



Modelo logístico de recolección de llantas para la ciudad de Tunja

Logistic model of tire collection for the city of Tunja

Miguel Antonio Fonseca Villamil¹ Cesar Hernando Mesa Mesa²

Para citar este artículo: M.A. Fonseca y C.H. Mesa. "Modelo logístico de recolección de llantas para la ciudad de Tunja". *Revista Vínculos*, vol 14, no 2, julio-diciembre 2017, 108-118. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.13196>.

Recibido: 12-03-2017 / **Aprobado:** 23-03-2017

Resumen

En la ciudad de Tunja no se cuenta con fuentes de información e indicadores exactos que establezcan la cantidad de llantas usadas y desechadas en tiraderos clandestinos, patios de casas y centros de acopio, las cuales generan impacto negativo en el medio ambiente y la salud de los habitantes, evidenciando la necesidad de generar una solución logística. Se presenta una investigación de enfoque cuantitativo de tipo estudio de caso; en esta se utilizó el método CVRP, que consiste en el diseño de un conjunto de rutas de menor coste, donde cada cliente se visite una única vez por un único vehículo y todas las rutas comienzan y finalizan en un centro de gravedad. Como resultados se logró la caracterización y diseño de un modelo logístico, que integró la ubicación de punto de acopio, demanda, rutas de recolección, capacidades, como herramienta sólida y actualizada que generara alternativas ambientales para la ciudad.

Palabras clave: algoritmo, colección, CVRP, heurística, logística, neumáticos.

Abstract

In the city of Tunja there are no sources of information and exact indicators that establish the amount of tires used and discarded in clandestine dumps, house yards and storage centers, which generate negative impact on the environment and the health of the inhabitants, evidencing the need to generate a logistic solution. An investigation of quantitative approach of type applied as a case study is presented. The CVRP method was used, which consists of the design of a set of routes of lower cost, where each client is visited only once by a single vehicle and all routes begin and end at a center of gravity; as results, the characterization and design of a logistic model was achieved, which integrated the location of collection point, demand, collection routes, capacities, as a solid and updated tool that would generate environmental alternatives for the city.

Keywords: algorithm, collection, CVRP, heuristics, logistics, tires.

1. Ingeniero industrial, Universidad Nacional Abierta y a Distancia; especialista en Alta Gerencia de Mercadotécnica y estudiante de maestría en Ingeniería; docente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, contratista de la Oficina Asesora de Planeación, Alcaldía Mayor de Tunja. Correo electrónico: mfonsecavillamil@gmail.com, miguelantonio.fonseca@uptc.edu.co
2. Ingeniero industrial, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; magíster en Ingeniería; docente, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: cesar.mesa@uptc.edu.co

1. Introducción

La Resolución 1457 de 2010, establece que “la generación de residuos de llantas en Colombia de vehículos tipo liviano y pesado asciende aproximadamente a 61.000 toneladas por año” [1]; estas llantas son almacenadas en bodegas, techos, casas, lotes de tierra y espacios públicos, con consecuencias graves para el medio ambiente, salud humana y la economía.

De la misma forma, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con su objetivo de proteger y preservar el medio ambiente, regula el sistema de recolección y disposición final de las llantas usadas, así como las obligaciones de cada uno de los actores dentro de la cadena de abastecimiento. En la actualidad, en Colombia existen empresas que tienen como actividad principal el reciclaje de las llantas usadas y la comercialización de productos derivados de este reciclaje; así también, algunos subsectores económicos utilizan en forma inadecuada las llantas usadas como combustible en sus procesos productivos y grupos informales que hacen parte de la cadena de llantas usadas, las queman a cielo abierto para extraer el acero.

En el 2010, el periódico el Tiempo publicó un artículo donde menciona que los botaderos de llantas usadas en sitios baldíos y abandonados son nidos de insectos y animales que afectan la salud, dando lugar a enfermedades como el dengue que se ha reportado con 77 405 casos en el último año de los cuales 71 815 son de la variedad clásica y 5590 hemorrágica [2].

El Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, señala que las compañías importadoras, comercializadoras y productoras de llantas deben dar respuesta a la necesidad de tener un total control de las llantas usadas para evitar la contaminación del medio ambiente, dando cumplimiento a la legislación ambiental como la Resolución 1457, que en el artículo segundo dice:

los productores de más de 200 o más unidades al año de llantas de automóviles, camiones, camionetas,

buses, busetas y tracto-mulas hasta rin 22.5 pulgadas, así como las llantas no conformes deben responder por el retorno y la disposición final de este material de acuerdo con las normas ambientales del país [1].

