizar el modelo matemático es necesario, en primer lugar, definir los parámetros o datos de entrada del mismo. Estos datos contienen la información y las características principales del problema, para su posterior solución. Los datos que asume el modelo son los siguientes:

- Número de clientes y de centros urbanos, así como su ubicación y las respectivas distancias o costos entre cada uno.
- Número de centros de distribución a utilizar / abrir.
- Número de vehículos a utilizar, así como su respectiva capacidad.
- Demanda de cada cliente.

Con estos parámetros definidos, se fija la función objetivo y las restricciones del modelo. La función objetivo se puede resumir en: minimizar el costo de suplir la demanda de cada cliente, determinando la ubicación, el tamaño y la operación de cada centro urbano de distribución.

A continuación se presentan el modelo empleado y su validación en detalle.

3.1. Formulación del modelo de programación lineal entera mixta

El modelo desarrollado para esta investigación tiene las siguientes características:

- Su función objetivo busca minimizar el total de los costos de depósito (costos fijos) y los costos de las rutas de los vehículos. Para el conjunto de datos que se empleará en el estudio experimental, el cual está basado en el caso puntual de la ciudad de Saint-Étienne, no se tiene en cuenta los costos fijos de los depósitos. Esto debido a que es una decisión política la instalación de un UDC, por lo cual los entes gubernamentales de la ciudad consideran que el costo fijo de la instalación no es relevante para tomar la decisión.
- El espacio de solución es discreto, manejando datos discretos tanto en la entrada como en la salida.
- El número de depósitos puede ser único o múltiple, de acuerdo a las necesidades del problema. Se puede determinar el número de depósitos como dato inicial o el modelo puede determinar el número óptimo de depósitos de acuerdo a las restricciones pertinentes. Para el caso puntual de la ciudad de Saint-Étienne se maneja un solo depósito.
- La cantidad de vehículos se puede dar como parámetro inicial, o se le puede pedir al modelo que calcule el número óptimo de rutas.

[†] El contenido de este capítulo fue sometido para publicación a la revista Ingeniería y Universidad: Muñoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J.R., Herazo-Padilla, N.S. (2013). "Modelación y resolución del problema de localización-ruteo en logística urbana". *Ingeniería y Universidad*. Actualmente en proceso de evaluación.

- Se puede restringir o no el número de rutas por vehículo y/o por depósito.
- La capacidad de los vehículos puede ser homogénea o heterogénea.
- Los nodos de los clientes deben ser visitados una sola vez y los vehículos regresan al centro de distribución del que salieron. Para el caso general del problema con múltiples depósitos, este supuesto permite mantener siempre la misma capacidad de servicio de cada uno de los depósitos; se debe observar sin embargo que este supuesto podría reevaluarse en la medida en que se desee considerar demanda variable a lo largo del tiempo y sea entonces necesario recalcular la capacidad de servicio (número de vehículos) en cada depósito, haciendo que los vehículos no necesariamente regresen a su depósito de origen.

A continuación se presenta en detalle el modelo matemático empleado para solucionar de forma óptima el problema de localización y operación de centros urbanos de distribución.

Conjuntos principales

$I = \text{Centros Urbanos de Distribucion UDC } \{1, 2, \dots, i\}$

$J = \text{Clientes } \{1, 2, \dots, j\}$

$K = \text{Vehículos } \{1, 2, \dots, k\}$

Conjuntos auxiliares

$H = \text{alias de } J$

$F = \text{alias de } J$

$L = \text{alias de } K$

Variables de decisión

$$A_i = \begin{cases} 1 & \text{Si abro UDC } i \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases}$$

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si voy de UDC } i \text{ a cliente } j \text{ en vehículo } k \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases}$$

$$Y_{jtk} = \begin{cases} 1 & \text{Si voy de cliente } j \text{ a UDC } i \text{ en vehículo } k \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases}$$

$$B_{jhk} = \begin{cases} 1 & \text{Si voy de cliente } j \text{ a cliente } h \text{ en vehículo } k \\ 0 & \text{d.l.c.} \end{cases}$$

$u_j = \text{números reales arbitrarios}$

Parámetros

$C1_{ij} = \text{Matriz de distancias (costos) de ir del UDC } i \text{ al cliente } j$

$C2_{ji} = \text{Matriz de distancias (costos) de ir del cliente } j \text{ al UDC } i$

$C3_{jh} = \text{Matriz de distancias (costos) de ir del cliente } j \text{ al cliente } h$

$C = \text{Número de UDC a abrir}$

$V = \text{Número de vehículos disponibles}$

$D_j = \text{Demanda de cada cliente en el punto } j$

$CAP_k = \text{Capacidad del vehículo } k$

$N = \text{número total de clientes}$

Función objetivo

La ecuación (4) expresa la función objetivo. Como se dijo anteriormente, ésta busca minimizar el costo o la distancia total de suplir la demanda de todos los clientes, de acuerdo con la ubicación de los centros urbanos de distribución.

$$MIN Z = \sum_i \sum_j \sum_k C1_{ij} * X_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k C2_{ji} * Y_{jik} + \sum_i \sum_j \sum_k C3_{jh} * B_{jkh} \quad (4)$$

Restricciones

A continuación se relacionan las diferentes restricciones del modelo identificadas durante el proceso de investigación. En la ecuación (5) se especifica el número máximo de UDC a abrir o localizar. Cabe aclarar que para el caso específico de la ciudad de Saint-Étienne se determinó la ubicación de un UDC, es decir $C=1$. La ecuación (6) garantiza que solo se puedan hacer rutas desde un UDC abierto. Con la ecuación (7) se calcula el mínimo número de rutas y/o de vehículos necesarios para satisfacer la demanda total. Si se quiere, se puede determinar el número de vehículos a utilizar como un valor fijo, cambiando la parte derecha de la inecuación por un valor deseado. La ecuación (8) relaciona dos variables binarias garantizando que si se visita a un cliente desde un UDC, necesariamente, debe ir hacia otro cliente, partiendo desde el mismo cliente visitado y en el mismo vehículo. Ésta es la restricción que inicializa la ruta y relaciona el primer cliente visitado con la secuencia de clientes que se pueden y deben visitar. Con la ecuación (9) se establece la secuenciación de toda la ruta para todos los clientes, estableciendo que si se visita un cliente, se debe salir hacia otro cliente o regresar al UDC en el mismo vehículo que se está haciendo la ruta. La ecuación (10) asegura que todos los clientes sean visitados exactamente una sola vez, desde un cliente o desde un UDC. La ecuación (11) garantiza que después de visitado un cliente, se vaya a otro cliente o a un UDC. La ecuación (12) obliga que las rutas de todos los vehículos inicien y terminen en el mismo UDC. La restricción de capacidad de cada vehículo está establecida en la ecuación (13), acotando la longitud de la ruta. La ecuación (14) limita a máximo una ruta por vehículo. Las ecuaciones (15) y (16) aseguran que el tamaño de cada ruta sea similar. Estas restricciones no son obligatorias, y se pueden omitir por diversos factores; tal como la heterogeneidad de la capacidad de los vehículos o si se desea que el modelo calcule el tamaño óptimo de cada ruta. Por último, la ecuación (17) es la restricción que elimina los subtours dentro de la solución del modelo. La ecuación (17) se basa en la ecuación (3) de Miller, Tucker y Zemlin, (1960) para el TSP, la cual se aplica a cada vehículo k del problema.

$$\sum_i A_i \leq C \quad (5)$$

$$V * A_i \geq \sum_j \sum_k X_{ijk} \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} \geq \frac{\sum_j D_j}{CAP_k} \quad (7)$$

$$\sum_i X_{ijk} \leq \sum_h B_{jhk} \quad \forall j, \forall k \quad (8)$$

$$\sum_i X_{ijk} + \sum_h B_{hjk} = \sum_i Y_{jik} + \sum_f B_{jfk} \quad \forall j, \forall k \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_k X_{ihk} + \sum_j \sum_k B_{jhk} = 1 \quad \forall h \quad (10)$$

$$\sum_h \sum_k B_{jhk} + \sum_i \sum_k Y_{jik} = 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_j X_{ijk} = \sum_h Y_{hik} \quad \forall i, \forall k \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} * D_j + \sum_j \sum_h B_{hjk} * D_j \leq CAP_k \quad \forall k \quad (13)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_h B_{jhk} \leq \left(\sum_j \sum_h B_{jhl} \right) + 1 \quad \forall k, \forall l \quad (15)$$

$$\sum_j \sum_h B_{jhk} \leq \left(\sum_j \sum_h B_{jhl} \right) - 1 \quad \forall k, \forall l \quad (16)$$

$$u_j - u_h + N * B_{jhk} \leq N - 1 \quad \forall j, \forall h, \forall k \quad (17)$$

3.2. Experimentos y análisis de resultados

Los experimentos desarrollados para validar el modelo de programación matemática propuesto fueron desarrollados empleando el lenguaje GAMS (General Algebraic Modeling System) utilizando el solver CPLEX y las pruebas fueron realizadas en un computador con procesador Intel® Core i5 y 4GB de memoria RAM. El desarrollo del modelo se llevó a cabo en dos fases. En la primera fase se realizó una comparación entre el modelo propuesto con el enfoque de Montoya-Torres et al. (2012). Es necesario recordar que el modelo propuesto integra la localización y el ruteo de vehículos para determinar de forma exacta (óptima) la ubicación, el tamaño y operación de los UDC's; mientras que el enfoque jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012) establece de forma progresiva la ubicación (decisión estratégica), luego el tamaño (decisión táctica) y por último el ruteo de los vehículos en los UDC's (decisión operacional). En la segunda fase del experimento se hacen ciertas modificaciones al modelo, como son aumentar el número de posibles ubicaciones de los UDC's y el número de clientes, para medir la calidad de las soluciones encontradas. Para ambos casos, se utilizaron datos reales sobre distancias, número y ubicación de tiendas y locales comerciales del centro histórico de la ciudad de Saint-Étienne, Francia, en donde existe un total de 1227 puntos (tiendas o comercios) pertenecientes a la zona central de la ciudad (Montoya-Torres et al. 2012).

3.2.1. Resultados de la primera fase

El enfoque jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012) propone la localización de un UDC en el centro de la ciudad a partir de 20 posibles localizaciones. Además, considera únicamente 20 clientes. Tanto las 20 posibles ubicaciones como los 20 clientes se escogieron de forma aleatoria del total de los 1227 puntos (clientes y/o comercios) pertenecientes a la zona central de la ciudad (Ver Anexo 1). Estos 20 clientes y los comercios restantes se representan en la Figura 8, junto con los lugares más importantes de la ciudad, en un eje de coordenadas XY.

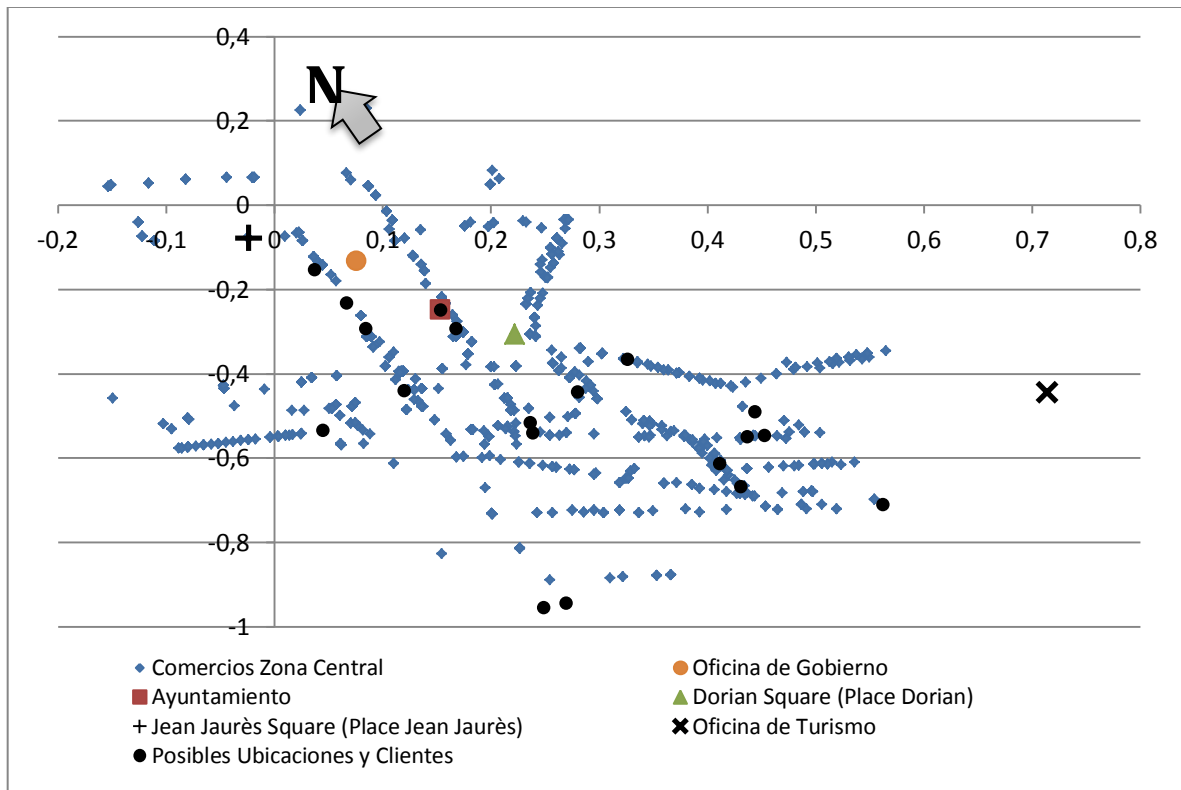


Figura 8. Distribución de los 20 clientes seleccionados, los comercios y sitios importantes de la ciudad de Saint-Étienne. Fuente: Montoya-Torres et al. (2012)

Es importante recordar que el enfoque jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012) utilizó el algoritmo del vecino más cercano con una, dos y tres rutas para obtener una solución a nivel operativo. Por lo anterior, se aplicó el modelo propuesto al ruteo de vehículos del enfoque de Montoya-Torres et al. (2012) para determinar el óptimo del enfoque jerárquico y comparar posteriormente las mejores soluciones para los dos enfoques: jerárquico e integral.

