

MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS COMO ALTERNATIVA DE TRANSPORTE, ESTUDIO DE CASO: UMNG SEDE CAMPUS¹

María Alejandra Enciso Caicedo ¹, Wilfrido Arteaga Sarmiento ², Nataly Lorena Guarín Cortés ³

¹Estudiante de ingeniería Industrial. Auxiliar de Investigación Grupo GREC. u5800010@unimilitar.edu.co

²Magister en Gestión de la Información y la Documentación. Docente de Planta. Investigador Grupo GREC. wilfrido.artega@unimilitar.edu.co

³Ingeniera Industrial. Docente de Planta. Investigador Grupo GREC. nataly.guarin@unimilitar.edu.co

^{1,2,3} Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia

RESUMEN

El crecimiento acelerado de la población académica en la Universidad Militar Nueva Granada y las condiciones de movilidad poco favorables de los miembros de la comunidad hacia la Sede Campus Nueva Granada, motivaron el desarrollo del proyecto de investigación aplicando metodologías de solución para un problema de ruteo de vehículos CVRP-HF. Haciendo uso de herramientas software, principios de programación matemática y procesos heurísticos, se hace seguimiento a una metodología, iniciando con un proceso de recolección de información y caracterización de variables, seguido por el diagnóstico del escenario. Posteriormente, se implementa un modelo de ruteo hacia la sede, validado y verificado por medio de comparaciones en la simulación del sistema real. Como aporte principal, en este artículo se propone un procedimiento eficiente para el caso de estudio y el planteamiento de un modelo de ruteo, maximizando los beneficios, eliminando dificultades y agregando valor a los servicios ofrecidos por la Universidad.

Palabras clave: Modelo, Ruteo, Localización, VRP

Recibido: 04 de abril de 2018. Aceptado: 11 de noviembre de 2018

Received: April 4th, 2018. Accepted: November 11th, 2018

VEHICLE ROUTING MODEL AS A TRANSPORTATION ALTERNATIVE, CASE OF ESTUDY: UMNG SEDE CAMPUS

ABSTRACT

The intensive growth of the academic population in Campus of Military University Nueva Granada and the slightly favorable conditions of mobility of the members of the community towards the Campus Nueva Granada, motivated the development of the research project applying methodologies of solution for a problem of routing of vehicles CVRP-HF. Using tools software, mathematical programming principles and heuristic processes, a methodology is followed up, starting with a process of information collection and characterization of variables, followed by the diagnosis of the scenario. Subsequently, a routing model is implemented towards the headquarters, validated and verified by means of comparisons in the simulation of the real system. As a main contribution, this article proposes an efficient procedure for the case study and the approach of a routing model, maximizing the benefits, remove difficulties and adding value to the services offered by the University.

Keywords: Model, Routing, Localization, VRP.

Cómo citar este artículo: M. A. Enciso Caicedo, W. A. Sarmiento, N. L. Guarín Cortés, "Modelo de ruteo de vehículos como alternativa de transporte, estudio de caso: UMNG sede campus", *Revista Politécnica*, vol. 14, no. 27 pp.45-56, 2018. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n27a5>

¹ Producto derivado del proyecto de investigación No.2395: "Diseño de un modelo de ruteo de vehículos: Caso de Estudio UMNG sede Campus" financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada. Vigencia 2017.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante la construcción del Campus Nueva Granada en proximidades de la cabecera municipal de Cajicá y entrada en funcionamiento desde el 2011, la Universidad Militar Nueva Granada – UMNG, expande la planta física, dando inicio a la transición de actividades de la Sede Calle 100, ampliando la oferta académica y generando un gran interés en la población del Distrito Capital y la región Sabana Centro [1].

La ubicación del Campus impactó en mayor medida la movilidad de estudiantes, docentes y personal administrativo residentes de Bogotá, ya que aspectos como tiempos, costos, capacidad, satisfacción, condiciones viales y accesibilidad a medios de transporte, se convierten en inconvenientes diarios, para poder llegar a la Sede en los horarios de mayor demanda de transporte. Según la Secretaria de Movilidad cada día un bogotano pasa 125 minutos en el tránsito: son 41 horas mensuales o 500 horas anualmente. Es decir, casi 21 días en un carro o en un bus cada año [2]. Más allá del tiempo y el dinero, la falta de rutas en el sistema de transporte universitario genera ineficiencia y sanciones a los miembros de la comunidad por llegadas tarde, deterioro de la calidad de vida por estrés y enfermedades asociadas; y por otra parte problemas aún más significativas como la pérdida de clientes potenciales para la Institución.

A pesar de las estrategias de la universidad por mejorar la movilidad desde y hacia Bogotá por medio de un convenio con el Tren de la Sabana [3] el aumento de la demanda de personas es tan considerable que este transporte baja su capacidad y funcionalidad, aumentando los tiempos de movilidad e incomodando el traslado de sus usuarios.

De esta manera surge el interés de diseñar un sistema de apoyo para la movilidad de la población hacia y desde la Universidad, en su Sede Campus, optimizando costos y el servicio prestado, mediante la aplicación de la investigación de operaciones, principios de programación matemática y procesos heurísticos. A través de prácticas, aplicaciones y estudios desarrollados desde 1959 con Dantzing y Ramser, se demuestra la importancia de hallar soluciones a problemas de ruteo vehicular. Es por esto que el VRP se considera como la base y una

de las herramientas efectivas para la toma de decisiones en este caso de estudio.