Pero el cumplimiento de esta Resolución en la actualidad no se viene realizando ya que no hay A Así también, según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), para la ciudad de Tunja, Boyacá “se estima un crecimiento poblacional para el 2018 de 199.137 habitantes” [3], lo cual equivale al 12% sobre la población actual, proyectándose un aumento en el número de vehículos; la cantidad de residuos de llantas usadas, a su vez, empezará a crecer de manera progresiva, y si no se tienen preparadas unas herramientas y estrategias que permitan mitigar el impacto que puedan generar dichos residuos, podrá verse afectada de manera directa o indirecta la salud de la comunidad, el medio ambiente, imagen y sanidad de la ciudad. Por lo anterior, se ve la necesidad de desarrollar el estudio dentro del área del conocimiento que involucran la logística y cadena de suministro, áreas que, de acuerdo con Rivera y Velasco [4], se ha ido integrando cada día más en el mundo de la industrial, convirtiéndose en parte fundamental dentro de la planeación de las organizaciones, empresas y ciudades. Por otro lado, Montoya [5], define la cadena de suministro como:

un conjunto de actividades que comprenden desde la materia prima hasta la obtención de un producto terminado, considerando procesos logísticos de aprovisionamiento o entrada, transformación o interno, y distribución o salida, y la relación entre sus actores, las cuales tienen como objetivo satisfacer las necesidades de los clientes.

A su vez, dentro del estudio desarrollado por Camargo [6], en el que desarrolla un modelo de simulación, se considera importante que las empresas productoras lleven a cabo el proceso de recogida de llantas implementando un programa de logística inversa como una de sus funciones, para así dar

una adecuada eliminación a los residuos. Dentro de la logística usualmente se utilizan modelos matemáticos para dar solución a problemas de ruteo, asignación y distribución, encontrándose modelos como el TSP (del inglés, *Traveling Salesman Problem*) que consiste en la programación de visitas a clientes que desea realizar un agente viajero, viajando lo mínimo posible, por lo que se debe determinar una ruta que minimice la distancia total (o el tiempo o el costo) necesaria para visitar todas las zonas en la ciudad [7]; también se encuentra el VRP (del inglés, *Vehicle Routing Problems*), que, de acuerdo con Ghiani, Laporte y Mussmano [8], supone la existencia de un depósito central donde se encuentran cierta cantidad de vehículos, los cuales deben atender ciertos clientes distribuidos en la ciudad, buscando minimizar costos a través de una ruta óptima que empiece y finalice en el depósito. A su vez, Yousefikhoshbakht, Didehvar y Rahmati [9], establecen que:

el VRP implica el diseño de un conjunto de rutas de vehículos cada una de las cuales comienza y termina en un depósito. Estas rutas se utilizan para un conjunto de vehículos que proporcionan servicios a un conjunto de clientes con demandas conocidas

Con base en el soporte teórico presentado anteriormente, para el desarrollo de la investigación fue necesario generar el diagnóstico de la disposición final de los neumáticos de llantas usadas en la ciudad de Tunja, utilizando la encuesta como herramienta de recolección de información; de esta manera, se determinó la necesidad de diseñar un modelo logístico que generara un ruteo óptimo de recolección de dicho material. Por lo anterior, se determina la utilización de algoritmos matemáticos que permiten solucionar los problemas de distribución según la necesidad que se desee cubrir. “Dentro de los algoritmos matemáticos se encuentran 3 tipos, los algoritmos exactos, heurísticos y metaheurísticos” [10], que “son procedimientos genéricos de exploración del espacio de soluciones para problemas de optimización y búsqueda” [11].

Para la solución de este tipo de problemas mediante algoritmos, Castañeda [12], usa una computadora para contestar preguntas como: ¿cuántos caminos hay para...?, ¿listar todas las posibles soluciones para...?, ¿hay un camino para...?, usualmente implica la búsqueda exhaustiva dentro del conjunto de las soluciones potenciales, por eso los algoritmos que resuelven este tipo de problemas reciben el nombre de algoritmos exactos o de búsqueda exhaustiva. De esta manera, luego de analizar las características de la necesidad a solucionar, para el desarrollo de la investigación se seleccionó el algoritmo heurístico del VRP.

Al revisar el proceso que se ha venido llevando en la recolección y disposición final de llantas usadas en la ciudad de Tunja, se estableció que hasta el 2016 esta actividad estuvo a cargo de Corpoboyacá, como autoridad ambiental, junto con el apoyo de la Asociación Nacional de Empresarios (ANDI), Gobernación de Boyacá, Alcaldía de Tunja y la Policía Metropolitana de Tunja, entidades que organizaban campañas anuales de recolección de llantas usadas, residuos como insecticidas, computadores, bombillas, periféricos, pilas y medicamentos vencidos.

2. Metodología

La investigación que dio origen a este artículo se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, de tipo estudio de caso. Los alcances fueron de tipo descriptivo, a partir de estudios estadísticos sobre los vehículos, centros especializados y montañas especializadas de la ciudad de Tunja, con el fin de establecer los hábitos de uso y frecuencia de cambio de llantas por parte del usuario. Esta información se recolectó por medio de encuestas, dando como resultado la determinación de un índice de generación de llantas usadas y la totalidad de residuos generados. También se diagnosticó el impacto ambiental, el cual se dividió en dos partes fundamentales: la primera en la cuantificación de las llantas y la segunda la caracterización. Se realizó una estimación del número de llantas, considerando variables socioeconómicas que tuvieran

influencia en el parque automotor de Tunja, a partir de información suministrada por la Secretaría de Tránsito de Tunja y el Instituto de Tránsito de Boyacá (ITBOY), lográndose establecer la cantidad y tipo de vehículos.