Los resultados de la comparación del modelo propuesto para la localización de UDC y el ruteo de vehículos se muestran cuantitativamente en la Tabla 2 y gráficamente en la Figura 9. Inicialmente se hace una comparación entre el enfoque jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012) cuando el ruteo de vehículos se hace o bien empleando la heurística de vecino más cercano o bien empleando un método exacto (e.g., un modelo de programación entera mixta MILP).

Con el método exacto, el cual logra obtener la solución óptima para el ruteo del método jerárquico, se observa una mejora de hasta el 10,25% en el costo de hacer el ruteo de vehículos. A partir de estos resultados se puede plantear la hipótesis inicial que consiste en afirmar que aplicar el

modelo propuesto para resolver de forma integral el problema de ubicación y ruteo puede generar aún mejores resultados que simplemente optimizando la fase final del problema (ruteo).

Tabla 2. Comparación de resultados del modelo jerárquico con el modelo óptimo propuesto

| N° de Rutas | Valor de la función objetivo | | | Modelo jerárquico (ruteo MILP) versus Modelo propuesto | |
|-------------|------------------------------|------------|------------------|--|-----------------|
| | Modelo Jerárquico | | Modelo propuesto | Mejora absoluta | Mejora relativa |
| | Ruteo heurístico | Ruteo MILP | | | |
| 1 | \$ 3.004 | \$ 2.696 | \$ 2.696 | \$ 0 | 0,00% |
| 2 | \$ 4.016 | \$ 3.639 | \$ 2.834 | \$ 805 | 22,127% |
| 3 | \$ 4.696 | \$ 4.675 | \$ 3.246 | \$ 1.429 | 30,57% |

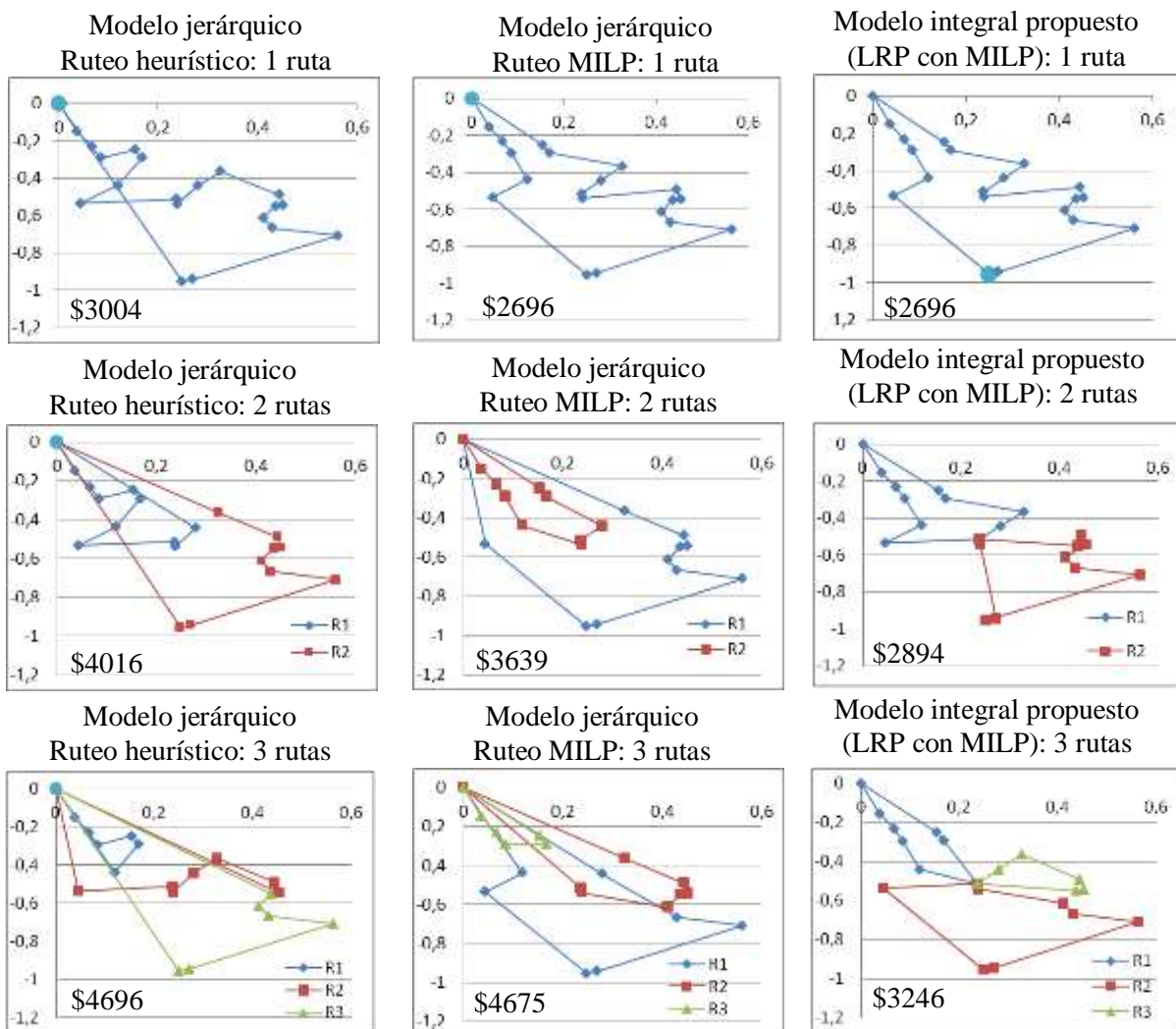


Figura 9. Comparación entre los enfoques óptimo y jerárquico para 20 clientes. Fuente: Muñoz-Villamizar (2013b).

La Figura 9 también muestra las rutas obtenidas aplicando el modelo propuesto en este artículo, basado en la solución óptima del problema de localización-ruteo (LRP). Se observa que las soluciones, desarrollando el problema integral para dos y tres rutas, son mejores que la solución del

modelo jerárquico, y ubican el UDC en una posición central con respecto al resto de clientes. La solución del modelo integral es un 22,12% mejor que la del solución del modelo jerárquico para dos rutas; y un 30,57% para tres rutas, tal como se muestra en la Tabla 2.

3.2.2. Resultados de la segunda fase

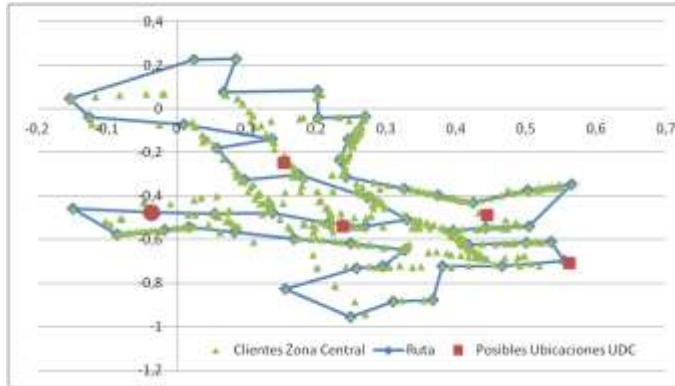
La segunda fase del experimento computacional sobre el modelo propuesto consistió en realizar distintas pruebas de desempeño con varios conjuntos de datos tomados de la situación de la ciudad de Saint-Étienne, Francia. En particular, se analizaron las situaciones de tener 5 posibles localizaciones del centro urbano de distribución (Ver Tabla 13 en Anexo 2) y 50 ó 100 (Ver respectivamente Tablas 10 y 11 en Anexo 1) clientes. Con estos experimentos se buscaba probar la capacidad del modelo para brindar una solución factible y real aumentando el número de clientes a 50 y reduciendo las posibles ubicaciones del UDC. De hecho, dadas las características del problema en la realidad, es muy posible que los tomadores de decisiones (autoridades públicas) tengan un reducido y preseleccionado número de posibles ubicaciones de los UDC's (por ejemplo, antiguos edificios abandonados). Los puntos de posibles ubicaciones de los UDC son así pues diferentes de los puntos donde se encuentran los clientes. Para estos dos escenarios, la selección de los 50 o 100 clientes (del total de 1227 puntos en la ciudad) buscó cubrir el 100% del perímetro de la zona central y de todas las rutas principales. De esta forma se garantiza que la solución del modelo sea más cercana a la realidad.

Los resultados obtenidos para una y dos rutas muestran nuevamente la preponderancia de realizar el recorrido con una sola ruta puesto que se tiene un sobrecosto cuando se usan dos rutas equivalente al 0,99% (ver Tabla 3) con respecto al costo de usar una sola ruta. Para el caso de tres rutas, el modelo obtiene una solución sub-óptima y aunque es “factible”, se evidencia la ineficiencia para resolver problemas de esta magnitud. La diferencia entre la mejor solución posible (cota inferior) y el resultado obtenido corresponde a 20,24% (ver Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del modelo integral con 5 posibles ubicaciones para UDC y 50 clientes

| Nº de Rutas | Solución con el modelo propuesto | ¿Es óptimo? | Valor cota inferior | Diferencia absoluta | Diferencia relativa |
|-------------|----------------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | \$ 4.955 | Sí | N.A. | NA. | NA. |
| 2 | \$ 5.004 | Sí | N.A. | NA. | NA. |
| 3 | \$ 6.264 | No | \$ 4.996,13 | \$ 1.267,87 | 20,24% |

Con base en estos resultados, la Figura 10 muestra la distribución de los 50 clientes preseleccionados para el experimento y la ruta óptima de servicio. Así mismo, se observa la distribución del total de tiendas y puntos comerciales de la ciudad, mostrando que la solución obtenida permite cubrir aproximadamente el 80% del total de los 1227 clientes. La Figura 10 también muestra la ruta resultante cuando se tiene los mismos 5 puntos potenciales para localizar el UDC y 100 clientes. Con este número de clientes el resultado dado por el modelo deja de ser óptimo. La solución, para esta instancia del problema tiene una diferencia con la cota inferior del algoritmo de solución del solver del 7,05% (el valor de la de solución es 6.318,00; mientras que la cota inferior tiene un valor de 5.872,55). Aunque es una solución “factible”, gráficamente (ver Figura 10) se puede apreciar que no es la mejor solución.



Localización del UDC y mejor ruta de distribución aplicando el modelo integral propuesto con 50 clientes y 5 posibles localizaciones para el UDC

Localización del UDC y ruta de distribución encontrada (sub-óptima) aplicando el modelo integral propuesto con 100 clientes y 5 posibles localizaciones para el UDC

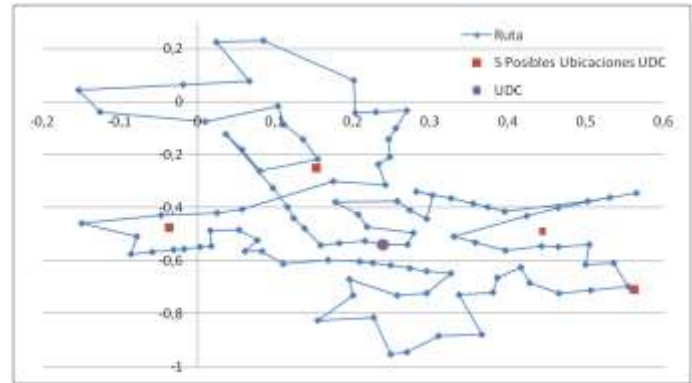


Figura 10. Soluciones de las instancias con 50 y 100 clientes. Fuente: Muñoz-Villamizar (2013b)

3.3. Conclusiones sobre el modelo matemático

A manera de conclusión de este primer experimento con un número relativamente pequeño de clientes (20 clientes y 20 posibles ubicaciones para el UDC), se puede decir que el desempeño del modelo integral propuesto es excelente con respecto al valor de la función objetivo, logrando los resultados en tiempos de cálculo cortos: aproximadamente un minuto.

Se puede afirmar que resolver el problema de forma integral es mejor que resolverlo secuencialmente. Además, se comprueba, en parte, la flexibilidad del modelo propuesto dado que permite resolver el problema de ruteo de vehículos (VRP) para las instancias mencionadas.

El número de rutas y/o de vehículos es un factor clave del problema, y los resultados parecen indicar que entre más rutas, mayor es el costo de satisfacer la demanda de los clientes. Por lo anterior es recomendable adquirir los vehículos de mayor capacidad para garantizar el menor número de rutas posibles.