El modelo de transporte recibe su nombre porque típicamente se aplica a resolver problemas de distribución de mercancías desde distintos centros de producción a diferentes centros de consumo [4]. La optimización de costos, el mejoramiento continuo y la entrega de un completo servicio de calidad al cliente [5], son algunos de los muchos beneficios que la adecuada planeación de un sistema de distribución puede generar a una institución de servicios educativos como la UMNG. De esta manera se fortalece la idea de que el factor clave hoy en un mundo globalizado es la diferenciación [6].

2. MÉTODO

El estudio y análisis de la información se desarrolló de manera detallada en la ciudad de Bogotá. A lo largo del documento se plantean las condiciones específicas que caracterizan el estado actual del sistema de transporte de la Universidad y que son de gran relevancia para adecuar el diseño de un modelo de ruteo de manera óptima. Para llegar al objetivo final se sigue un modelo experimental conformado por las etapas: identificación y sustento teórico, diagnóstico, diseño del modelo matemático, escenarios, simulación y análisis de resultados.

2.1 Identificación y sustento teórico

Como primera instancia se hace la revisión de la información relevante para analizar el panorama general en el que se encuentra la temática de investigación. Los temas directamente relacionados con el desarrollo de la investigación se presentan concretamente a continuación.

Diferentes conceptualizaciones y extensiones de los modelos VRP (Vehicle Routing Problem) han derivado en una serie de “submodelos” con combinaciones de capacidad, flota, tiempo, costo, origen/destino, entre otros; direccionados a optimizar sistemas logísticos basados en la movilidad y transporte [7]. El origen del VRP viene desde el año de 1959 y es introducido por Dantzing y Ramser, los cuales representaron una aplicación real relacionada con la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron la formulación matemática a este problema, el cual surge como una generalización del problema clásico el agente viajero (TSP) en el que un vendedor tiene que

recorrer una serie de clientes una sola vez, para luego volver al lugar de partida. Se considera al VRP como un problema que empieza en un almacén o bodega central, la cual cuenta con una flota de vehículos que debe atender a un conjunto de clientes dispersos en una zona geográfica. El objetivo del VRP es entregar bienes a este conjunto de clientes con demandas conocidas, al mínimo costo, encontrando las rutas óptimas que se originan y terminan en el almacén. Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez, para lo cual se los asigna a los vehículos que llevarán la carga (demanda de los clientes que visitará) sin exceder su capacidad máxima de transporte [8].

En los problemas reales de VRP aparecen muchas restricciones y consideraciones dentro del modelado, entre las que cabe citar:

- Combinaciones de variables estocásticas.
- Las entregas son periódicas o no.
- Los clientes tienen que ser visitados dentro de una determinada franja horaria.
- Los puntos de suministro son sencillos o múltiples.
- Los vehículos atienden a varios clientes.
- Los vehículos tienen capacidad limitada.

Esto ha dado como resultado la modelación de diferentes variantes del problema clásico de ruteo (VRP).

2.1.1 Problema de ruteo de vehículos (VRP)

Un Problema de Ruteo de Vehículos consiste en, determinar un conjunto de rutas que comiencen y terminen en los depósitos dispersos geográficamente, para que los vehículos visiten a un conjunto de clientes, con una flota de vehículos determinada [9]. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como diferentes restricciones operativas sobre las rutas, dan lugar a diferentes variantes del problema, tal como se observa en la Figura 1 (Fig. 1).

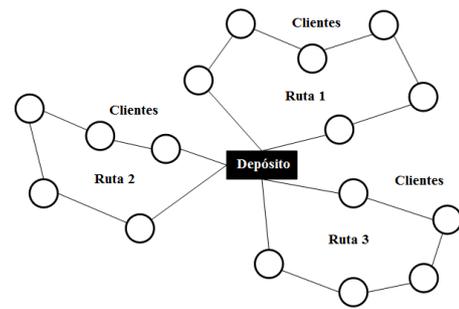


Fig. 1. Esquema de un VRP

Fuente: Adaptación, basada en P. Kilby, P. Prosser, and P. Shaw (1998)

Dentro de la literatura se pueden encontrar diferentes modelos del VRP, como se observa en la taxonomía (Fig. 2.), adicionalmente existen diferentes tipos de problemas que se encuentran determinados por los valores que pueden tomar los parámetros o variables que componen el problema [10]. Los principales problemas de ruteo que se relacionan con el caso de estudio se presentan a continuación.