De la misma manera, se aplicaron encuestas a propietarios de vehículos de la ciudad de Tunja, con el fin de conocer las diferentes prácticas de disposición de las llantas fuera de uso, los motivos por los cuales las entregan a los diferentes establecimientos que intervienen en la recolección y disposición de este tipo de residuos.

3. Resultados

Con el desarrollo de la investigación se logró el diseño del modelo logístico que ofrece una solución para la recolección de llantas usadas de la ciudad de Tunja. Se pudo determinar coordenadas, puntos de acopio, rutas, distancias y volúmenes que arroja la ciudad de este desecho, estableciendo, a su vez, el centro de gravedad o centro de acopio; la herramienta que se utilizó en el modelo fue un algoritmo heurístico VRP, el cual fue seleccionado de acuerdo con el entorno analizado.

Con base en la información recopilada mediante la aplicación de encuestas a propietarios de vehículos, establecimientos de venta y recolección de llantas y entidades públicas encargadas de tema en estudio, fue posible realizar la caracterización del proceso actual de venta y recolección de llantas en la ciudad de Tunja. Se identificaron 54 establecimientos que realizan o tienen vinculación con el manejo de llantas, la mayor parte corresponde a montallantas, seguido por Centros Serviteca; llama la atención que, los establecimientos de menor tamaño son los que realizan algún tipo de tratamiento a los residuos. Por otra parte, la mayor cantidad promedio de ventas mensual de llantas corresponde a los establecimientos de tipo Centros Serviteca.

Durante el desarrollo de la recolección de información fue posible percibir que siete de los 54 establecimientos no realizan recepción de llantas fuera de uso, resulta conveniente prescindir de dichos

establecimientos para el diseño del modelo logístico. Otro aspecto que se consultó fue sobre el conocimiento de la Resolución 1457 de 2010 y sus objetivos; los establecimientos de tipo concesionario en su totalidad tienen conocimiento, no obstante, este tipo de organizaciones representan una minoría en cuanto a venta y recolección de llantas, lo que permite concluir un alto nivel de desconocimiento respecto a la normativa. Finalmente, fue posible conocer el procedimiento realizado con las llantas fuera de uso que recolectan los establecimientos, una gran parte aseguraron entregar las llantas a la empresa de aseo urbano de la ciudad; sin embargo, la opción de respuesta “otro”, que corresponde a regalar dichas llantas a particulares, representó el 41,3%.

Otra fuente de información corresponde a la aplicación de 100 encuestas a propietarios de los vehículos, donde fue posible conocer su comportamiento en lo que se refiere a compra de llantas y su disposición cuando estas llegan al fin de su ciclo de uso. El primer aspecto correspondió a la frecuencia con la que los propietarios realizan cambio de llantas de sus vehículos; el mayor porcentaje de encuestados realiza cambio de llantas con una frecuencia anual, seguido por una frecuencia semestral.

Según el tipo de establecimiento u organización de preferencia para la compra de llantas, corresponde a los Centros Serviteca, con un 55%, seguido por almacenes de cadena con un 26%. Frente al procedimiento realizado con las llantas fuera de uso, es posible concluir que gran cantidad de las llantas son recolectadas en los establecimientos de venta y cambio de llantas; por otra parte, el 36 % de los propietarios de vehículos en la ciudad de Tunja optan por guardar las llantas fuera de uso en sus residencias.

Así también, se realizó el diseño y aplicación de una encuesta a la Alcaldía Mayor de Tunja en el área de desarrollo y a Corpoboyacá. Al realizar la recolección de información fue posible percibir un alto conocimiento en la normatividad respecto al tema de investigación. Las entidades aseguraron no tener alguna responsabilidad en la recolección

y gestión de llantas usadas, Corpoboyacá manifestó la ejecución de dos campañas realizadas cada año por parte de la Asociación Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) a quien corresponde dicha responsabilidad según Corpoboyacá; no obstante, dichas campañas fueron realizadas con el objetivo de recolectar cualquier material que pueda generar algún riesgo ambiental, es decir, actualmente no hay presencia de algún programa o campaña enfocado a la gestión de llantas fuera de uso.

4. Análisis de Resultados

4.1 Modelo logístico

Entendiendo que “la posibilidad de recuperar y aprovechar económicamente aquellos productos que dejan de satisfacer las necesidades del consumidor genera un flujo de materiales y productos, que por oposición al tradicional flujo logístico productor-consumidor, se denomina flujo inverso” [13], se plantea el diseño de un modelo para disposición de llantas usadas; para esto fue necesario hallar las coordenadas de cada uno de los establecimientos en estudio y la distancia entre cada coordenada.