Capítulo 4. Procedimiento Heurístico[‡]

4.1. Introducción

Dado que el LRP es un problema NP-duro, la resolución a través de modelos matemáticos y otros métodos exactos es eficiente (en términos de tiempo de cálculo) únicamente para casos y/o instancias de tamaño pequeño o mediano. Para casos y/o instancias de gran tamaño, más cercanos a la realidad, se ha preferido el uso de procedimientos heurísticos (Jourdan et al., 2009). Por lo tanto, el uso de algoritmos aproximados es la alternativa principal para resolver esta clase de problemas (NP-duros).

El procedimiento heurístico propuesto utiliza un *método iterativo*, es decir, maneja iterativamente las fases de localización y ruteo; descomponiendo el problema en dos sub-problemas y utilizando, en repetidas ocasiones, la solución de una fase para alimentar la otra hasta encontrar la mejor solución. Este procedimiento emplea la lógica detrás del algoritmo propuesto por Juan et al. (2012) para resolver el MDVRP. El procedimiento propuesto por Juan et al. (2009) se ha aplicado a una gran variedad de problemas de optimización (e.g. Flowshop, Flowshop estocástico, VRP, CVRP, entre otros) reduciendo y explorando de forma eficiente el espacio de solución de los mismos.

Por último, vale la pena indicar que este procedimiento heurístico se diseñó durante la realización de una pasantía internacional en el Interdisciplinary Internet Institute (IN3) de la Universidad Abierta de Cataluña, Barcelona, España; con el objetivo de ampliar la variedad de problemas resueltos bajo el enfoque de Juan et al. (2009, 2010, 2011 y 2012).

4.1. Conceptos del Enfoque Propuesto

El enfoque propuesto combina las heurísticas: Aleatorización Sesgada, Búsqueda Local Iterada y Clarke and Wright's Savings y además utiliza el concepto de centro de masa para la localización del depósito. A continuación se explican los componentes del método utilizado.

4.1.1. Aleatorización Sesgada

Según Juan et al (2012), en términos generales, la aleatorización sesgada, es el conjunto de técnicas (e.g., Simulación Montecarlo) que hacen uso de números aleatorios y distribuciones asimétricas de probabilidad para resolver ciertos problemas estocástico-deterministas. Juan et al (2012) afirman que cuando se combina adecuadamente con técnicas heurísticas, la aleatorización sesgada, ha demostrado ser extremadamente útil para resolver problemas estocásticos de ruteo para vehículos. Así mismo, enfoques que combinan la aleatorización sesgada con heurísticas, se pueden utilizar para resolver eficientemente problemas de enrutamiento determinísticos, tales como el LRP.

El concepto de aleatorización sesgada puede definirse de la siguiente manera: dada una lista ordenada de elementos, según un criterio específico (e.g. menor distancia hacia un depósito), normalmente se escogería el primer elemento, que corresponde al que tiene mayor beneficio. La

[‡]El contenido de este capítulo fue aceptado para publicación en Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Muñoz-Villamizar A., Montoya-Torres J.R., Juan A.A., Cáceres-Cruz J. (2013). "A simulation-based algorithm for the integrated location and routing problem in urban logistics". In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, M. E. Kuhl (Eds). December 8-11, 2013, Washington D.C., U.S.A.

aleatorización sesgada, por otra parte, asigna una probabilidad de selección a cada uno de los elementos de la misma lista de acuerdo con el criterio de clasificación previamente definido. De esta forma, el elemento en una posición más alta de la lista tendrá la mayor posibilidad de ser el elemento seleccionado en la iteración actual.

Es importante aclarar que el proceso de selección (con aleatorización sesgada) se debe hacer sin introducir demasiados parámetros en el algoritmo. De lo contrario, sería necesario realizar procesos de ajuste o *fine-tuning*, que tienden a ser complejos y requieren mucho tiempo. De esta forma Juan et al. (2009, 2010, 2011 y 2012) han identificado la distribución geométrica, que sólo tiene un parámetro α siendo $0 < \alpha < 1$, como la mejor distribución para realizar la aleatorización sesgada.

La Figura 11 muestra una comparación de dos funciones de probabilidad (PD) y dos funciones de probabilidad acumulada (CDF) relacionados con dos distribuciones geométricas con diferentes valores de α . Se puede ver que el uso de valores relativamente bajos de este parámetro (por ejemplo: $\alpha = 0,10$) implica que más elementos de la lista ordenada son potencialmente elegibles, es decir: la función de distribución acumulada correspondiente tiene una relativamente baja tasa de crecimiento. Por el contrario, el uso de valores relativamente altos para este parámetro (por ejemplo: $\alpha = 0,40$) conlleva a que sólo unos pocos elementos de la lista ordenada sean potencialmente elegibles, es decir: la función de distribución acumulada correspondiente tiene una relativamente alta tasa de crecimiento.

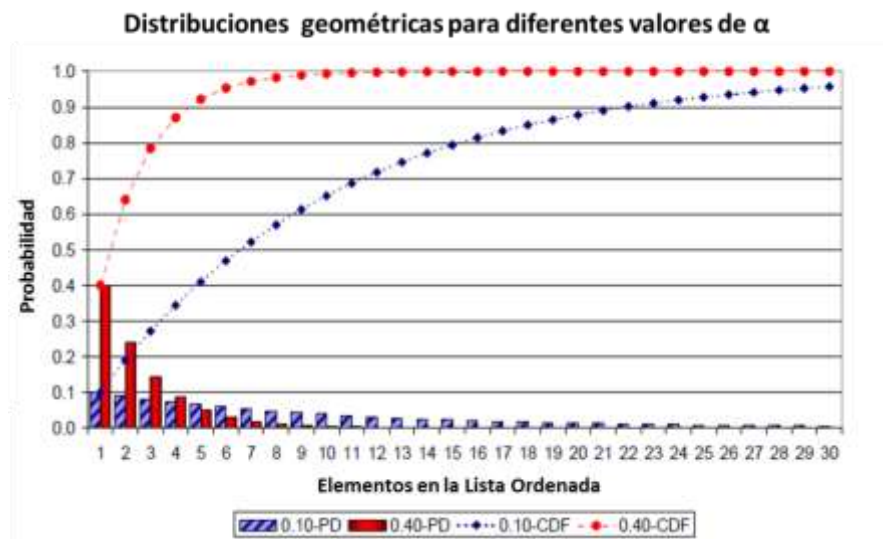


Figura 11. Distribuciones geométricas para diferentes valores de alfa. Adaptado: Juan et al (2009, 2012)

4.1.2. Búsqueda Local Iterada

La Búsqueda Local Iterada (ILS, Iterated Local Search) es una metaheurística que consiste en rastrear la solución a un problema combinatorio dentro del subespacio definido por los óptimos relativos, Lourenço et al. (2003).

La estrategia ILS actúa de la siguiente forma: dada una solución obtenida por la aplicación de una heurística base, se aplica un cambio o alteración que da lugar a una solución intermedia. La aplicación de la heurística base a esta solución aporta una nueva solución que, si supera un test de aceptación, pasa a ser la nueva solución alterada.

4.1.3. Clarke and Wright's Savings (CWS)

Clarke and Wright's Savings (CWS) es un algoritmo constructivo de rutas que usa el concepto de ahorros y es probablemente la heurística más citada para resolver el CVRP (Juan et al. 2010). La heurística consiste, básicamente, en combinar las rutas existentes en la medida que al pasar a ser una sola ruta se producen ahorros de costos (Vázquez, 2007). En cada paso de la construcción de la solución se combinan las rutas que, generando más ahorros, dan origen a una nueva solución factible que mejora la solución previa. Por lo general el algoritmo de CWS proporciona buenas soluciones, especialmente para los problemas pequeños y de tamaño medio, pero también presenta dificultades en algunos casos (Gaskell 2006). Muchas variantes y mejoras del CWS se han propuesto en la literatura (Juan et al. 2010), como el que se propone en este trabajo, para poderse aplicar a problemas grandes, de mayor complejidad y por ende más cercanos a la realidad.

Cuando se utiliza la aleatorización sesgada en esta heurística, ya no se combinan las rutas que generan más ahorro sino las que aleatoriamente y de acuerdo con la distribución de probabilidad (previamente definida) sean escogidas.

4.1.4. Centro de Masa

El Centro de masa es un concepto de la física que se puede definir como el punto en el cual se encuentra concentrada toda la masa de un objeto o de un sistema y usualmente hace referencia a cuerpos que constan de dos dimensiones. En un problema de ruteo, podemos considerar que el sistema u objeto es el conjunto de clientes y la masa, las demandas de los mismos.

De esta forma, dadas todas las coordenadas (x_i, y_i) de los clientes i y sus respectivas demandas d_i , podemos aplicar las fórmulas (17) y (18) para hallar el punto teórico (X, Y) donde está concentrada la demanda total del sistema.

$$X = \frac{\sum_1^i x_i * d_i}{\sum_1^i d_i} \quad (17)$$

$$Y = \frac{\sum_1^i y_i * d_i}{\sum_1^i d_i} \quad (18)$$

4.2. Enfoque Propuesto

Como se ha venido explicando, el LRP es un problema NP-duro que integra tres sub-problemas: (a) la ubicación de los depósitos; (b) la asignación o el dimensionamiento de los clientes a los respectivos depósitos; y (c) el ruteo de vehículos. Para resolver al mismo tiempo estos sub-problemas el método propuesto utiliza una estrategia de dos etapas siguiendo el principio “divide y vencerás” (*divide and conquer*). La primera etapa soluciona el problema (a) de ubicación y, la segunda, resuelve de forma integral los problemas (b) y (c): asignación o dimensionamiento y ruteo de vehículos. Los detalles de cada una de las dos partes del enfoque se describen a continuación. Todo el proceso se muestra en la Figura 12. Es importante recordar que se hace necesario realizar un procedimiento heurístico que permita resolver el problema, para instancias grandes, de forma eficiente, con soluciones cercanas al óptimo y en tiempos de cómputo razonables.

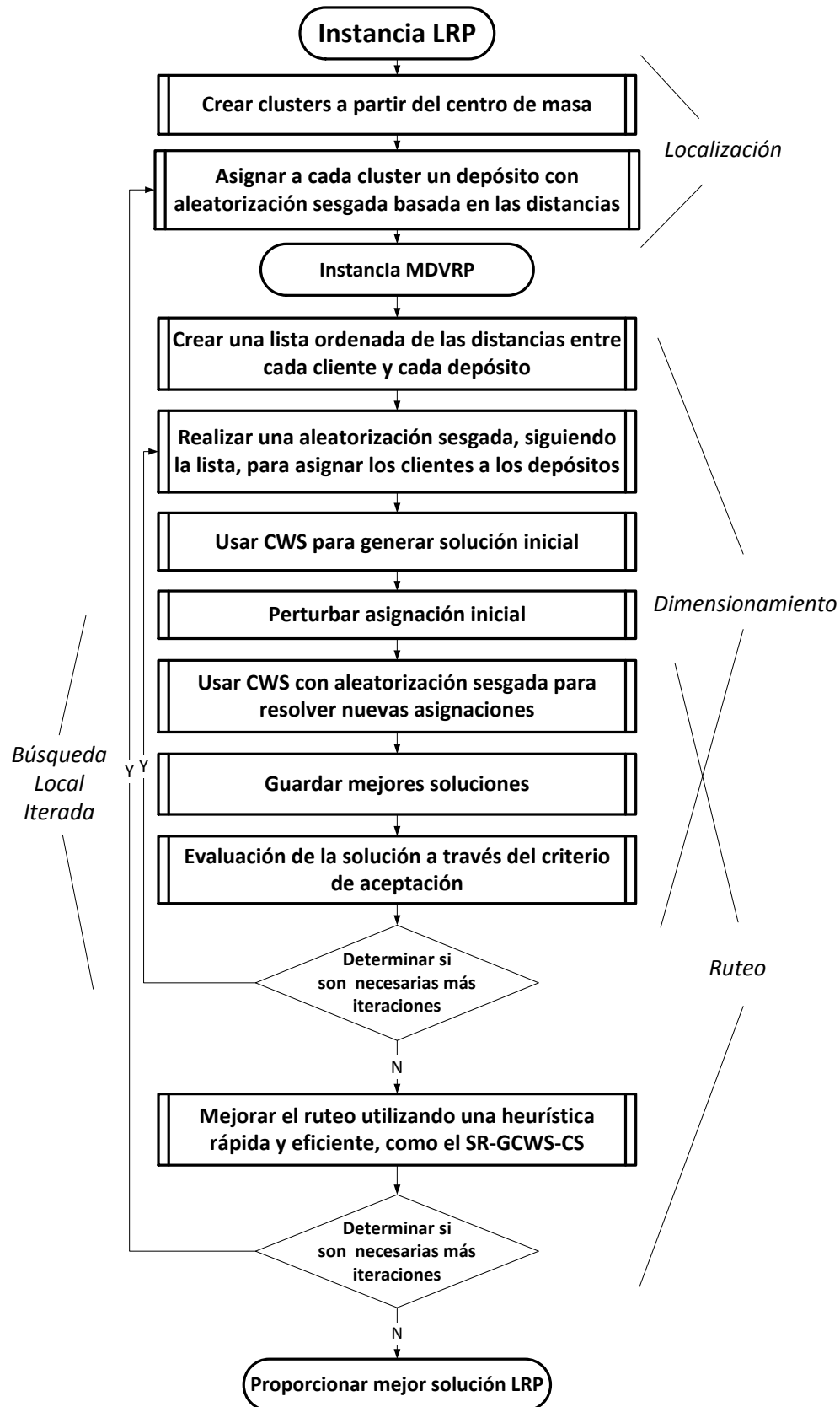


Figura 12. Diagrama de flujo enfoque propuesto. Adaptado: Muñoz-Villamizar et al. (2013a)

4.2.3. Localización

El objetivo final del problema de localización es determinar la ubicación de un número determinado de depósitos a abrir dentro de un conjunto de depósitos potenciales; minimizando los costos asociados a dicha operación. Para resolver este problema, se desarrolló una heurística rápida y eficiente basada en la aleatorización sesgada y en el concepto de centro de masa. El propósito de esta heurística es crear la entrada (*input*) para el siguiente paso del algoritmo que resuelve, de una manera integrada, la asignación de los clientes a los depósitos y el enrutamiento de los vehículos asociados.