- Rutas para vehículos con capacidad de carga CVRP. Debido a que se tiene un grupo de personas distribuidas geográficamente en unas zonas determinadas, separadas del punto de llegada a una distancia conocida, recogidos por vehículos homogéneos con capacidad limitada [11].
- Ventanas de tiempo VRPTW. El objetivo es minimizar la flota, los tiempos y costos relacionados al viaje. Para brindar un mejor servicio, se manejan ventanas de tiempo angostas, beneficiando a los clientes al disminuir los tiempos de espera [12]. En [13] establece que el servicio de cada cliente debe iniciar dentro de una ventana de tiempo asociada y el vehículo debe detenerse en el centro de consumo por instantes de tiempo.
- VRP con entrega dividida SDVRP. Es una relajación del VRP donde se permite que el mismo cliente pueda ser servido por diferentes vehículos, si esto reduce el costo total. En [14], se establece que esta condición es importante si los tamaños de los pedidos de los clientes llenan la capacidad del vehículo. Esta relajación es muy importante si los tamaños de las órdenes de los clientes son muy grandes en comparación con la capacidad de los vehículos [15].
- VRP con demandas estocásticas VRPSD. Es una variación del CVRP donde cada demanda

o exigencia de los clientes es incierta. En ocasiones también se asume que los requerimientos reales de los clientes sólo se conocen cuando el vehículo llega a la ubicación del cliente [16].

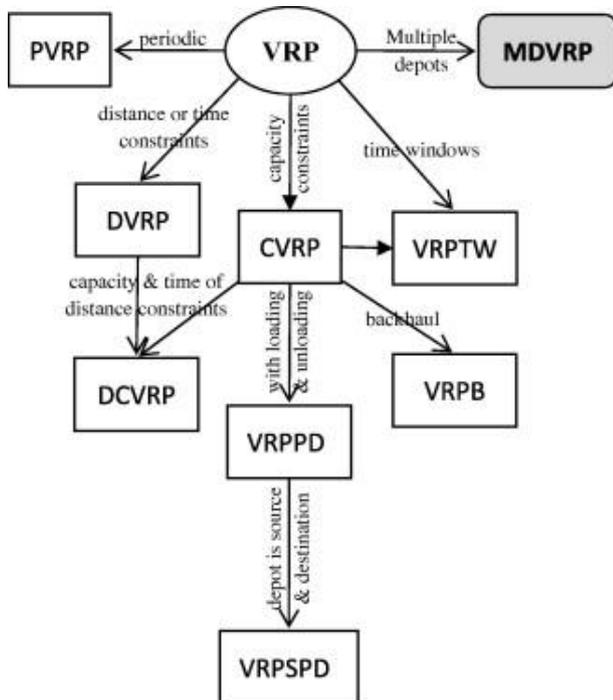


Fig 2. Taxonomía VRP.
Fuente: Montoya, López y Felizzola. 2015.

2.1.2 Problema del agente viajero (TSP)

La mayor parte de los problemas de ruteo de vehículos son generalizaciones del TSP, el cual constituye la situación general y de partida para formular otros problemas combinatorios más complejos, aunque más prácticos como el aplicado en este caso, el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea. En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera, no se distinguiría de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales [17].

2.1.3 Problema de m agentes viajeros, m-TSP

Este problema es una generalización del TSP en la cual se tienen un depósito y m vehículos o agentes. El objetivo es construir exactamente m rutas, una

para cada vehículo o agente, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos o agentes. Cada ruta debe comenzar y terminar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes, esto se determina mediante la solución de BPP y una formulación de programación lineal [18].

2.1.4 Problema de enrutamiento de vehículos con limitación de capacidades y flota homogénea (CVRP-HF)

El CVRP-HF por sus siglas en inglés, *capacitated vehicle routing problem with homogenous fleet*, se considera un problema de optimización combinatoria al que gran variedad de investigadores han dedicado sus exploraciones para encontrar diversos métodos para abordarlos. El CVRP-HF pertenece a la clase de problemas NP-completos clasificados en el nivel de complejidad como los más difíciles de resolver, por tal motivo no existe un algoritmo de tiempo polinomial que pueda resolverlos óptimamente [19]. Matemáticamente, una instancia $I = (G, C, T, D, F)$ del CVRP-HF se puede definir como una extensión del m-TSP, dado un grafo dirigido $G = (V, E)$, donde V es el conjunto de nodos que representan las ciudades o clientes y E es el conjunto de arcos que los conectan, relacionados con la matriz de costos $C = (c_{ij})$, de tamaño $N \times N$, de modo que cada arco tiene asignado un costo c_{ij} . D es un arreglo de la forma (p_i) que especifica la información de demanda de cada cliente. F es un arreglo de la forma (P_k) que contiene los datos de capacidad máxima de los vehículos. La flota está compuesta por M vehículos, es decir, $1 \leq k \leq M$. El problema tiene el objetivo de encontrar una matriz $X=(x_{ijk})$, de tamaño $N \times N \times M$, donde las variables binarias x_{ijk} indican si el arco (i, j) se utiliza en la solución para ser visitado por k. El problema de PLE es como se observa en la figura 3 (Fig. 3):

$$\min \sum_{i=0} \sum_{j=0} \sum_{k=1} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijk} \leq M \quad i = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=0}^N x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in [1, N] \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ijk} = \sum_{i=1}^N x_{ijk} \quad \forall k \in \{1, M\}, \quad i = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p_i x_{ijk} \leq P_k \quad \forall k \in \{1, M\} \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \in S}}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \in S}}^N x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq (V - \{0\}), \quad |S| \geq 2, \quad k \in \{1, M\} \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in \{1, M\} \quad (7)$$

Fig. 3. Modelo matemático de programación lineal CVRP-HF

La restricción (1) indica que del centro de distribución deben partir máximo M vehículos. Las restricciones (2) y (3) garantizan que uno y solo un vehículo visite y abandone cada cliente formando por cada ruta un TSP. La ecuación (4) muestra restricciones de capacidad vehicular en términos de peso, de acuerdo con lo sugerido por Dantzig y Ramser (1959); determinar el conjunto pi que no sobrepase pk se denomina problema de empaquetamiento en compartimentos (BPP por sus siglas en inglés). Finalmente, los conjuntos de restricciones (6) y (7) establecen, respectivamente, la inexistencia de subrutas inconexas y los valores admisibles para las variables de decisión [20].