El primer aspecto importante para el desarrollo del modelo es la determinación de un punto de almacenamiento que será ubicado de manera que los costos de transporte resulten óptimos. Chopra y Meindl [14], definen la determinación de este punto como “método del centro de gravedad que consiste en un algoritmo de localización de una instalación considerando otras existentes”; esta es una técnica muy sencilla y suele utilizarse para determinar la ubicación de bodegas intermedias y puntos de distribución teniendo en cuenta las distancias que las separan y el aporte (en términos de utilidad, producción o capacidad) de cada instalación.

Al determinar la ubicación del punto de almacenamiento, resulta necesario evaluar las condiciones del sitio, teniendo en cuenta algunas restricciones por las características de los productos a almacenar. Este método trabaja con un sistema de coordenadas como son las coordenadas geográficas

(latitud-longitud, coordenadas cartesianas y coordenadas de un municipio).

Las coordenadas utilizadas en el método deben tener como referencia a un punto de origen, y las fórmulas a utilizar para encontrar las coordenadas óptimas de la nueva localización son:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad C_y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Donde:

C_x Coordenda de la nueva instalación en x

C_y Coordenada de la nueva instalación en y

d_{ix} Distancia de la ubicación i en terminos de la coordenada x

d_{iy} Distancia de la ubicación i en terminos de la coordenada y

V_i Aporte de la ubicación i

La ubicación de las coordenadas encontradas mediante el método de centro de gravedad resultó no ajustarse a las características requeridas para el punto de almacenamiento, por lo cual fue necesario determinar una ubicación cercana ajustable al Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Tunja, esta ubicación ajustada corresponde a las coordenadas X, 682250,0 y Y, 611550,0. En la Figura 1 se encuentra la representación de coordenadas realizando ajuste de ubicación de punto de almacenamiento de llantas fuera de uso (CG) con base en el Plan de Ordenamiento Territorial.

Definidas las coordenadas del centro de gravedad, en la Tabla 1 se muestran los nombres, el número asignado a cada punto según el orden de visita al establecimiento y asignado por el GPS, las coordenadas bidimensionales Gauss-Kruger de cada uno de los establecimientos en estudio y la cantidad promedio de llantas fuera de uso recolectadas a la semana.

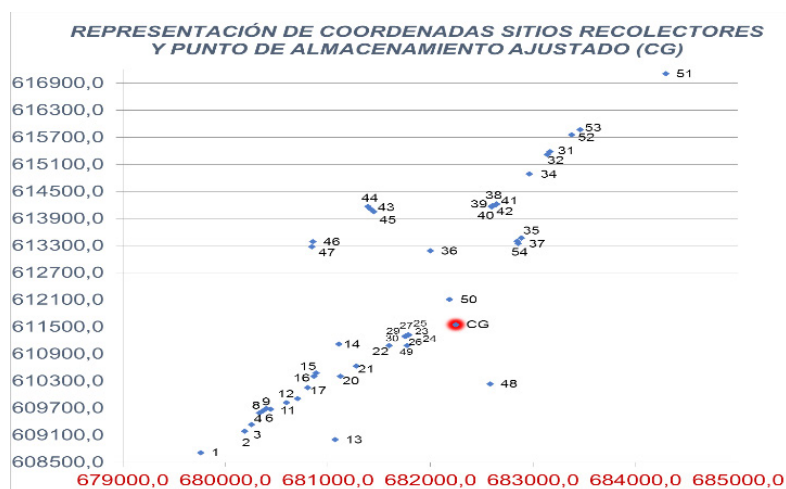


Figura 1. Coordenadas Ajustadas.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Coordenadas, cantidad promedio de llantas recolectadas y determinación de coordenadas para ubicación de punto de almacenamiento de llantas fuera de uso.