El procedimiento de la heurística planteada para la localización del depósito se explica a continuación. En primer lugar, se obtiene el centro de masa de los clientes, teniendo en cuenta sus demandas, como se explicó anteriormente. Se determina el criterio de parada (e.g., número de localizaciones diferentes requeridas).

A continuación, el área en la que se distribuyen los clientes se divide aleatoriamente desde el centro de masa y luego, los clientes se asignan a estas sub-áreas, formando los grupos llamados *clusters*. El número de *clusters* depende del número de depósitos a localizar. Posteriormente se dividen aleatoriamente los clientes en clusters, partiendo del centro de masa de todos los clientes. La aleatorización de esta división se garantiza girando el eje base (e.g., horizontal que pasa por el centro de masa) para la partición a través de un número aleatorio uniforme entre $[0 \text{ y } 2\pi)$ dividido en el número de clusters. Luego, se calculan los centros de masa para cada cluster de acuerdo con los clientes asignados al mismo. Para cada grupo, se genera una lista ordenada de acuerdo con las distancias entre sus centros de masa y la ubicación de los depósitos. Usando una distribución de probabilidad geométrica con $\alpha=0,2$, un depósito diferente se asigna aleatoriamente a cada grupo. Este procedimiento estocástico se repite una y otra vez hasta que se cumpla el criterio de terminación. Es importante aclarar que el valor de $\alpha=0,2$, se determinó de acuerdo al número de depósitos potenciales de las instancias estudiadas y puede variar para problemas con una mayor cantidad de elementos. La Figura 13 muestra el comportamiento de la distribución geométrica para $\alpha=0,2$ y $\alpha=0,3$. Dado que los escenarios de este trabajo manejan hasta 20 depósitos potenciales, se escogió el $\alpha=0,2$ para asignarle una probabilidad de escogencia a todos los elementos trabajados.

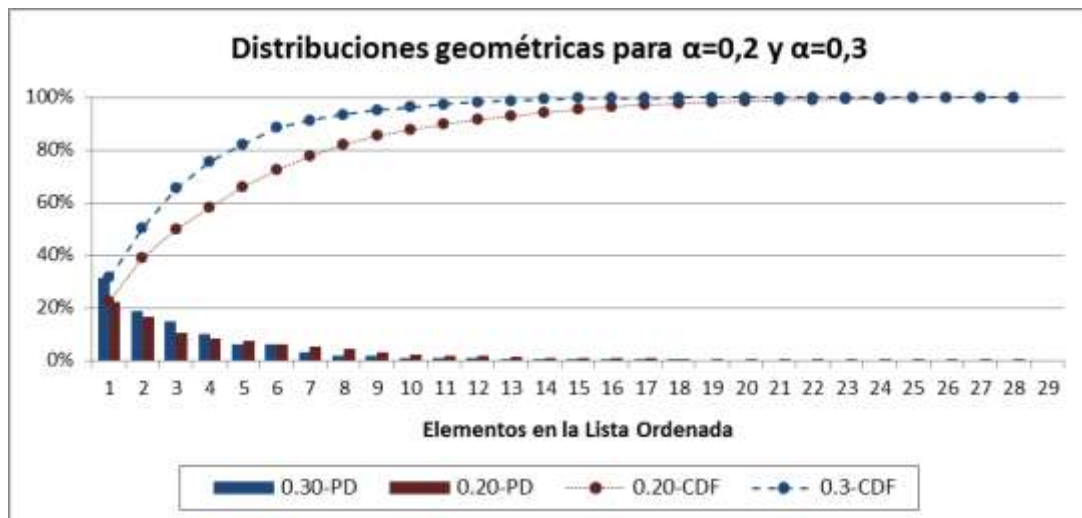


Figura 13. Distribuciones Geométricas para $\alpha=0,2$ y $\alpha=0,3$. Elaboración Propia del Autor

En los casos en los que la distribución geométrica selecciona un depósito por fuera del número de elementos de la lista ordenada; se utiliza el residuo de la división entre el depósito seleccionado y el número total de depósitos potenciales dándole mayor probabilidad a los primeros elementos de la lista de ser seleccionados. Es conveniente recalcar que es deseado que estos primeros elementos tengan una mayor probabilidad de ser escogidos (e.g. si se tienen 20 posibles ubicaciones para los depósitos pero la distribución geométrica con $\alpha=0,2$ selecciona el elemento 23 de la lista; se utiliza el residuo de la división de 23 en 20, que es 3. Entonces el depósito seleccionado será finalmente 3, y no 23 que está por fuera del número de elementos de la lista ordenada).

4.2.4. Dimensionamiento y ruteo de vehículos

Una vez que se ha obtenido la ubicación de depósitos, el LRP se convierte en un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos MDVRP. Como se explicó anteriormente, este enfoque, resuelve simultáneamente los problemas de dimensionamiento y ruteo de vehículos; asignando a cada depósito los clientes a abastecer, dimensionado cada instalación disponible, para luego realizar el ruteo de vehículos de cada depósito con sus respectivos clientes. Por esa razón, el algoritmo propuesto emplea la lógica detrás del procedimiento propuesto por Juan et al. (2012). Este algoritmo utiliza un procedimiento multi-inicio para abordar el problema integral de asignación y enrutamiento de vehículos. Una vez que se encuentran todas las rutas, este algoritmo utiliza un método basado en la simulación para mejorar esas rutas sin cambiar la asignación de clientes a cada depósito. Este método es una variante de los algoritmos SR-GCWS y SR-GCWS-CS propuestos, respectivamente, en Juan et al. (2010 y 2011). Una característica interesante de este algoritmo es que utiliza la simulación de Monte Carlo para generar variaciones aleatorias a partir de una distribución de probabilidad geométrica. Estas variaciones aleatorias se utilizan entonces para inducir un proceso de aleatorización sesgada en la ya nombrada heurística constructiva para el VRP: CWS.

El procedimiento para la resolución de la asignación y el enrutamiento de vehículos se explica a continuación. En primer lugar se calcula una lista ordenada, para cada depósito, utilizando las distancias a cada cliente. Entonces se realiza una aleatorización sesgada, usando una distribución geométrica, con el fin de asignar aleatoriamente los clientes a cada depósito de acuerdo con la lista ordenada de las distancias entre los depósitos y los clientes. Mediante la asignación de cada cliente a un solo depósito, se genera un mapa de asignación aleatorio de clientes a depósitos. Este mapa contiene los distintos conjuntos formados entre los depósitos y sus clientes asignados. Usando este mapa y las restricciones de capacidad, el problema de ruteo de vehículos de cada conjunto se resuelve mediante la aplicación de la heurística de CWS. Esto genera una solución global inicial.

Con esta solución base inicia la metaheurística de Búsqueda Local Iterada ILS, esta metaheurística tiene como condición de parada el tiempo de ejecución o el número de iteraciones definidas por el programador. En cada iteración de la ILS, un agente perturbador cambia la asignación inicial de clientes a los depósitos aplicando la aleatorización sesgada en la lista ordenada de distancias entre clientes y depósitos. Con esta perturbación, se genera un nuevo mapa de asignación de clientes a depósitos y se aplica la heurística CWS con aleatorización sesgada para resolver el problema de ruteo de la nueva asignación. Se genera una nueva solución.

La nueva solución se compara, con la solución base y con la mejor solución encontrada hasta el momento, para actualizar la lista de soluciones encontradas y explorar en las siguientes iteraciones las soluciones más prometedoras. La actualización de soluciones maneja también un criterio de

aceptación para escapar de óptimos locales y explorar soluciones que inicialmente no son tan buenas pero que pueden llevar a un óptimo global. Después de cumplido el criterio de parada, la ILS arroja la mejor solución encontrada.

En el siguiente paso la solución arrojada por la ILS se perfecciona con el uso del SR-GCWS-CS. En este paso se evalúan separadamente las soluciones de cada conjunto buscando mejorar las rutas sin cambiar la asignación de depósito-clientes, en pocas palabras este algoritmo soluciona las diferentes instancias del MDVRP de forma separada, como varios CVRP. Este algoritmo tiene como condición de parada el tiempo de ejecución o el número de iteraciones. En cada iteración se reduce la complejidad de cada depósito, dividiendo en zonas los clientes asignados al mismo. Estas nuevas zonas se convierten en problemas de ruteo más pequeños, que se resuelven utilizando la heurística de CWS con aleatorización sesgada. Después de solucionar cada sub-problema, se unen las soluciones utilizando nuevamente la heurística CWS con aleatorización sesgada. Las nuevas soluciones encontradas se comparan con la solución base y con la mejor solución encontrada hasta el momento para actualizar la lista de soluciones encontradas y explorar en las siguientes iteraciones las soluciones más prometedoras.

Finalmente y al cumplirse el criterio de parada del SR-GCWS-CS, se obtiene la mejor solución para el LRP.

4.5. Experimentos y análisis de resultados

Esta sección experimental se centra en el análisis de la eficacia del enfoque propuesto comparando las soluciones generadas con las soluciones aportadas por la metodología exacta desarrollada en el Capítulo 3. Utilizando los datos reales proporcionados por Montoya-Torres et al. (2012) correspondientes a la ciudad francesa de Saint-Étienne (Ver Figura 8). Como se expuso anteriormente, este estudio de caso sugiere la ubicación de un Centro de Urbano de Distribución o Depósito para el área central de la ciudad, que consta de 1.227 clientes o comercios.

El modelo exacto diseñado en el Capítulo 3 elevó gradualmente el número de clientes para ser servidos, de 20 a un máximo de 100 clientes. Dada la complejidad del problema, para un mayor número de clientes el modelo exacto se convierte en ineficiente. Por lo anterior, es necesaria la aplicación del método propuesto para poder analizar los 1.227 clientes del caso de estudio.

La primera etapa del procedimiento heurístico, que soluciona el problema (a) de ubicación, fue programada en Visual Basic 6.0 mientras que la segunda etapa, que resuelve de forma integral los problemas (b) y (c): asignación o dimensionamiento y ruteo de vehículos, se ha implementado como una aplicación Java. Las pruebas de ambas etapas, fueron realizadas en un computador con procesador Intel® Core i5 y 4GB de memoria RAM. El tiempo de ejecución del algoritmo varía de acuerdo al tamaño de las instancias.

4.5.1. Escenario A: 20 clientes y 20 ubicaciones potenciales para un Depósito

Con el fin de probar el enfoque propuesto en un escenario de tamaño pequeño, donde las soluciones proporcionadas por el método exacto son óptimas, se utilizó primero una instancia con sólo 20 clientes (Tabla 10 en Anexo 1). Esta instancia se resolvió tanto con el método exacto como con el procedimiento heurístico propuesto para tres casos diferentes: considerando una, dos y tres rutas. Es importante recordar que para esta instancia: cada cliente es una posible ubicación del centro de distribución, las demandas de los clientes y la capacidad de carga del vehículo son

deterministas y conocidas. Para este escenario, el tiempo de ejecución del método fue de 30 minutos por instancia.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos utilizando ambos enfoques en cada caso y la Figura 14 muestra la localización de los clientes para esta instancia y las soluciones del procedimiento heurístico propuesto para los casos de una, dos, y tres rutas.