2.1.4.1 Flota Homogénea

Se considera un OVRPCD (problema de ruteo de vehículos abierto con cross-docking), los clientes son visitados una sola vez y las entregas deben realizarse en un periodo de tiempo determinado, la solución propuesta por Vincent, Jewpanya, & Redi, es una programación lineal entera mixta que determina el numero óptimo de vehículos necesarios y las rutas correspondientes que minimiza el costo total sin violar las llegadas

simultaneas en las instalaciones del cross-docking. Adicional se encontró un artículo donde los vehículos deben recoger los productos y llevarlos a sus destinos.

Otros autores [21] proponen una formulación para los sistemas entre muelles y también seleccionan la ruta y la asignación de la puerta de la plataforma. Obteniendo una reducción en el costo total de rutas y en tiempo total de distribución. Otro algoritmo que se plantea para la solución de un VRP es un híbrido meta heurístico K-means, propuesto por Korayem, Khorsid, & Kassem [22], que se divide en dos fases, en la primera se dividen los clientes en grupos y en la segunda se busca la mejor ruta para visitarlos. Disminuyendo la distancia total del recorrido por todos los vehículos satisfaciendo las limitaciones de capacidad y restricciones de flujo logístico. Una variante que se encontró, la realizaron Kepaptsoglou, Fountas, & Karlaftis [23] con un modelo estocástico para el enrutamiento de portacontenedores que realizan entregas y recogidas quienes tuvieron en cuenta las condiciones climáticas y consideran limitaciones de tiempo, formulando un algoritmo genético, en la red de islas donde se implementó el modelo se evidencia que una pequeña flota es suficiente bajo la influencia de retrasos menores.

Otros artículos, analizan el diseño de una cadena de suministro donde el objetivo es seleccionar un subconjunto de depósitos para abrir teniendo en cuenta una demanda determinística, proponen una hibridación entre generación de columnas, relajación de LaGrange y búsqueda local dentro de un procedimiento heurístico, obteniendo un diseño óptimo de la cadena de suministro teniendo en cuenta el inventario y el transporte y un ahorro en costos en cuanto a los medios utilizados. Por otra parte Ewbank, Wanke, & Hadi-Vencheh [24] analizan y predicen el parámetro de borrosidad de una técnica de agrupamiento difuso aplicado al VRP con flota homogénea, mediante un algoritmo de asignación que redistribuye los puntos de demanda entre los grupos en función de los grados de pertenecía teniendo en cuenta la capacidad de carga, los resultados mostraron una relación entre los parámetros adecuados de borrosidad y las demandas de cada punto y las distancias de depósito central a cada cliente. Por último, Derrouiche, Moutaoukil, & Neubert [25] se evalúa el problema de enrutamiento de vehículos (FSMVRP) para tener en cuenta la parte social como la ambiental, donde empresas medianas y pequeñas

deben unirse para poder solucionar sus problemas de flotas, desarrollaron una formulación matemática exacta con experimentos computacionales usando CPLEX, dependiendo de la composición de la flota se pueden obtener una mejora en los costos económicos, medioambientales o sociales.

2.1.5 Métodos clásicos de solución

La mayoría de estos métodos están clasificados como algoritmos exactos o de optimización. Los algoritmos exactos son los que producen una solución óptima empleando varias técnicas como ramificación y acotamiento, planos cortantes y programación lógica de restricciones que permiten explorar el espacio de búsqueda. Aunque técnicamente con estos algoritmos es posible resolver problemas de cualquier tamaño, en la práctica real no lo es, debido a la variedad de posibles soluciones para cualquier problema de tamaño razonable. A diferencia de un enfoque algorítmico exacto, un método de optimización no tiene una base de matemática formal que lo sustente, es desarrollado más o menos por intuición, en las que se encuentran las técnicas heurísticas y metaheurísticas [26].

Las técnicas más utilizadas para la solución de VRP se encuentran relacionadas con heurísticas y metaheurísticas debido a que ningún algoritmo exacto puede garantizar y encontrar rutas óptimas dentro de un tiempo de cálculo razonable, cuando el número de puntos de entrega o nodos es considerable [20]. Lo anterior, es confirmado por Arias [11], quien indica que los problemas de CVRP son de tipo “NP-Hard” por lo que las soluciones óptimas salen como resultado de modelos heurísticos y metaheurísticos.

La idea más genérica del término heurística está relacionada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales usando el conocimiento disponible [27]. Reeves define el término heurística como un método que busca buenas soluciones, es decir, soluciones cercanas al óptimo a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad [28].

Las técnicas heurísticas son procedimientos simples que solucionan problemas de ruteo vehicular de manera aceptable en tiempos de cálculo generalmente moderados. En general, según Gaskell pueden ser clasificadas dentro de tres categorías de la siguiente manera [29].