| Nombre | Punto | GPS | Este (X) | Norte (Y) | Cantidad llantas (und/sem) (V) | X*V | Y*V |
|---------------------------------|-------|-----|----------|-----------|-----------------------------------|------------|------------|
| Villa rosita | 1 | 566 | 679758,5 | 608712,2 | 12 | 8157102,0 | 7304546,5 |
| Casarana | 2 | 567 | 680189,8 | 609187,7 | 30 | 20405695,4 | 18275630,9 |
| Milenium montallantas | 3 | 568 | 680256,2 | 609335,7 | 1 | 680256,2 | 609335,7 |
| Hermanos salcedo | 4 | 570 | 680331,8 | 609596,1 | 5 | 3401658,9 | 3047980,7 |
| Reamic | 6 | 571 | 680372,1 | 609642,9 | 3 | 2041116,3 | 1828928,8 |
| Luberllantas | 8 | 573 | 680399,6 | 609692,2 | 5 | 3401997,8 | 3048461,0 |
| Correllantas | 9 | 574 | 680441,7 | 609675,4 | 40 | 27217668,6 | 24387016,1 |
| Servillantas k y d | 11 | 577 | 680596,3 | 609817,9 | 2 | 1361192,7 | 1219635,9 |
| Llantas Boyacá | 12 | 578 | 680702,6 | 609911,9 | 50 | 34035128,8 | 30495594,2 |
| Montallantas la avenida | 13 | 579 | 681070,2 | 608998,3 | 2 | 1362140,4 | 1217996,7 |
| Improllantas | 14 | 580 | 681105,3 | 611113,8 | 12 | 8173263,3 | 7333366,0 |
| Llantas y servicios jp | 15 | 581 | 680883,2 | 610477,5 | 6 | 4085299,2 | 3662864,8 |
| Multiservicios llantas y frenos | 16 | 582 | 680866,3 | 610400,8 | 2 | 1361732,7 | 1220801,6 |
| Good year auto race | 17 | 583 | 680801,5 | 610150,1 | 5 | 3404007,7 | 3050750,7 |
| Montallantas del oriente | 20 | 586 | 681124,0 | 610407,0 | 2 | 1362247,9 | 1220814,0 |
| Llantas jm | 21 | 587 | 681275,9 | 610632,5 | 10 | 6812759,1 | 6106324,8 |
| Japonesa de rines y llantas | 22 | 588 | 681597,9 | 611088,4 | 6 | 4089587,3 | 3666530,6 |
| Servillantas San Ignacio | 23 | 589 | 681789,9 | 611322,7 | 10 | 6817899,3 | 6113227,4 |
| Multillantas 2 | 24 | 590 | 681782,7 | 611322,5 | 4 | 2727130,9 | 2445290,0 |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|-----|-------------|-------------|-----|-------------|-------------|
| La playita | 25 | 591 | 681777,9 | 611313,3 | 10 | 6817778,8 | 6113133,1 |
| Centro llantas | 26 | 592 | 681769,7 | 611304,0 | 20 | 13635394,1 | 12226079,9 |
| Todo llantas | 27 | 593 | 681764,3 | 611298,3 | 7 | 4772350,0 | 4279088,4 |
| Montallantas servicio automático | 29 | 595 | 681757,0 | 611295,2 | 10 | 6817569,9 | 6112952,2 |
| Llantas promoregalo | 30 | 596 | 681750,4 | 611286,6 | 5 | 3408751,8 | 3056432,9 |
| Autollantas a y c | 31 | 615 | 683138,6 | 615315,8 | 10 | 6831386,1 | 6153157,8 |
| Rines y llantas Hellen | 32 | 616 | 683168,7 | 615377,5 | 10 | 6831686,9 | 6153774,6 |
| Alborautos | 34 | 614 | 682966,5 | 614887,0 | 1 | 682966,5 | 614887,0 |
| Incomotor Unicentro | 35 | 607 | 682885,3 | 613467,9 | 30 | 20486558,5 | 18404035,8 |
| Llantas la glorieta | 36 | 605 | 681999,7 | 613184,8 | 13 | 8865996,6 | 7971402,6 |
| Makro | 37 | 621 | 682857,2 | 613345,0 | 4 | 2731428,9 | 2453379,9 |
| Autorace | 38 | 608 | 682597,7 | 614158,9 | 15 | 10238965,5 | 9212382,9 |
| Oíl filtros | 39 | 609 | 682599,0 | 614169,5 | 3 | 2047797,0 | 1842508,4 |
| Energiteca | 40 | 610 | 682604,1 | 614184,9 | 13 | 8873852,7 | 7984403,3 |
| Autoya express acdelco | 41 | 611 | 682638,1 | 614207,3 | 30 | 20479143,5 | 18426219,0 |
| Tu llanta.com | 42 | 612 | 682647,4 | 614223,9 | 13 | 8874415,9 | 7984910,9 |
| Montallantas puente Restrepo | 43 | 597 | 681391,8 | 614165,5 | 4 | 2725567,3 | 2456661,9 |
| Montallantas naranjo | 44 | 598 | 681419,6 | 614104,6 | 20 | 13628391,6 | 12282092,2 |
| Montallantas limbania | 45 | 599 | 681445,8 | 614054,8 | 10 | 6814457,6 | 6140548,1 |
| Montallantas la fuente | 46 | 600 | 680855,8 | 613385,9 | 3 | 2042567,4 | 1840157,7 |
| Servitriana | 47 | 601 | 680842,5 | 613269,8 | 10 | 6808425,0 | 6132697,5 |
| Las peñitas parqueadero | 48 | 602 | 682582,2 | 610237,2 | 10 | 6825822,1 | 6102372,0 |
| Parqueadero Avenida Los patriotas | 49 | 603 | 681773,1 | 611086,3 | 10 | 6817730,8 | 6110862,6 |
| Montallantas el puente | 50 | 604 | 682188,1 | 612105,8 | 10 | 6821881,1 | 6121057,9 |
| Dinisan | 51 | 619 | 684294,4 | 617103,5 | 2 | 1368588,9 | 1234206,9 |
| Montallantas asis | 52 | 617 | 683377,3 | 615751,3 | 12 | 8200527,3 | 7389015,3 |
| Montallantas el gato | 53 | 618 | 683459,3 | 615865,0 | 13 | 8884970,7 | 8006244,6 |
| Jumbo | 54 | 620 | 682847,2 | 613394,9 | 20 | 13656944,7 | 12267897,9 |
| Punto de almacenamiento | CG | | 682250,0224 | 611550,0036 | | | |
| Total | | | | | 525 | 357889801,6 | 321327659,9 |