Tabla 4. Resultados para el Escenario A con 20 clientes y una, dos y tres rutas.

| Caso | Método Exacto | Procedimiento Heurístico | Gap |
|------------|---------------|--------------------------|------|
| Una Ruta | \$2,696 | \$2,696 | 0.0% |
| Dos Rutas | \$2,834 | \$2,834 | 0.0% |
| Tres Rutas | \$3,246 | \$3,246 | 0.0% |

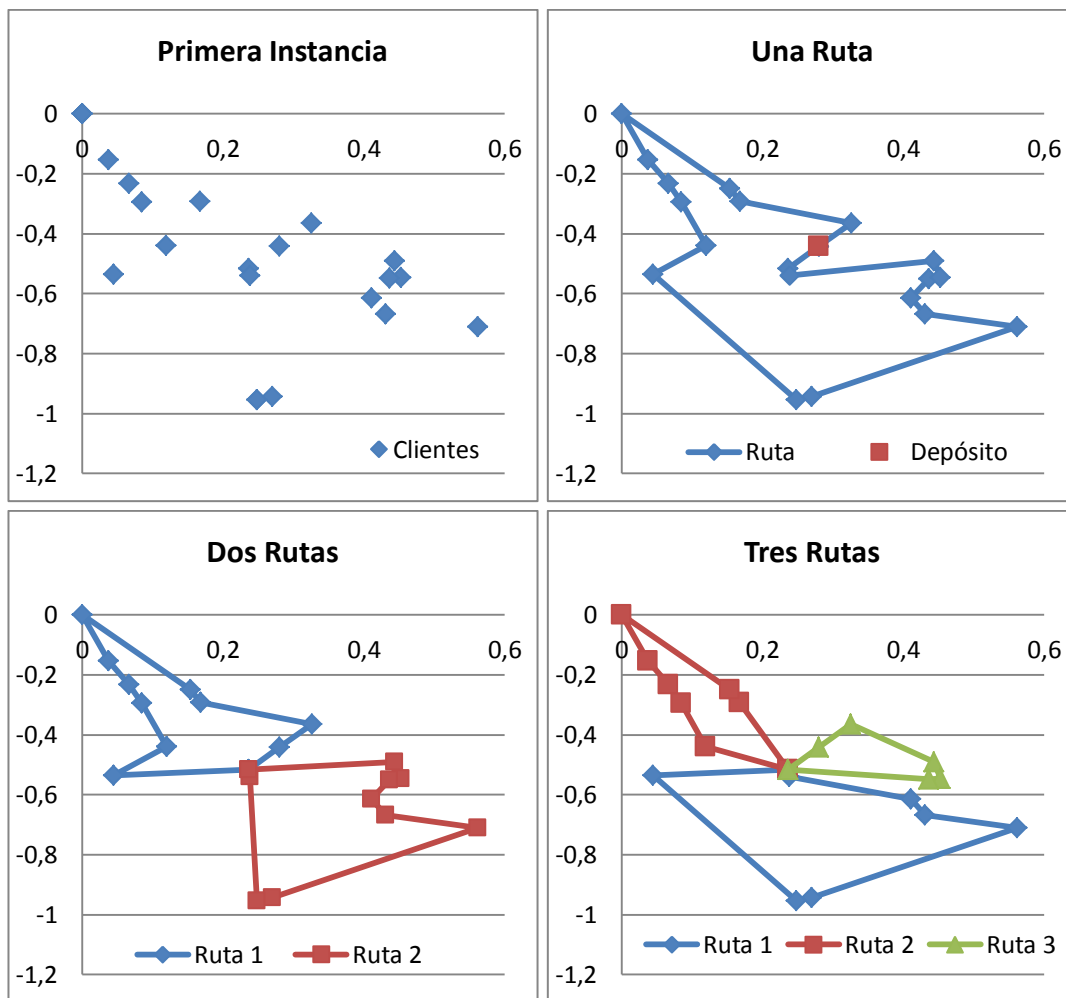


Figura 14. Soluciones del procedimiento heurístico para el Escenario A con 20 clientes y una, dos y tres rutas.
Fuente: Elaboración propia del autor

Según los resultados podemos concluir que el procedimiento heurístico propuesto fue capaz de igualar las soluciones generadas por el método exacto. Por lo tanto, podemos afirmar un buen rendimiento preliminar del enfoque, al menos para casos pequeños.

4.5.2. Escenario B: 50 clientes y 8 ubicaciones potenciales para un Depósito

Se propone un segundo escenario, de tamaño mediano, con 50 (Ver Tabla 11 en Anexo 1) clientes para probar nuevamente el enfoque propuesto frente al método exacto. El número de posibles ubicaciones del depósito es de 8 puntos específicos (Ver Tablas 13 y 14 en Anexo 2). En este caso, los clientes y las ubicaciones potenciales de los depósitos están definidos. Las soluciones se definen utilizando solamente 3 rutas. Dada la capacidad de tratar una mayor complejidad del problema, el enfoque propuesto, maneja un número de ubicaciones potenciales mayor al número tratado por el método exacto. Para este escenario, el tiempo de ejecución del método heurístico fue de 30 minutos por instancia.

La Tabla 5 presenta los costos asociados para esta instancia de 50 clientes generados por cada metodología. El método exacto no es muy eficiente para este tamaño problema y el resultado presentado en la tabla corresponde a la mejor solución encontrada, no al óptimo, después de ejecutar el modelo matemático por 1.000 segundos. En este caso, el método heurístico produce una solución mucho mejor (-12,34% de Gap). La Figura 15 muestra la representación de las soluciones generadas por cada enfoque. En la gráfica se puede apreciar que la mejor solución del problema selecciona el depósito más cercano al centro de masa. Lo anterior comprueba que el concepto de centro de masa para determinar la ubicación sirve bastante bien.

Tabla 5. Resultados para el Escenario B con 50 clientes y tres rutas.

| Método Exacto | Procedimiento Heurístico | Gap Absoluto | % Gap |
|---------------|--------------------------|--------------|---------|
| \$6,264 | \$5,491 | -\$773 | -12.34% |

*Solución arrojada después de 1.000 segundos de ejecución del modelo en GAMS

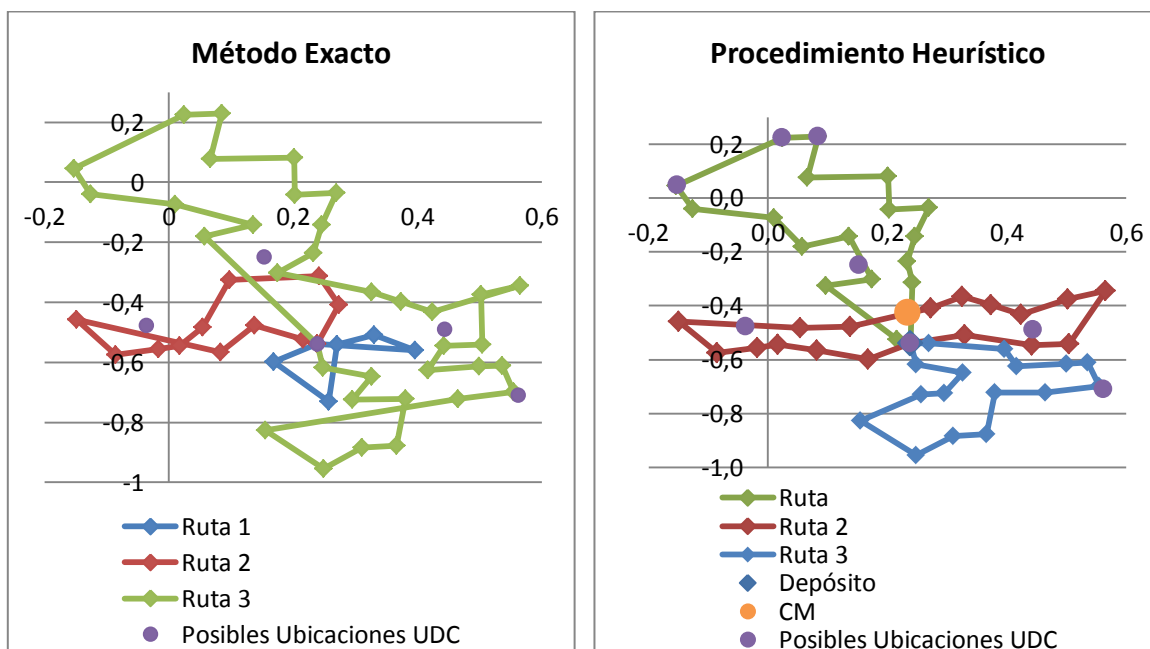


Figura 15. Soluciones obtenidas para el Escenario B con 50 clientes usando ambos métodos. Fuente: Elaboración propia del autor.

4.5.3. Escenario C: 100 clientes y 8 ubicaciones potenciales para un Depósito

Se plantea un tercer escenario como última prueba para confrontar el procedimiento heurístico con el método exacto. Esta instancia cuenta con 100 clientes (Ver Tablas 10 y 11 del Anexo 1), 8 posibles ubicaciones para el depósito (Ver Tablas 12 y 13 en Anexo 2). Nuevamente los clientes y las ubicaciones potenciales de los depósitos están definidos pero las soluciones se definen utilizando solamente 1 ruta, teniendo en cuenta que este escenario tiene la máxima complejidad trabajada con el método exacto. Para este escenario, el tiempo de ejecución del método heurístico fue de 30 minutos por instancia.

La Tabla 6 presenta los costos asociados por cada metodología. Para este caso la solución del procedimiento heurístico es mejor que la solución del método exacto. Estos resultados demuestran que es oportuno utilizar el método heurístico para instancias grandes, más cercanas a la realidad. La Figura 16 muestra la representación de las soluciones generadas por cada enfoque.

Tabla 6. Resultados para el Escenario C con 100 clientes y una ruta.

| Método Exacto | Procedimiento Heurístico | Gap Absoluto | Gap Relativo |
|---------------|--------------------------|--------------|--------------|
| \$6.318* | \$6.084 | -\$234 | -3,7% |

*Solución arrojada después de 1.000 segundos de ejecución del modelo en GAMS

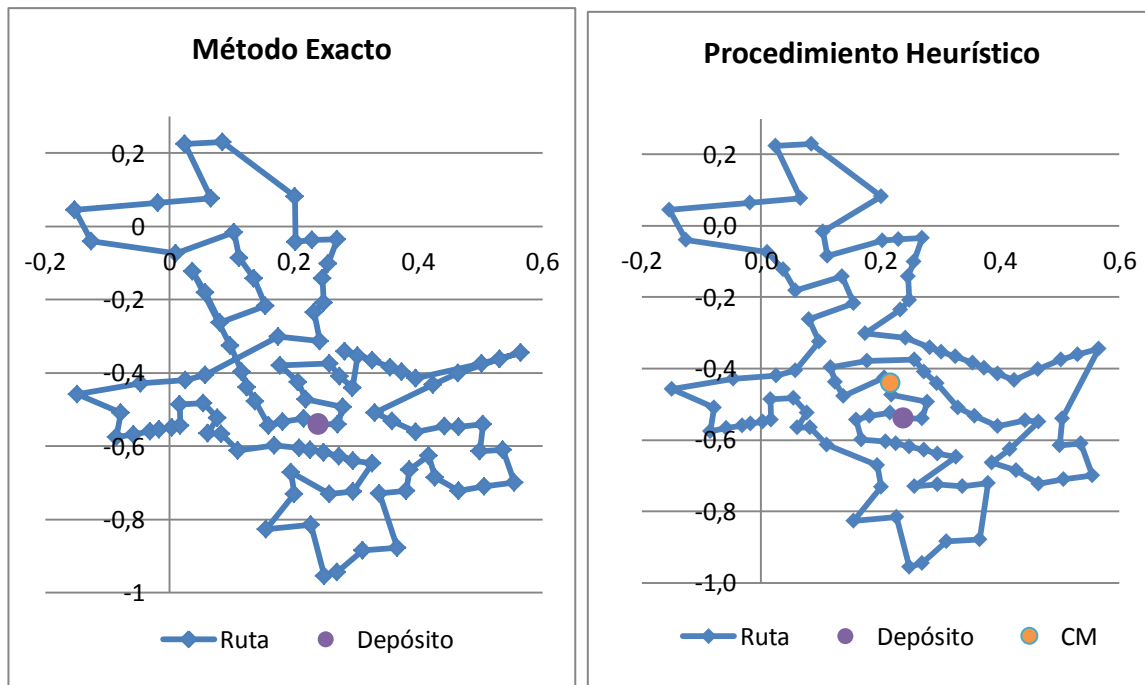


Figura 16. Soluciones obtenidas para el Escenario C con 100 clientes usando ambos métodos. Fuente: Elaboración propia del autor

4.5.4. Escenario D: 1227 clientes y 12 ubicaciones potenciales para un Depósito

Se propone un cuarto escenario, de tamaño grande, analizando los 1227 comercios de la zona central de la Ciudad de Saint-Étienne, proporcionados por Montoya-Torres et al. (2012). Es importante recordar que dada la complejidad del escenario, esta instancia no se pudo resolver con el método exacto; y dados los buenos resultados obtenidos hasta el momento por el procedimiento heurístico propuesto, se asume que la solución arrojada es buena. En esta instancia las posibles ubicaciones del depósito también aumentaron a 12 (Ver Tabla 14 de Anexo 2) y las soluciones se definen utilizando solamente 3 rutas. Dado el tamaño del escenario, el tiempo de ejecución del método fue de 10 horas por instancia.