Tabla 1. Clasificación de técnicas heurísticas para problemas de ruteo vehicular

Método	Características	Ejemplos como referencia
Ahorros	Se basa en el ahorro generado por insertar nuevos clientes en cada vehículo hasta completar una solución final	Método de Clarke y Wright
Asignar Primero - Rutear Después	<p>* Consiste en agrupar los clientes en varios subconjuntos que estarán en una misma ruta en la solución final, seguido de asignar cada subconjunto a un vehículo con una ruta específica que visita todos los clientes.</p> <p>* Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo.</p>	Método de Fisher y Jaikumar, basado en el problema de asignación generalizado y el algoritmo de barrido de Gillet y Miller
Rutear Primero - Asignar Después	<p>* Se inicia calculando una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP y luego se parte la ruta hallada para asignar un tramo a cada vehículo</p> <p>* En general esta ruta no respeta las restricciones del problema y se realizan particiones en varias rutas, cada una de las cuales si es factible.</p>	Método de curvas de llenado de Bowerman, Calamai y Brentnall, y el método de partición óptima de Beasley

Las metaheurísticas tienen como función tomar inicialmente una solución factible, para luego mejorarla usando heurísticas en una estructura más general, es decir modifican a otras heurísticas combinando diferentes conceptos y reglas de evaluación asociadas para producir mejores soluciones que las encontradas en primera instancia [30]. Adicionalmente, entre las técnicas metaheurísticas para el VRP se aprecian las colonias de hormigas, búsqueda dispersa, algoritmos evolutivos, procedimientos de búsqueda miope aleatorizados y adaptativos, re-encadenamiento de trayectorias y la búsqueda tabú, entre otras.

2.2 Diagnóstico

Por medio de la herramienta *Univex* (Sistema de Información de la Universidad), con la cual se administran los datos académicos de la Universidad Militar, se recolectó en una base datos, información relevante de la población a estudiar [31] entre las características importantes se encontraban nombre, dirección, carrera y semestre académico. Haciendo uso del total de los datos (2962) se visualiza la ubicación de residencia de cada miembro de la comunidad educativa. Continuamente, se realiza un proceso de depuración de esta información, en el

cual se excluyen del sistema los puntos con direcciones incorrectas fuera de la zona de estudio como residentes de municipios de Chía, Cajicá y Zipaquirá. De esta manera se tiene el volumen de 849 habitantes en la Capital.

Se identificaron estos como los clientes, principal elemento del VRP, los cuales generan la demanda para ser recogida por los vehículos y transportada hasta el depósito final. Se identifican algunas restricciones como horario (establecido como ventanas de tiempo) y la compatibilidad para identificar el tipo de vehículo [32]

Teniendo en cuenta el sistema actual de movilidad desde-hacia la universidad UMNG (Campus Cajicá), se estimaron las masas que pueden ser absorbidas por la ruta origen/destino del Tren de la Sabana (Venta de tiempo cerrada) y que descargan la concentración de las otras posibles plataformas. El análisis sobre la ruta del tren, se realiza a partir de las estaciones, descargando la masa de la demanda cercana, siendo en este caso el 32% del total de habitantes en la zona urbana. Es decir, eliminando la población que actualmente usa el Tren como medio de transporte principal para llegar a la Sede Campus. De tal forma, la localización de las otras plataformas será eficiente.

Con el objetivo claro y las condiciones básicas de la situación definida, se prosigue a determinar que el problema de ruteo se caracteriza con ciertas particularidades, expuestas en la figura 4, las cuales serán claves para hacer el correcto diseño del modelo de solución.

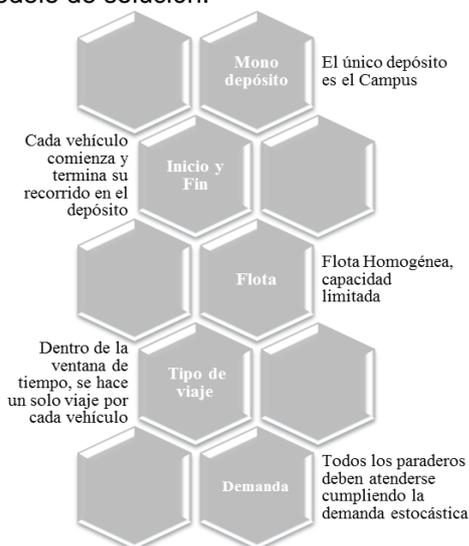


Fig. 4. Gráfico de aspectos que caracterizan el

modelo de transporte para el campus UMNG

2.3 Diseño de modelo matemático

Para el diseño del modelo se realiza inicialmente una búsqueda de grupos de clientes, o clústeres, tal como lo denomina Hernández [32], los cuales tendrán por grupo una misma ruta hacia el depósito final. En una segunda fase se determina el modelo de ruteo a utilizar.