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecido un punto óptimo de almacenamiento mediante el método de centro de gravedad, es posible desarrollar el problema de enrutamiento de vehículos (VRP), con el cual se pretende diseñar un modelo de rutas que resulte óptimo y la distancia recorrida pueda ser reducida cuanto sea posible.

Dentro de la investigación se opta por aplicar el CVRP que, de acuerdo con Cordeau, Laporte, Savelbergh y Vigo [15], consiste en:

diseño de un conjunto de rutas hamiltonianas de menor coste de tal manera que cada cliente ha de

ser visitado una única vez por un único vehículo y todas las rutas de los vehículos han de comenzar y finalizar en el almacén.

La formulación de programación lineal entera del CVRP, está dada para cada borde $e \in E$ la variable entera x_e indica el número de veces el borde e se atraviesa en la solución. Sea $r(S)$ el número mínimo de vehículos necesarios para atender a los clientes de un subconjunto de clientes. El valor de $r(S)$ puede determinarse resolviendo un problema de embalaje bin (BPP), asociado con el conjunto de elementos S y los depósitos de capacidad Q . Finalmente, para $S \subset V$, seamos $\delta(S) = \{(i, j) :$

$i \in S, j \notin S \text{ o } i \notin S, j \in S\}$. Si $S = \{i\}$, entonces simplemente escribimos $\delta(i)$ en su lugar de $\delta(\{i\})$. La formulación CVRP es entonces:

(CVRP1) minimice (1)

$e \in E \text{ cexe subject to (2)}$

$e \in \delta(i) \text{ } x_e = 2 \text{ } i \in V \setminus \{0\} \text{ (3)}$

$e \in \delta(0) \text{ } x_e = 2m \text{ (4)}$

$e \in \delta(S) \text{ } x_e \geq 2r(S) \text{ } S \subseteq V \setminus \{0\} \text{ } S = \emptyset \text{ } x_e \in \{0, 1\} \text{ } e \in \delta(0) \text{ (5)}$
 $x_e \in \{0, 1, 2\} \text{ } e \in \delta(0) \text{ (6)}$

Previo al diseño del modelo, fue posible percibir una distancia corta entre algunos establecimientos, por lo cual resultó recomendable realizar agrupación por zonas para algunos establecimientos de manera que se realice un diseño de VRP para establecimientos que se encuentren a corta distancia. El agrupamiento de los establecimientos por zonas requiere determinar una sola coordenada que represente los establecimientos que conforman dicha zona, la Tabla 2 muestra las coordenadas del establecimiento que representa la zona correspondiente que conforman el modelo de ruteo del problema en estudio.

Tabla 2. Definición de zonas en un solo punto.

| NOMBRE | PUNTO | ZONA | GPS | CANTIDAD LLANTAS (und/sem) (V) | ESTE (X) | NORTE (Y) |
|---------------------------------|-------|---------------|-----|--------------------------------|-----------|-----------|
| Villa rosita | 1 | ZONA 1 (Z1) | 566 | 12 | 679758.50 | 608712.21 |
| Casarana | 2 | ZONA 2 (Z2) | 567 | 31 | 680189.85 | 609187.70 |
| Hermanos salcedo | 4 | ZONA 3 (Z3) | 570 | 53 | 680331.79 | 609596.14 |
| Llantas Boyaca | 12 | ZONA 4 (Z4) | 578 | 52 | 680702.58 | 609911.88 |
| Montallantas la avenida | 13 | ZONA 5 (Z5) | 579 | 2 | 681070.19 | 608998.35 |
| Improllantas | 14 | ZONA 6 (Z6) | 580 | 12 | 681105.28 | 611113.84 |
| Multiservicios llantas y frenos | 16 | ZONA 7 (Z7) | 582 | 8 | 680866.34 | 610400.79 |
| Good year auto race | 17 | ZONA 8 (Z8) | 583 | 5 | 680801.54 | 610150.13 |
| Montallantas del oriente | 20 | ZONA 9 (Z9) | 586 | 2 | 681123.95 | 610407.02 |
| Llantas jm | 21 | ZONA 10 (Z10) | 587 | 10 | 681275.91 | 610632.48 |
| Japonesa de rines y llantas | 22 | ZONA 11 (Z11) | 588 | 11 | 681597.88 | 611088.43 |
| Multillantas 2 | 24 | ZONA 12 (Z12) | 590 | 14 | 681782.73 | 611322.50 |
| Servillantas san ignacio | 23 | ZONA 13 (Z13) | 589 | 57 | 681789.93 | 611322.74 |
| Rines y llantas hellen | 32 | ZONA 14 (Z14) | 616 | 20 | 683168.69 | 615377.46 |
| Alborautos | 34 | ZONA 15 (Z15) | 614 | 1 | 682966.52 | 614887.00 |
| Llantas la glorieta | 36 | ZONA 16 (Z16) | 605 | 54 | 681999.74 | 613184.82 |
| Makro | 37 | ZONA 17 (Z17) | 621 | 13 | 682857.23 | 613344.98 |
| Autorace | 38 | ZONA 18 (Z18) | 608 | 31 | 682597.70 | 614158.86 |
| Tu llanta.com | 42 | ZONA 19 (Z19) | 612 | 43 | 682647.38 | 614223.92 |
| Montallantas naranjo | 44 | ZONA 20 (Z20) | 598 | 34 | 681419.58 | 614104.61 |
| Servitriana | 47 | ZONA 21 (Z21) | 601 | 13 | 680842.50 | 613269.75 |
| Las peñitas parqueadero | 48 | ZONA 22 (Z22) | 602 | 10 | 682582.21 | 610237.20 |
| Montallantas el puente | 50 | ZONA 23 (Z23) | 604 | 10 | 682188.11 | 612105.79 |
| Dinisan | 51 | ZONA 24 (Z24) | 619 | 2 | 684294.43 | 617103.47 |
| Montallantas asis | 52 | ZONA 25 (Z25) | 617 | 25 | 683377.28 | 615751.28 |
| CENTRO DE GRAVEDAD | CG | CG | | 525 | 682250.02 | 611550.00 |