Un análisis previo de las ubicaciones de los comercios, permite reducir el número de clientes a 427. La reducción obedece a que los comercios están ubicados o en el mismo lugar o demasiado cerca. Con estos datos se puede comprobar la situación de alta densidad de comercios en la zona central de las ciudades. La solución arrojada por el modelo tiene un valor de \$8.160 y está representada gráficamente la Figura 17,

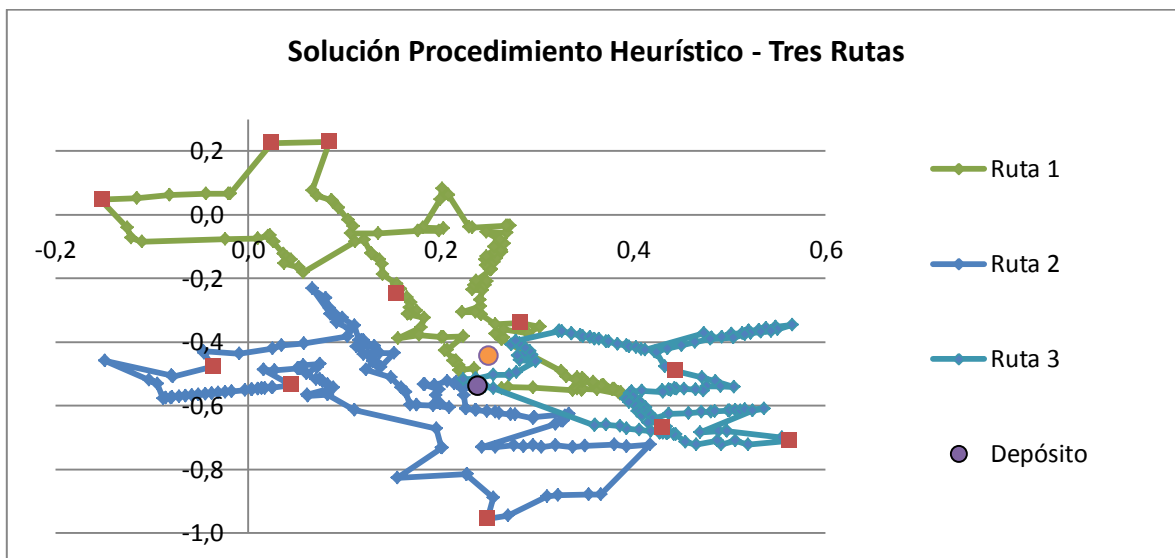


Figura 17. Solución del Escenario D con 1227 clientes y tres rutas. Fuente: Elaboración propia del autor

4.5.6. Escenario E: Depósito en la Periferia

El quinto y último escenario se plantea como prueba para evaluar el procedimiento heurístico propuesto. Mientras que en los escenarios anteriores, la solución para la ubicación del depósito es la más cercana al centro de masa, en este nuevo escenario el depósito es localizado en la periferia urbana. La comparación entre ambas ubicaciones (centro y periferia) permitirá validar el concepto de centro de masa. Las soluciones se definen utilizando solamente 3 rutas para los escenarios B y D, con 50 y 1227 clientes respectivamente.

La Tabla 6 muestra una comparación entre las mejores soluciones obtenidas utilizando los datos del escenario B con el procedimiento heurístico, es decir depósito centrado, vs. el depósito ubicado en la periferia. De los resultados, se puede afirmar que un centro de distribución urbano debe estar

cerca del centro de masa de los clientes, es decir en el centro de la ciudad y no en la periferia. La Figura 18 muestra la representación gráfica de la solución para la instancia con el depósito en la periferia.

Tabla 7. Resultados del Escenario E con 50 clientes, tres rutas y el depósito ubicado en la periferia.

| Solución Depósito Centrado | Solución Depósito en la Periferia | Gap Absoluto | % Gap |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------|--------|
| \$5,491 | \$7,400 | \$1,909 | 34.77% |

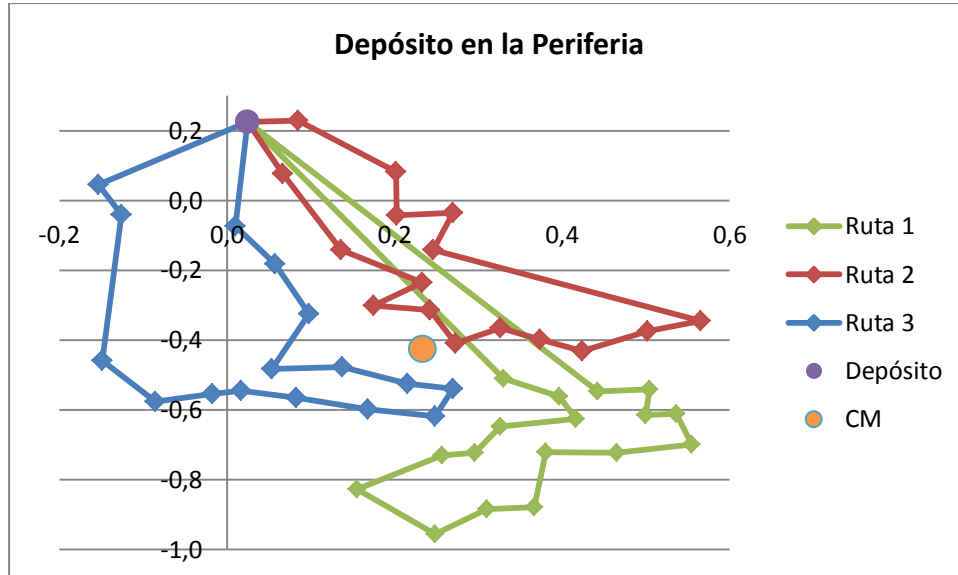


Figura 18. Solución del Escenario E con 50 clientes, tres rutas y el depósito ubicado en la periferia. Fuente: Elaboración propia del autor

La Tabla 8 presenta los costos asociados a las soluciones del depósito centrado, vs. el depósito ubicado en la periferia con los datos del escenario D. La solución gráfica del problema con estas características se presenta en la Figura 19. Según los resultados, se confirma nuevamente que el centro de distribución urbana debe estar cerca del centro de la ciudad y no en la periferia.

Tabla 8. Resultados del Escenario E con 1227 clientes, tres rutas y depósito ubicado en la periferia

| Solución Depósito Centrado | Depósito en la Periferia | Gap Absoluto | Gap Relativo |
|----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|
| \$8.160 | \$10.851 | \$2.691 | 32,98% |

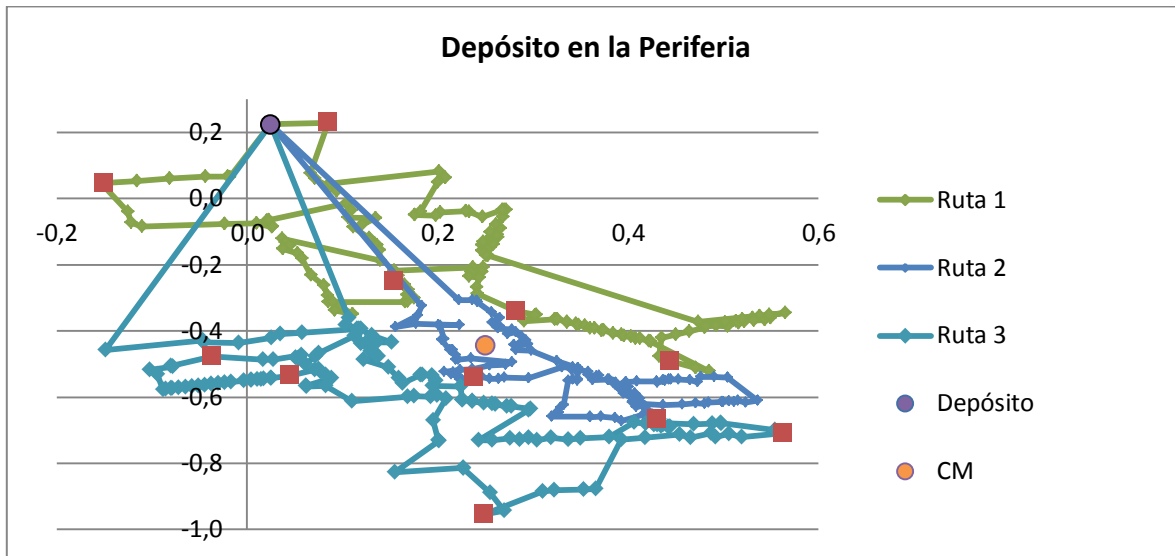


Figura 19. Solución del Escenario E con 1227 clientes, tres rutas y depósito ubicado en la periferia. Fuente: Elaboración propia del autor

4.6. Conclusiones del capítulo

De acuerdo con los resultados obtenidos, el procedimiento heurístico propuesto parece funcionar bastante bien en escenarios de pequeño tamaño y es incluso capaz de superar el método exacto en escenarios de tamaño medio y grande, donde la complejidad del problema hace que el método exacto sea ineficiente.

El tiempo de ejecución del algoritmo para cada instancia se puede ver en la Tabla 9. Se puede decir que 10 horas es un tiempo prudente para la programación del ruteo en una ciudad, permitiendo hacer las programaciones de un día para otro.

Tabla 9. Tiempo de ejecución del método heurístico por escenario

| Escenarios | Tiempo de Ejecución del Procedimiento Heurístico |
|------------|--|
| A, B, C | 0,5 horas |
| D, E | 10 horas |

Se aplicó el enfoque con la totalidad de los comercios de la ciudad de Saint-Étienne (1227 clientes) y, dados los buenos resultados del procedimiento para tamaños pequeños y medianos, se puede asumir que la solución arrojada es eficiente y puede ser analizada por el tomador de decisiones para mejorar la competitividad del sistema logístico y las condiciones ambientales y sociales de la ciudad en cuestión.

Por último, analizando la sensibilidad de la localización del depósito, podemos concluir que el lugar adecuado para la ubicación del Centro Urbano de Distribución, en la zona central de la ciudad de Saint-Étienne, es en el punto más cercano al centro de masa de la demanda de todos los clientes. Refutando la idea de un posible depósito en las afueras de la ciudad.

Capítulo 5. Conclusiones y Perspectivas

5.1. Conclusiones

La idea de utilizar Centros Urbanos de Distribución para el transporte de mercancías dentro de la ciudad se presenta como una solución para reducir las emisiones de carbono, el tráfico y la contaminación del ruido en la ciudad. La ubicación, tamaño y operación de los centros urbanos de distribución se puede trabajar como un problema de Localización y Ruteo de Vehículos (LRP). El LRP es un problema de optimización combinatoria NP-duro con aplicaciones relevantes para la movilidad y la congestión del tráfico en las ciudades de tamaño medio y grande.

El Location Routing Problem busca localizar las instalaciones dentro de un conjunto de posibles ubicaciones y diseñar las rutas entre los clientes asignados a las mismas; permitiendo, como consecuencia, determinar la capacidad y/o tamaño de las instalaciones y, si se quiere, de los vehículos.

El modelo de programación lineal entera expuesto en el Capítulo 3 es presentado como un método exacto para determinar, de forma integral, la ubicación, el tamaño y la operación de centros urbanos de distribución (UDC) minimizando las distancias o costos totales de las rutas y respetando las limitaciones y restricciones específicas del problema. El modelo matemático propuesto tiene la posibilidad de solucionar o bien el LRP (Location-Routing Problem) o bien el VRP (Vehicle Routing Problem), con las siguientes características:

- El número de depósitos puede ser único o múltiple, de acuerdo a las necesidades del problema. Se puede determinar el número de depósitos como dato inicial o el modelo puede determinar el número óptimo de depósitos de acuerdo a las restricciones pertinentes.
- La cantidad de vehículos se puede dar como parámetro inicial, o se puede pedir al modelo que calcule el número óptimo de rutas.
- Se puede restringir o no el número de rutas por vehículo y/o por depósito.
- La capacidad de los vehículos puede ser homogénea o heterogénea.

Las comparaciones realizadas entre los valores obtenidos por el enfoque de Montoya-Torres et al. (2012) y el modelo matemático propuesto muestran que la solución integral es superior a la solución jerárquica en todos los casos, con mejoras de hasta el 30,57%. Así mismo, las pruebas realizadas sobre el desempeño del modelo exacto con los datos de la ciudad de Saint-Étienne, Francia, muestran que es mejor realizar un solo recorrido para todos los clientes que tener varias rutas con varios vehículos asignados al UDC.

Dado que el LRP es un problema NP-duro, el modelo exacto sólo es eficiente para instancias pequeñas y medianas. Con miras a resolver el problema de la distribución de productos a un gran número de tiendas y puntos comerciales en casos reales (e.g, la ciudad de Saint-Étienne) se presentó en el Capítulo 4 el procedimiento heurístico para obtener buenas soluciones.

El enfoque heurístico propuesto utiliza una estrategia de dos etapas, siguiendo el principio *divide and conquer*, para resolver de manera integral los problemas de localización de centros de distribución en las zonas urbanas, el dimensionamiento y la distribución de mercancías correspondiente. La primera etapa soluciona el problema de ubicación y, la segunda, resuelve de

forma integrada los problemas asignación o dimensionamiento y ruteo de vehículos. Una característica importante del enfoque es que emplea un comportamiento aleatorio sesgado en los diferentes procedimientos heurísticos con el fin de buscar de manera eficiente para una solución casi óptima.

El procedimiento heurístico se comparó con el método exacto en el caso de estudio de la ciudad de Saint-Étienne. De acuerdo con los resultados obtenidos, el enfoque heurístico propuesto parece funcionar bastante bien en escenarios de pequeño tamaño y es incluso capaz de superar el método exacto en escenarios de tamaño medio y grande, donde la complejidad del problema hace que el método exacto sea ineficiente.

Al utilizar el procedimiento heurístico para resolver el LRP de toda la ciudad de Saint-Étienne, teniendo en cuenta los 1227 clientes de su zona central, se obtienen una respuesta eficiente (factible y en un tiempo de cómputo razonable). Dado el buen desempeño del procedimiento y los buenos resultados en las pruebas realizadas, se puede asumir que las soluciones arrojadas para instancias tan grandes son buenas y merecen ser analizadas por el tomador de decisiones para mejorar la competitividad del sistema logístico y las condiciones ambientales y sociales de la ciudad en cuestión.