Se plantea un modelo de programación lineal entera que pretende encontrar las rutas para visitar un número determinado de clientes (paraderos). El objetivo del modelo es minimizar el tiempo del recorrido total, determinar el número de vehículos necesarios para la demanda en la ventana de tiempo establecida. Los datos utilizados para la desarrollo del modelo son determinísticos debido a que los destinos, en este caso los paraderos son fijos. Por lo tanto, se plantea:

Subíndices

i, j : Estaciones y densidad de la demanda, donde $i = 1, \dots, D + C$ y $j = 2, \dots, D + C$

Conjuntos

$N = C \cup D$; conjunto que contiene a la universidad y a las estaciones

$C = \{D + 1, \dots, D + C\}$; conjunto de estaciones

$D = \{1, \dots, D\}$; conjunto de destino/origen

$k = \{1, \dots, K\}$; conjunto de medios

Variables de decisión

X_{ij} : 1 si el arco de la estación (objeto de estudio) i a la estación j es atendido, 0 en caso contrario

Y_{kj} : matriz de valores de 0 hasta ∞ que representa las unidades de capacidad (carga) de cada medio de transporte

La capacidad restante que queda en el medio después de visitar la estación.

m : numero de vehiculos a usar $\{0 < m \leq M\}$

Parámetros

T_{ij} : tiempo de ir desde una estación i , a la estación " j "

D_j : Demanda de la estación " j "

Q : Capacidad del vehículo " k "

Función objetivo

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

La ecuación (1) representa la función objetivo del problema, la cual consiste en la planeación de las rutas minimizando el tiempo del recorrido.

Restricciones

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ji} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{j \in C} X_{ij} = m \quad (4)$$

$$\sum_{j \in C} X_{ji} = m \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} Y_{ij} - \sum_{j \in N} Y_{ji} = D_i \quad \forall i \in C \quad (6)$$

$$D_j X_{ij} \leq Y_{ij} \quad \forall i \neq j \in N \quad (7)$$

$$Y_{ij} \leq (Q)X_{ij} \quad \forall i \neq j \in N \quad (8)$$

$$X_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i,j \in N \quad (9)$$

Las restricciones (2) y (3) cumplen que cada nodo es atendido una sola vez por un único vehículo; el conjunto de restricciones (4) y (5) garantizan que los vehículos necesarios empiecen su ruta en el nodo de origen (deposito) y la terminen en el mismo

nodo. Las restricciones (6) y (7) cumple que dentro de la ruta de cada vehículo no se realicen sub-tours y además calcula la carga restante que queda en cada vehículo luego de visitar un cliente. La restricción (8) garantiza que la demanda no supere la capacidad del vehículo y la restricción (9) garantiza que la variable sea entera binaria.

Para definir todas las relaciones que se presentan dentro del sistema con el medio y que describan la esencia del problema, se realiza el diseño matemático en el que se tiene en cuenta la figura 5 (Fig. 5) con la concepción general de un modelo experimental. El planteamiento del modelo de programación lineal entera, tiene como objetivo encontrar las rutas para visitar el número determinado de paraderos minimizando el tiempo del recorrido total, desde los puntos de partida en Bogotá, hacia el municipio de Cajicá - Cundinamarca donde queda ubicado el Campus. Adicionalmente se pretende determinar el número de vehículos necesarios para suplir la totalidad de la demanda dentro del tiempo programado, mejorar la capacidad de la flota de transporte y aumentar el nivel de cumplimiento [33]

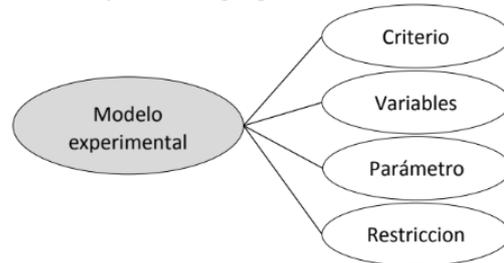


Fig. 5. Conceptos generales del modelo experimental

Tomando como base la literatura existente hasta el momento, se plantea el modelo de la siguiente forma: los subíndices representan las estaciones y la densidad de la demanda. Se toman condiciones con respecto a si la estación es atendida o no en determinado momento, condiciones para conocer la capacidad de cada vehículo antes y después de atender una estación y condiciones para determinar el número de medios de transporte a utilizar tomando como máximo 10 vehículos. Los parámetros constituyen los tiempos de recorrido entre estaciones o deposito, la demanda de la estación y la capacidad de cada vehículo. Como fin principal del modelo está la planeación de rutas minimizando el tiempo de recorrido, lo que se representa en la función objetivo. Las restricciones

son situaciones concretas que afectan el resultado final del modelo, por este motivo se aplican restricciones que cumplan con que cada nodo sea atendido una sola vez por un único vehículo, que los vehículos necesarios empiecen su ruta en el nodo de origen (mono depósito) y la terminen en el mismo nodo, que dentro de la ruta de cada vehículo no se realicen sub-tours, que se calcule la carga restante que queda en cada vehículo luego de visitar un paradero, que la demanda no supere la capacidad del vehículo garantiza y, finalmente se garantice que la variable sea entera binaria.

2.4 Escenarios de análisis

Una vez montados y agrupados los datos por zona en el mapa, y teniendo en cuenta las condiciones del modelo matemático; se prosigue a definir los puntos centrales estratégicos logísticos para las rutas que se buscan proponer, por lo que se divide a Bogotá, según la densidad poblacional de la ciudad, de manera que se obtienen tres bloques representados en zona norte, central y sur. Haciendo uso del software Logware, se halla por el método de centro de gravedad, un punto estratégico logístico con el fin de ubicar en estas zonas el nodo, incorporado como una estrella en la figura 6, donde deberá partir o llegar la ruta (Fig. 6).