Fuente: elaboración propia.

Una vez definidas las zonas que conformaran el modelo de ruteo, fue necesario obtener las distancias de todas las coordenadas entre sí, al igual que las distancias de cada zona al punto de almacenamiento recomendado, para lograr alcanzar un modelo de ruteo que proporcione la menor distancia en todos los recorridos. Respecto a la evaluación del modelo de ruteo mediante el programador Visual Basic de Excel, se realizó el traslado de las coordenadas del punto de almacenamiento a la coordenada (0,0) con el objetivo de convertir las coordenadas bidimensionales Gauss Kruger halladas mediante GPS a cartesianas, con base en la teoría de sistemas de coordenadas; lo anterior con el fin de facilitar el cálculo de los ángulos de cada zona con respecto al punto de almacenamiento. Con base al teorema de Pitágoras se realizó el cálculo de los ángulos en grados y posteriormente se realizó la conversión a radianes.

Por otra parte, con el fin lograr evaluar los VRP fue necesario establecer algunas características para el modelo con lineamientos que determinan los límites de la evaluación de los modelos y otras que corresponden a características previamente establecidas en el estudio. Se determinaron y ordenaron las zonas a partir de la zona de menor ángulo hasta la zona de mayor ángulo, con el fin de iniciar la evaluación del VRP en el punto o establecimiento con menor ángulo respecto al punto de almacenamiento, evaluando los modelos de ruteo teniendo en cuenta los veinticinco posibles inicios, es decir, las veinticinco zonas establecidas.

Finalmente, se obtuvo la distancia que se consideraría recorrida en cada uno de los posibles modelos de ruteo, se identificaron los cinco modelos de ruteo de menor recorrido en metros, como se observa en la Tabla 3, conforme a lo anterior, el modelo de ruteo correspondiente al inicio en la zona diecinueve resulta como el más conveniente según el estudio realizado.

De acuerdo con los modelos de ruteo establecidos anteriormente, en la Tabla 4 se relaciona el resultado con el orden de los clústeres, la ruta óptima, las cantidades a recoger, con sus respectivas distancias. Según Fernández y Allende [16]:

Tabla 3. Modelos de ruteo de mayor conveniencia según estudio.

| Modelo de ruteo | Distancia |
|-----------------|-----------|
| 19 | 61600,64 |
| 20 | 61868,45 |
| 1 | 62556,16 |
| 15 | 62653,45 |
| 18 | 64174,22 |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los modelos de ruteo establecidos anteriormente, en la Tabla 4 se relaciona el resultado con el orden de los clústeres, la ruta óptima, las cantidades a recoger, con sus respectivas distancias. Según Fernández y Allende [16]:

al diseñar las rutas es necesario tener en cuenta que la carga del vehículo es una mezcla entre la mercancía recogida en los clientes ya visitados y la que todavía falta por entregar. En ningún punto del recorrido la carga puede exceder la capacidad del vehículo.

Siguiendo con el desarrollo del modelo, se tuvo en cuenta el método de barrido que de acuerdo con Olivera [17], “establece que los clústeres se forman girando una semirrecta con origen en el depósito e incorporando los clientes “barridos” por dicha semirrecta hasta que se viole la restricción de capacidad”, lográndose este objetivo con la ruta diecinueve.