5.2. Perspectivas de investigación

A partir de los resultados obtenidos y los desarrollos logrados en este trabajo, se abren varias vías de investigación futura. Por un lado, se puede realizar un estudio exhaustivo para comprobar el desempeño del procedimiento heurístico propuesto y analizar la sensibilidad del mismo. Ya sea mediante un *benchmarking* utilizando las instancias presentes en la literatura y/o comparando los resultados para el caso de estudio con otros procedimientos existentes (e.g., GRASP).

Para futuras investigaciones, surgen oportunidades interesantes cuando se consideran otras funciones objetivo que tienen en cuenta evaluaciones de impacto ambiental o social. Esto conlleva a un problema de toma de decisiones multi-criterio o multi-objetivo más cercanos a la realidad y muy atractivos de estudiar. Este tipo de problemas de decisión podría ser aún más de interesantes para quienes toman las decisiones políticas-públicas.

Por último, debido a la gran necesidad real de las grandes ciudades a restringir la circulación de camiones en el centro o al interior de ciertas zonas principalmente residenciales, se puede pensar en el diseño de herramientas formales para la toma de decisiones que tengan integrados sistemas de georeferenciación. De esta forma, los tomadores de decisiones (generalmente entidades de la administración pública) pueden emplear estas herramientas para “simular” los impactos económicos (pero también sociales y/o ambientales) que se tendrían dependiendo de la zona en la cual se localicen los centros urbanos de distribución.

Referencias

- Ambrosino, D. and Scutella, M.G. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165, 610–624.
- Averbakh, I. and Berman, O. (1994). Routing and location-routing p-delivery men problems on a path. *Transportation Science*, 28, 184–197.
- Averbakh, I. and Berman, O., (1995). Probabilistic sales-delivery man and sales-delivery facility location problems on a tree. *Transportation Science*, 29, 184–197.
- Averbakh, I. and Berman, O. (2002). Minmax p-traveling salesmen location problems on a tree. *Annals of Operations Research*, 110, 55–62.
- Averbakh, I. and Berman, O., Simchi-Levi, D. (1994). Probabilistic a priori routing-location problems. *Naval Research Logistics*, 41, 973–989.
- Baker, B. and Ayechew M. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30, 787–800.
- Bellmore, M. and Hong, S. (1974) Transformation of multi-salesmen problem to standard traveling salesman problem. *Journal of ACM*, 21, 500-504.
- Bookbinder, J.H. and Reece, K.E., (1988). Vehicle routing considerations in distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 37, 204–213.
- Branco, I.M. and Coelho, J.D. (1990). The Hamiltonian p-median problem. *European Journal of Operational Research*, 47, 86–95.
- Brito, J., Campos, C., García, F., García, M., Melián, B., Moreno, J. and Moreno, M. (2004). Metaheurísticas: una revisión actualizada. (Documento de Trabajo No 02). Departamento de Estadística, Investigación Operativa y Computación- Universidad de La Laguna. Available online at: <http://webpages.ull.es/users/gci/> [Accessed: June 13, 2013].
- Bruns, A.D. (1998). Zweistufige Standortplanung unter Berücksichtigung von Tourenplanungsaspekten – Primale Heuristiken und Lokale Suchverfahren, *PhD Dissertation, Sankt Gallen University*.
- Clarke, G., and J. Wright. 1964. Scheduling of Vehicles from a central Depot to a Number of Delivering Points. *Operations Research*, 12:568–581.
- Daganzo, C.F. (2010). Structure of competitive transit networks. *Transportation Research Part B* 44:434–446.
- Delaître, L. (2008) Méthodologie pour optimiser le transport de marchandises en ville, application aux villes moyennes et dans le cadre de l’agglomération de La Rochelle. *Thèse de doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- Fathali, F. (2006). A genetic algorithm for the p-median problem with pos/neg weights. *Applied Mathematics and Computation*, 183(2), 1071-1083.
- Faure, L., Battaia, G., Marquès, G., Guillaume, R., Vega-Mejía, C., Montoya-Torres, J.R., Muñoz-Villamizar, A. and Quintero-Araújo, C (2013). How to anticipate the level of activity of a sustainable collaborative network: the case of urban freight delivery through logistics platforms. In: *Proceedings IEEE DEST-CEE 2013*.
- Geroliminis, N., and C.F. Daganzo. (2006). A review of green logistics schemes used in cities around the world. *Working paper UCB-ITS-VWP-2005-5*, UCB Center for Future Urban Transport: A Volvo Center of Excellence, Institute of Transport Studies, University of California Berkeley, USA. Available online at: <http://www.metrans.org/nuf/documents/geroliminis.pdf> [Accessed: November 26, 2011].
- Guyon, O., Absi N., Feillet D., Garaix T. (2012) A modeling approach for locating logistics platforms for fast parcel delivery in urban areas. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 360–368.
- Hansen, P.H., Hegedahl, Hjortkjær, S., Obel, B. (1994) A heuristic solution to the warehouse location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 76, Issue 1, 6, Pages 111-127.
- Herazo-Padilla, Nieto Isaza S., Montoya-Torres, J.R., Ramirez Polo L., Muñoz-Villamizar A. (2013) Coupling ant colony optimisation and discrete-event simulation to solve a stochastic location-routing problem. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, M. E. Kuhl (Eds).
- Hurban, A. (1989). An Exact Solution Method for the MTSP. *Journal of The Operational Research Society*, 40(5), 539-560.
- Kariv, O., Hakimi, S. (1979). An algorithmic approach to network location problems. Part II: p-median. *SIAM J. Appl. Math.*, 37, 539–560.

- Karp, R. (1972). *Reducibility among combinatorial problems* (Miller, R. y Thatcher J., Eds.) New York: Plenum Press
- Jamil, M., Batta, R., Malon, D.M. (1994). The traveling repairperson home base location problem. *Transportation Science*, 28, 150–161.
- Jourdan, L., Basseur M., Talbi, E (2009) Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 620-629.
- Juan, A.A., B. Barrios, M. Coccola, S. Gonzalez, J. Faulin, and T. Bektas. (2012). Combining biased randomization with meta-heuristics for solving the multi-depot vehicle routing problem. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, Edited by C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose, and A.M. Uhrmacher, 1-2. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Article No. 347.
- Juan, A.A., Faulin, J., Grasman, S., Riera, D., Marull, J. and Mendez, C. (2011). Using safety stocks and simulation to solve the vehicle routing problem with stochastic demands. *Transport Res C-Emer*; 19:751-765.
- Juan, A.A., Faulin, J., Jorba, J., Riera, D., Masip, D., and Barrios, B. (2011). On the Use of Monte Carlo Simulation, Cache and Splitting Techniques to Improve the Clarke and Wright Savings Heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, 62(6), 1085–1097.
- Juan, A.A., Faulin, J., Ruíz, R., Barrios, B. and Caballe, S. (2010). The SR-GCWS Hybrid Algorithm for Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*, 10(1), 215–224.
- A.A. Juan, F. Adelantado, J. Faulin, J.R. Montoya-Torres. Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem with Maximum Traveling Distance and Service Time Requirements: An Approach based on Monte Carlo Simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC-2009)*, M.D. Rossetti, R.R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, R.G. Ingalls (eds.). Austin, USA. December 13-16, 2009. Pages 2467-2475
- Laporte, G., Nobert, Y. and Pelletier, P. (1983). Hamiltonian location problems. *European Journal of Operational Research*, 12, 82– 89.
- Laporte, G. and Nobert, Y. (1981). An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. *European Journal of Operational Research*, 6, 224–22.
- Law, A. (2007) *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Ligocki C. and Zonn L.E. (1984) Parking problems in central business districts. *Cities*, 1(4), 350-355.
- Lin, C.K.Y., Chow, C.K. and Chen, A. (2002). A location-routing loading problem for bill delivery services. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 5–25.
- Liong, C., Wan-Rosmanira, I., Khairuddin, O. and Zirour, M. (2008). Vehicle routing problem: models and solutions. *Journal of Quality Measurement and Analysis*, 4(1), 205-218.
- Lourenço, H.R., Martin, O. and Stützle, T. (2003). Iterated local search. In F. Glover and G.G. Kochenberger, editors, *Handbook of Meta-heuristics*, chapter 11. Kluwer Academic Publishers.
- Montoya-Torres J.R, Marquès G. and Burlat P. (2012) A conceptual framework for location, sizing and operation of urban distribution centers with sustainable performance metrics. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2012)*, Quebec, Canada, August 26-29. CD-ROM.
- Mosheiov, G. (1995). The pickup delivery location problem on networks. *Networks*, 26, 243–251.
- Muñoz-Villamizar A., Montoya-Torres J.R., Juan A.A. and Cáceres-Cruz J. (2013a) A simulation-based algorithm for the integrated location and routing problem in urban logistics. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, R. Pasupathy, S.-H. Kim, A. Tolk, R. Hill, M. E. Kuhl (Eds).
- Muñoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J.R. and Herazo-Padilla (2013b). Modelación y resolución del problema de localización–ruteo en logística urbana. *Ingeniería y Universidad*. Submitted.
- Muñuzuri J., Larrañeta, J., Onieva, L. and Cortés, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities* 22(1), 15–28.
- Muñuzuri J., Cortés P., Guadix, J., and Onieva, L.. (2012). City logistics in Spain: Why it might never work. *Cities* 29(2), 133–141.
- Miller C. E., Tucker A. W., and Zemlin R. A. (1960). Integer programming formulations and traveling salesman problems. *J. ACM*, 7, 326–329.
- Nagy G. and Salhi S. (2007) Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649–672.
- Nemoto T. (1997) Area-wide inter-carrier consolidation of freight in urban areas. *Transport Logistics*, 1(2), 87-103.

- Owen, S. and Daskin, M. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111, 423–447.
- Roca-Riu M. and Estrada M. (2012). An Evaluation of Urban Consolidation Centers Through Logistics Systems Analysis in Circumstances Where Companies have Equal Market Shares. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 796-806.
- Salhi, S. and Fraser, M. (1996). An integrated heuristic approach for the combined location vehicle fleet mix problem. *Studies in Locational Analysis*, 8, 3–21.
- Schwardt, M. and Dethloff, J. (2005). Solving a continuous locationrouting problem by use of a self-organising map. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35, 390–408.
- Simchi-Levi, D. (1991). The capacitated traveling salesman location problem. *Transportation Science*, 25, 9–18.
- Srivastava, R., and W.C. Benton. 1990. The location-routing problem: Considerations in physical distribution system design. *Computers & Operations Research*, 17, 427–435.
- Surekha, P. and Sumathi, S. (2011). Solution To Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms. *World Applied Programming*, 1 (3), 118-131
- StÄutzle, T. (1999). Local search algorithms for combinatorial problems-analysis, algorithms and news applications. DISKI Dissertationen zur KÄunstliken Intelligenz.
- Taniguchi E., Noritake M., Yamada T. and Izumitani T. (1999) Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research Part E*, 35, 207-222.
- Taniguchi, E., Yamada, T. and Yanagisawa, T. (1995). Issues and views on cooperative freight transportation systems. In: *7th World Conference on Transport Research*.
- Topp, H. and Pharoah, T. (1994). Car-free city centres. *Transportation*, 21(3), 231–247.
- Tuzun D. and Burke L. (1999). A two-phase tabu search approach to the location routing problem Original Research Article. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 87-99.
- Vázquez, M.A. (2007). Desarrollo de un framework para el problema de ruteo de vehículos. Tesis de maestría en Gestión de Operaciones. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Winston, W. (2005). *Investigación de Operaciones, aplicaciones y Algoritmos*, 4ª Edición. México: Thomson. Pág. 362.
- Wu, T.-H., Low, C. and Bai, J.-W. (2002). Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers and Operations Research*, 29, 1393–1415.
- Yang D. and Odani M. (2006) Analysis on movement of profit for the partner companies in joint-delivery system. In: *Proceedings of Infrastructure Planning*, Vol. 33, pp.327.
- Zanjirani, R., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M. and Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 368-407.

Anexo 1. Datos de los Comercios de la Ciudad de Saint-Étienne

En la Tabla 10 se muestran las ubicaciones de los 20 clientes que se trabajaron en el modelo jerárquico de Montoya-Torres et al. (2012), en la Fase 1 del Capítulo 3 y en el Escenario A del Capítulo 4.