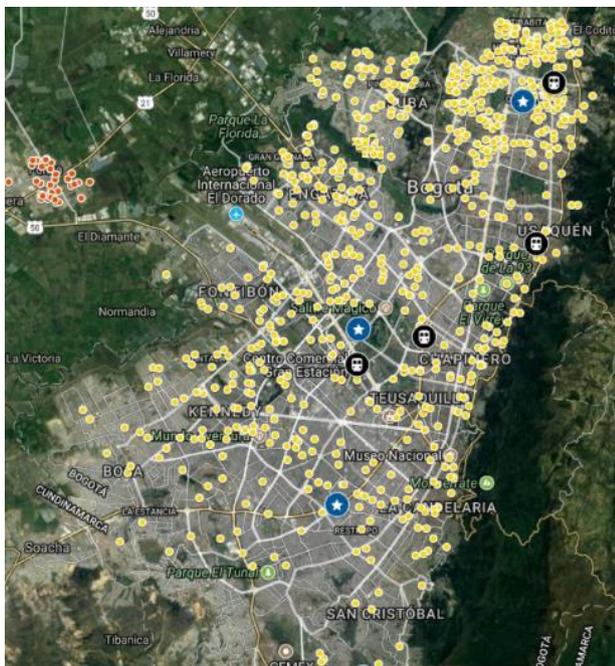


Fig. 6. Mapa de Bogotá con integrantes del Campus UMNG y puntos estratégicos logísticos o estaciones.

3. RESULTADOS

A través de Microsoft Visual Studio Express® con CPLEX Studio IDE se realizó la simulación y desarrollo del modelo. Con el fin de hacer una comparación inicial de cada ruta y hallar datos aproximados a los reales se estableció una corrida de cinco días con un GAP del 10%. Adicionalmente se utiliza una franja horaria de 6 am a 5 pm para la programación de las rutas.

Finalmente, para realizar la malla vial de la ciudad y poder establecer el ruteo, se utilizó el software ArcGIS con el que se identificaron las vías que generaban menos tiempos de desplazamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la programación y simulación del sistema de asignación de vehículos, se realizan ciertas comparaciones para identificar las características y comportamiento del sistema diseñado en el entorno real. En la tabla 2 se presentan los resultados durante cinco posibles días de funcionamiento continuo de los vehículos, durante la franja horaria en la zona sur. En esta se evidencian las relaciones del porcentaje de la capacidad utilizada de cada medio de transporte, el tiempo total de recorrido entre la estación y el campus, la cantidad de vehículos que se deberían adecuar para cumplir la demanda y el número de servicios que puede hacer cada vehículo de ida y regreso.

Tabla 2. Resultados para la estación sur con una corrida de 5 días

Estación Bloque Sur				
Día	Cantidad de vehículos	Capacidad Utilizada %	Tiempo Total (min)	Servicios
1	7	96	95	6
2	6	92	102	7
3	6	91	91	6
4	7	95	97	7
5	7	94	112	6

Por otro lado, haciendo la comparación entre los resultados promedio de cada estación con la tabla 3, se deduce de manera general que, en la zona sur, debido a la distancia, se pueden hacer en promedio 6 servicios utilizando una cantidad menor de vehículos, llegando a cumplir un mayor porcentaje de capacidad utilizada por cada vehículo. Por el contrario, en la zona norte se

pueden llegar a cumplir en un día 12 servicios en los que se utilizaría un porcentaje menor con respecto a la capacidad.

Tabla 3. Resultados promedio por cada estación

Estación	Cantidad de vehículos	Capacidad Utilizada %	Tiempo Total (min)	Servicios
Bloque Sur	7	94	99	6
Bloque Centro	6	84	73	8
Bloque Norte	5	73	49	12

Cabe aclarar que el modelo está enfocado en hallar el sistema de rutas que desempeñe la mejor eficiencia en cuanto a tiempos, capacidad y servicios durante toda la ventana temporal sin tener en cuenta ningún tipo de descanso.

Debido a las variaciones de la Universidad en sus horarios restringidos por actividades académicas, administrativas y periodos de inicio y fin de clases se espera que las rutas fijas se determinen según sus necesidades.

4. CONCLUSIONES

Se toma como base la literatura y métodos aplicados en estudios previos para hacer una aproximación a las rutas más viables para el transporte de personas hacia el Campus de la UMNG. De acuerdo a las condiciones del caso de estudio, se tomó en consideración la actual flota de transporte, la demanda y rutas de transporte, además se definieron ciertas restricciones como la de hacer recorridos directos, evitando sub-tours y buscando así que los resultados se enfocaran en la consecución de la minimización de tiempos de recorrido y maximización de beneficios.

A través de los métodos de solución del VRP, la programación matemática y la simulación del modelo se logra hacer un acercamiento al entorno real que simboliza una alternativa de movilización para la Universidad Militar y su comunidad. Por medio del modelo propuesto se logra establecer que el número en el cual se optimiza el sistema es de diecinueve vehículos, también se identifica una reducción del 18% en el tiempo total de recorrido, 14% aumento en la utilización de la flota de transporte y 97% en el cumplimiento de la demanda.