Tabla 4. Modelo de ruteo diecinueve. Inicio = zona ocho.

| Clúster | Recorrido | Número de llantas | Distancia |
|--------------|-------------------------|-------------------|-----------|
| 1 | CG-13-12-11-10-7-8-6-CG | 117 | 4415,40 |
| 2 | CG-21-20-18-16-23-CG | 101 | 15286,22 |
| 3 | CG-19-15-14-25-CG | 89 | 16482,60 |
| 4 | CG-17-24-22-5-2-1-CG | 111 | 19587,30 |
| 5 | CG-9-4-3-CG | 107 | 5829,12 |
| Total | | 525 | 61600,64 |

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Se identifica que, en la actualidad, la recolección de las llantas usadas en la ciudad de Tunja no tiene un proceso claro ni herramientas que impidan los malos manejos que se están presentando con estos desechos, generando falencias en la cultura ciudadana sobre el cuidado del medio ambiente. Dentro de la investigación se determinó también que los entes administrativos municipales no realizan un seguimiento continuo sobre el control de la disposición y la recolección final del neumático de llantas usadas, incumpliendo con la Resolución 1457 de 2010, que obliga a los entes gubernamentales a exigir las obligaciones que tiene los actores que distribuyen e intervienen dentro de la cadena de abastecimiento.

De acuerdo con la aplicación del Modelo VRP y los nodos de recolección de las llantas usadas, se realiza la agrupación segmentada entre ellos para tener ruta óptima que minimiza los costos y las distancias a recorrer entre cada recogida. El resultado del diseño del modelo generó la ruta óptima de recolección que presenta la menor distancia, mostrando cada grupo con su respectiva ruta y cantidad de llantas usadas a recoger, para generar el cronograma de recogida de acuerdo con la necesidad.

Con el resultado del modelo se logró obtener mayor claridad sobre cómo poder utilizar los algoritmos matemáticos dentro de la logística, buscando encontrar la solución a un problema de la falta de recolección de desechos no aptos para el medio ambiente

Referencias

- [1] República de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo, "Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones". Resolución N 1457, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.
- [2] El tiempo, "Brasil y Colombia, los más golpeados por dengue". 29 de mayo de 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-3987427>
- [3] DANE, "Estimaciones de Población 1985-2005 y proyecciones de Población 2005-2020 total Municipal por área". Mayo de 2017, [En línea]. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- [4] M. Rivera y V. Velasco, "Desarrollo de un modelo de distribución urbana de mercancías con plataformas logísticas aplicados a la ciudad" *Ing. USBMed*, vol. 5, no. 1, 2014, pp. 67-76.
- [5] R. Montoya, "Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad". *Producción más limpia*, vol. 5, no. 2, 2010, pp. 1-14.
- [6] S. Camargo, J. A. Franco, V. L. Chud y J. C. Osorio, "Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa de las llantas". *Ingeniería y desarrollo*, vol. 35, no. 2, 2017, pp. 357-381.
- [7] F. Sandoya, "Métodos Exactos y heurísticos para resolver el problema del agente viajero (TSP) y el problema de ruteo de vehículos (VRP)". Decimocuartas jornadas en estadística e informática, Guayaquil, Ecuador. 2010.
- [8] G. Ghiani, G. Laporte, y R. Mussmano, R., "Introduction to Logistics Systems Planning and Control". Chichester: Jhon Wiley & Sons, Ltd. England. 2004, pp. 1- 377.
- [9] M. K. Yousefikhoshbakht, F. Didehvar, & F. Rahmati, "An Efficient Solution for the VRP by Using a Hybrid Elite Ant System". *International Journal of Computers, Communications & Control*, vol. 9, no. 3, 2014, pp. 340-347.
- [10] C. Rodríguez, "Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores". Tesis de Pregrado, Universidad Rey Juan Carlos, España, 2010.
- [11] A. Olivera, "Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos". Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2004, pp. 1-63

- [12] C. Castañeda, "Estudio comparativo de diversos métodos de solución del problema del agente viajero (PAV)". Tesis de Maestría, Universidad de las Américas Puebla, México, 2000.
- [13] L. Mora, M. Martín, "Logística inversa y ambiental: retos y oportunidades en las organizaciones modernas". Bogotá, D.C.: Ecoe Ediciones. 2013
- [14] S. Chopra y P. Meindl, "Administración de la cadena de suministro. estrategia, planeación y operación". México: Pearson, quinta edición, 2008.
- [15] J. Cordeau, G. Laporte, M. Savelsbergh, D. Vigo, "Vehicle Routing". *Handbook in OR & MS*, vol. 14. Ch. 6, Elsevier B.V. 2007.
- [16] A. Fernández, A. Allende. "Estrategia Grasp para el Problema de Enrutamiento de Vehículos con Recogida y Entrega Simultánea". *Investigación Operacional*, vol. 38, no. 4, 2017, pp. 424-434.
- [17] A. Olivera. "Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos". Instituto de Computación. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República, Montevideo. Uruguay. 2004