Tabla 10. Datos de 20 Clientes de Montoya-Torres et al. (2012) Saint-Étienne

| Cliente N° | Dirección | X-Y Coordenadas | |
|------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|
| | | X' | Y' |
| 1 | PAS DE L EUROPE, 42000 | 0,15183781 | -0,434706286 |
| 2 | 6 RUE DE LA CONDITION, 42000 | -0,036515 | -0,476604764 |
| 3 | 30 RUE DE LA VILLE, 42000 | -0,0583198 | -0,567473357 |
| 4 | 17 RUE DENIS ESCOFFIER, 42000 | 0,37878732 | -0,546826617 |
| 5 | 5 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,34727446 | -0,5124686 |
| 6 | 34 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,40456279 | -0,617061748 |
| 7 | 13 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,27832237 | -0,493887409 |
| 8 | 7 RUE GENERAL FOY, 42000 | 0,13072178 | -0,412898458 |
| 9 | 18 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,49036025 | -0,538632695 |
| 10 | 14 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,47292499 | -0,553733109 |
| 11 | 2 RUE GERENTET, 42000 | 0,139105 | -0,155593587 |
| 12 | 19 RUE GRAND MOULIN, 42000 | 0,29848181 | -0,459673174 |
| 13 | PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,15343825 | -0,248989609 |
| 14 | PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,15343825 | -0,248989609 |
| 15 | 10 PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,09004624 | -0,312107572 |
| 16 | 14 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,49164038 | -0,721044715 |
| 17 | 9 RUE PDT WILSON, 42000 | 0,0448228 | -0,14187925 |
| 18 | 4 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0 | 0 |
| 19 | 7 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,30324043 | -0,352163669 |
| 20 | 4 RUE SAINTE CATHERINE, 42000 | 0,07480215 | -0,468200247 |

La Tabla 11 muestra los 50 clientes de la ciudad de Saint-Étienne, que se trabajaron Fase 2 del Capítulo 3 y en los Escenarios B y C del Capítulo 4.

Tabla 11. 50 clientes de la ciudad de Saint-Étienne. Fase 2 – Escenarios B y C

| Cliente N° | Ubicaciones 50 Clientes Dirección | X-Y Coordenadas | |
|------------|--------------------------------------|-----------------|-------------|
| | | X' | Y' |
| 1 | 3 RUE ANTOINE ROULE, 42000 | 0,15484305 | -0,82637319 |
| 2 | 10 RUE BOUCHER DE PERTHES, 42000 | 0,08480869 | 0,22972077 |
| 3 | 6 RUE BOUCHER DE PERTHES, 42000 | 0,02435199 | 0,22458769 |
| 4 | 1 RUE DE LA TOUR VARAN, 42000 | 0,24859287 | -0,95488037 |
| 5 | 19 RUE DE LA VILLE, 42000 | 0,01713692 | -0,54404618 |
| 6 | 38 RUE DE LA VILLE, 42000 | -0,08547354 | -0,57589961 |
| 7 | 24 RUE DE LA VILLE, 42000 | -0,01715552 | -0,55468985 |
| 8 | 12 RUE DE LODI, 42000 | 0,26969218 | -0,03430282 |

| Cliente N° | Dirección | X' | Y' |
|------------|-------------------------------------|-------------|-------------|
| 9 | 5 RUE DE LODI, 42000 | 0,20289739 | -0,04177542 |
| 10 | 7 RUE DENIS ESCOFFIER, 42000 | 0,27012759 | -0,54018629 |
| 11 | 6 RUE DERVIEUX, 42000 | 0,20166316 | 0,08189889 |
| 12 | 31 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,41664974 | -0,62519942 |
| 13 | 2 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,33020601 | -0,5090983 |
| 14 | 6 RUE DES MUTILES DU TRAVAIL, 42000 | 0,36641416 | -0,87780308 |
| 15 | 2 RUE DES MUTILES DU TRAVAIL, 42000 | 0,31027192 | -0,88476624 |
| 16 | 11 PL DORIAN, 42000 | 0,24201635 | -0,31310482 |
| 17 | 25 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,21587549 | -0,52450978 |
| 18 | 24 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,16832903 | -0,59809382 |
| 19 | 15 RUE GENERAL FOY, 42000 | 0,13753838 | -0,47761267 |
| 20 | 2 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,39653412 | -0,56089574 |
| 21 | 20 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,50450426 | -0,54037324 |
| 22 | 11 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,4426132 | -0,54581729 |
| 23 | RUE GEORGES TEISSIER, 42000 | -0,1489221 | -0,45795718 |
| 24 | 4 RUE GERENTET, 42000 | 0,13608047 | -0,14123605 |
| 25 | 4 RUE GRAND MOULIN, 42000 | 0,27317358 | -0,40891756 |
| 26 | 13 PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,17481009 | -0,30144166 |
| 27 | 28 PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,09761866 | -0,32470227 |
| 28 | 9 PL JEAN JAURES, 42000 | -0,12566138 | -0,04000167 |
| 29 | 16 PL JEAN JAURES, 42000 | 0,06648348 | 0,07669926 |
| 30 | 11 B PL JEAN JAURES, 42000 | -0,15312652 | 0,04510168 |
| 31 | 1 PL JEAN JAURES, 42000 | 0,01002982 | -0,07384997 |
| 32 | RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,32625956 | -0,64739603 |
| 33 | 14 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,24832281 | -0,61776138 |
| 34 | 29 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,55444308 | -0,69861548 |
| 35 | 12 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,46527607 | -0,72229776 |
| 36 | 19 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,38031202 | -0,72126742 |
| 37 | 9 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,29557039 | -0,72357423 |
| 38 | 4 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,25691909 | -0,73040409 |
| 39 | 7 RUE LOUIS BRAILLE, 42000 | 0,23280915 | -0,23499772 |
| 40 | 19 RUE LOUIS BRAILLE, 42000 | 0,24611897 | -0,14114717 |
| 41 | 3 RUE MERCIERE, 42000 | 0,08261976 | -0,56563197 |
| 42 | 13 RUE NOTRE DAME, 42000 | 0,49972339 | -0,61420063 |
| 43 | 20 RUE NOTRE DAME, 42000 | 0,5360285 | -0,61013149 |
| 44 | 3 RUE PDT WILSON, 42000 | 0,05732118 | -0,18088299 |
| 45 | 27 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0,56519341 | -0,34508915 |
| 46 | 15 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0,50221273 | -0,37452501 |
| 47 | 2 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0,42398738 | -0,4318888 |
| 48 | 19 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,37401621 | -0,39754193 |
| 49 | 9 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,32602433 | -0,36527935 |
| 50 | 5 RUE SAINTE CATHERINE, 42000 | 0,0539087 | -0,48254683 |

La Tabla 11 muestra los 50 clientes de la ciudad de Saint-Étienne para completar los 100 clientes de la Fase 2 del Capítulo 3 y en el Escenario D del Capítulo 4.

Tabla 12. 51-100 Clientes Fase 2 – Escenario D

| Ubicaciones 51 - 100 Clientes | | X-Y COORDINATES | |
|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------|--------------|
| Cliente N° | Dirección | X' | Y' |
| 51 | 7 RUE ALSACE LORRAINE, 42000 | 0,21863281 | -0,472700714 |
| 52 | 1 RUE ALSACE LORRAINE, 42000 | 0,20683477 | -0,424960619 |
| 53 | 1 RUE ANTOINE ROULE, 42000 | 0,226952846 | -0,815185802 |
| 54 | 5 RUE CAMILLE COLARD, 42000 | 0,256927842 | -0,374603724 |
| 55 | 3 RUE CAMILLE COLARD, 42000 | 0,177423488 | -0,378684061 |
| 56 | 2 RUE DE LA TOUR VARAN, 42000 | 0,269819855 | -0,944037156 |
| 57 | 12 RUE DE LA VILLE, 42000 | 0,077126448 | -0,523047181 |
| 58 | 26 RUE DE LA VILLE, 42000 | -0,03087695 | -0,558947324 |
| 59 | 30 RUE DE LA VILLE, 42000 | -0,0583198 | -0,567473357 |
| 60 | 21 RUE DE LA VILLE, 42000 | 0,003415494 | -0,54830365 |
| 61 | 9 RUE DE LODI, 42000 | 0,229717607 | -0,037529123 |
| 62 | 12 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,358071609 | -0,532325123 |
| 63 | 3 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,181994446 | -0,532880597 |
| 64 | 13 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,27832237 | -0,493887409 |
| 65 | 22 PL DU PEUPLE, 42000 | 0,110174192 | -0,612507218 |
| 66 | 12 RUE GENERAL FOY, 42000 | 0,124094695 | -0,438331849 |
| 67 | 19 RUE GENERAL FOY, 42000 | 0,158932685 | -0,54326917 |
| 68 | 15 RUE GEORGES DUPRE, 42000 | 0,464930035 | -0,547990169 |
| 69 | 3 RUE GEORGES TEISSIER, 42000 | 0,025153357 | -0,420482434 |
| 70 | 10 RUE GEORGES TEISSIER, 42000 | -0,04657845 | -0,428432124 |
| 71 | 4 RUE GEORGES TEISSIER, 42000 | 0,057744513 | -0,405004938 |
| 72 | 1 RUE GEORGES TEISSIER, 42000 | 0,116299722 | -0,396877951 |
| 73 | 27 RUE GERENTET, 42000 | 0,111372882 | -0,085324829 |
| 74 | 17 RUE GRAND MOULIN, 42000 | 0,294734443 | -0,440925278 |
| 75 | 3 PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,154605712 | -0,217779982 |
| 76 | 6 PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,080550017 | -0,261573471 |
| 77 | PL JEAN JAURES, 42000 | -0,018458332 | 0,06508024 |
| 78 | 4 PL JEAN JAURES, 42000 | 0,103767107 | -0,015554931 |
| 79 | 27 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,386171511 | -0,663549128 |
| 80 | 8 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,225828012 | -0,609346601 |
| 81 | 22 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,295603052 | -0,639114365 |
| 82 | 18 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,272896958 | -0,627251574 |
| 83 | 6 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,209059779 | -0,604158058 |
| 84 | 40 RUE JOSE FRAPPA, 42000 | 0,427580673 | -0,684591664 |
| 85 | 8 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,337112859 | -0,729084043 |
| 86 | 27 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,506262421 | -0,710567512 |
| 87 | 25 RUE LOUIS BRAILLE, 42000 | 0,255425927 | -0,101034799 |
| 88 | 12 RUE LOUIS BRAILLE, 42000 | 0,247976068 | -0,208500012 |

| Cliente N° | Dirección | X' | Y' |
|-------------------|--------------------------------|--------------|--------------|
| 89 | 4 RUE MERCIERE, 42000 | 0,061259209 | -0,565366026 |
| 90 | 13 RUE PDT WILSON, 42000 | 0,036794491 | -0,122000423 |
| 91 | 7 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0,464217547 | -0,40085647 |
| 92 | 21 RUE PIERRE BERARD, 42000 | 0,530711931 | -0,361287181 |
| 93 | 5 RUE SAINT FRANCOIS, 42000 | 0,195294357 | -0,670657353 |
| 94 | 26 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,395943932 | -0,415181033 |
| 95 | 8 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,302462069 | -0,352795624 |
| 96 | 15 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,354823901 | -0,384636902 |
| 97 | 6 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,282135585 | -0,340400575 |
| 98 | 12 RUE SAINTE CATHERINE, 42000 | -0,078490942 | -0,508468846 |
| 99 | 8 RUE SAINTE CATHERINE, 42000 | 0,016313723 | -0,486837687 |
| 100 | 4 PL WALDECK ROUSSEAU, 42000 | 0,200810136 | -0,731147402 |

Anexo 2. Datos de las Posibles Ubicaciones del UDC de la Ciudad de Saint-Étienne

En la Tabla 13 muestra las 5 Posibles Ubicaciones del UDC, que se trabajaron Fase 2 del Capítulo 3.

Tabla 13. 5 Posibles Ubicaciones del UDC – Fase 2

| 5 Ubicaciones Posibles para el UDC | | X-Y Coordenadas | |
|------------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------|
| N° | Dirección | X' | Y' |
| 1 | 6 RUE DE LA CONDITION, 42000 | -,03651505 | -0,47660476 |
| 2 | 8 RUE DENIS ESCOFFIER, 42000 | 0,23855935 | -0,5394215 |
| 3 | PL HOTEL DE VILLE, 42000 | 0,15343825 | -0,24898961 |
| 4 | 20 RUE LEON NAUTIN, 42000 | 0,56238249 | -0,70989073 |
| 5 | 4 SQ VIOLETTE, 42000 | 0,44402502 | -0,48965124 |

En la Tabla 14 muestra las 3 Posibles Ubicaciones del UDC adicionales para completar las 8, que se trabajaron en los Escenarios B y D del Capítulo 4.

Tabla 14.6 a 8 Posibles Ubicaciones del UDC – Escenarios B y D

| 6-8 Ubicaciones Posibles para el UDC | | X-Y Coordenadas | |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------|
| N° | Dirección | X' | Y' |
| 6 | 6 RUE BOUCHER DE PERTHES, 42000 | 0,02435199 | 0,22458769 |
| 7 | 10 RUE BOUCHER DE PERTHES, 42000 | 0,08480869 | 0,22972077 |
| 8 | 13 PL JEAN JAURES, 42000 | -0,15120285 | 0,04762950 |

En la Tabla 15 muestra las 4 Posibles Ubicaciones del UDC adicionales para completar las 12, que se trabajaron en el Escenario E del Capítulo 4.

Tabla 15. 9 a 12 Posibles Ubicaciones del UDC – Escenarios E

| 8-11 Ubicaciones Posibles para el UDC | | X-Y Coordenadas | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------------|
| N° | Dirección | X' | Y' |
| 9 | 1 RUE DE LA TOUR VARAN, 42000 | 0,24859287 | -0,95488037 |
| 10 | 5 RUE SAINT JEAN, 42000 | 0,28291395 | -0,33977971 |
| 11 | 14 RUE DE LA VILLE, 42000 | 0,04455753 | -0,53464430 |
| 12 | 45 RUE DES MARTYRS DE VINGRE, 42000 | 0,43069400 | -0,66809439 |