El modelo diseñado en este estudio representa un caso con una ventana de tiempo amplia debido a la

variedad de actividades que tiene la universidad y que se desarrollan de manera diferente para cada miembro de la comunidad académica. Por tal motivo, el análisis de estos escenarios se puede configurar de forma que se determine el sistema que mejor se adapte a las necesidades de la UMNG sede Campus según sus horarios más representativos.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Militar Nueva Granada por la financiación del Proyecto INV-ING 2395 "Diseño de un modelo de ruteo de vehículos: Caso de Estudio UMNG Sede Campus" del cual, el presente artículo es resultado de investigación.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Universidad Militar Nueva Granada. Enero 25 de 2017. <http://www.umng.edu.co>
- [2] Carvajal, N. G.: Los habitantes de Bogotá pasan 21 días al año en trancones. El Tiempo. 23 de Enero de 2016.
- [3] El Espectador: Estudiantes de la Univ. Militar Nueva Granada podrán llegar a clases en tren. 18 de Enero de 2011.
- [4] López, R.: Programación Lineal y Decisiones Económicas. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela. 1993.
- [5] Antón, F. R.: Logística del Transporte. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona 2005.
- [6] Porter, M. E.: La ventaja competitiva de las naciones. Free Press. New York 1990.
- [7] Mayorga T., O. Modelos de Gestión Logística. Bogotá: UniManuela. 2011
- [8] Olivera, A. Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Montevideo, Uruguay: Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. 2004.
- [9] Barán, B., & Hermosilla, A. Comparación de un Sistema de Colonia de Hormigas y una Estrategia Evolutiva para el Problema del Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo en un Contexto

Multiobjetivo. San Lorenzo, Paraguay: Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción. 2001.

[10] Jacobs-Blecha C. y Goetschalckx M.: The vehicle routing problem with backhauls: properties and solution algorithms. 1992.

[11] Arias, J. Aplicación de un modelo de optimización en la planeación de rutas de los buses escolares del colegio Liceo de Cervantes Norte. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Bogotá. 2010.

[12] Cordeau, J.-F.; Desaulniers, G.; Desrosiers, J.; Solomon, M. M. and Soumis, F. "VRP with time windows". In P. Toth and D. Vigo (eds.): The vehicle routing problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, vol. 9, Philadelphia, PA, 157-193. 2002.

[13] Restrepo, J., Medina, P., & Cruz, E. Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). *Scientia Et Technica*, 229-234. 2008.

[14] Rocha, L., González, C., & Orjuela, J. Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 35-55. 2011.

[15] Dror, M.; Laporte G. and Trudeau P.: Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics* 50, 239-254. 1994.

[16] Dror, M. ; Laporte G. and Trudeau P. : Vehicle routing with stochastic demands: Properties and solution frameworks. *Transportation Science*. 1989.

[17] Garey, Michael R. and Johnson, David S. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. W. H. Freeman. 1979.

[18] Miller, C.; Tucker, A. and Zemlin, R. Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM* No. 7, pp. 326-329. 1960.

[19] Aarts, E. and Lenstra, J. *Local search in combinatorial optimization*. Jhon Wiley & Sons. 2003.

[20] Daza, J. M., Montoya, J., & Marducci, F.: Resolución del problema de enrutamiento de

vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*, 16. 2009.

[21] Dondo, R., & Cerdá, J. (2014). A monolithic approach to vehicle routing and operations scheduling of a cross-dock system with multiple dock doors. *Computers & Chemical Engineering*, 63, 184-205.

[22] Korayem, L., Khorsid, M., & Kassem, S. S. (2015). A Hybrid K-Means Metaheuristic Algorithm to Solve a Class of Vehicle Routing Problems. *Advanced Science Letters*, 21(12), 3720-3722.

[23] Kepaptsoglou, K., Fountas, G., & Karlaftis, M. G. (2015). Weather impact on containership routing in closed seas: A chance-constraint optimization approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 139-155.

[24] Ewbank, H., Wanke, P., & Hadi-Vencheh, A. (2016). An unsupervised fuzzy clustering approach to the capacitated vehicle routing problem. *Neural Computing and Applications*, 27(4), 857-867.

[25] Derrouiche, R., Moutaoukil, A., & Neubert, G. (2014, October). Integration of social concerns in collaborative logistics

[26] Ignizio, J. and Cavalier, T. *Linear programming*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, p. 666. 1994.

[27] Narducci, Francesco: Programación de talleres intermitentes flexibles, por medio de la heurística del margen de tolerancia. 117 p. Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte. Barranquilla, 2005.

[28] Reeves, C. *Modern heuristic techniques*. In: Rayward Smith, V. J.; Osman, I. H.; Reeves, C. R. and Smith, G. D. (eds.), *Modern Search Methods*, John Wiley & Sons, 1996.

[29] Gaskell, T. Bases for vehicle fleet scheduling. *Operational Research Quarterly*. No. 18 pp. 281-295. 1967.

[30] Glover, F. and Laguna, M. *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers. 1997.

[31] Binary Tools. Univex. Recuperado el 31 de octubre de 2017, de <http://univex.com.co/univex.html> 2017.

[32] Hernández, Y. Diseño De un sistema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos en empresas de transporte de carga por carretera. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 2016.

[33] Morales, D. P. Programación lineal y optimización de redes. Barcelona: Servei de Publicacions. 2000.