

Trabajo de grado en modalidad de investigación

[173007] MODELO PARA EL PROBLEMA DE
LOCALIZACIÓN Y RUTEO DE VEHÍCULOS CON
VENTANAS DE TIEMPO EN BOGOTÁ USANDO FLOTA
HETEROGÉNEA

Diego Acevedo^{a,c} , Juan Chaparro^{a,c} , Sebastián Beltrán^{a,c} ,
Nicolas Rincón Garcia^{b,c} , Mohamed Rabie NaitAbdallah^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

This paper studies the facility location and vehicle routing problem with heterogeneous fleet and time windows in *Bogotá* considering the cargo vehicle constraints in the city, land prices, routing costs and taxes inside and outside the city. As mentioned by Rincon-Garcia et al, the industry currently faces challenges in distribution, among them, traffic jam, district regulations, and customers' requirements, delivery fulfillment in narrow time windows. With this in mind is opportune to develop a model that supports the decision taking in the location and routing problem in *Bogotá*, considering the zones and schedules existing for the cargo vehicle's transit. For this purpose, we designed a meta heuristic model based on a LNS algorithm and a time dependent function for the speed, which allow us to compare the implications of locating a facility in the city or the villages on the Bogotá's savannah. The early steps in the creation of the model consisted in algorithms aimed to arrange the customers with different criteria and homogenous fleet, later we implemented LS algorithms on the existing routes and finally we used methods aimed to reduce the cost of the fleet. In order to develop a sturdy model, we tested it against available instances for the VRPTW problem, which produced results that surpassed some of the best-known solutions in the literature

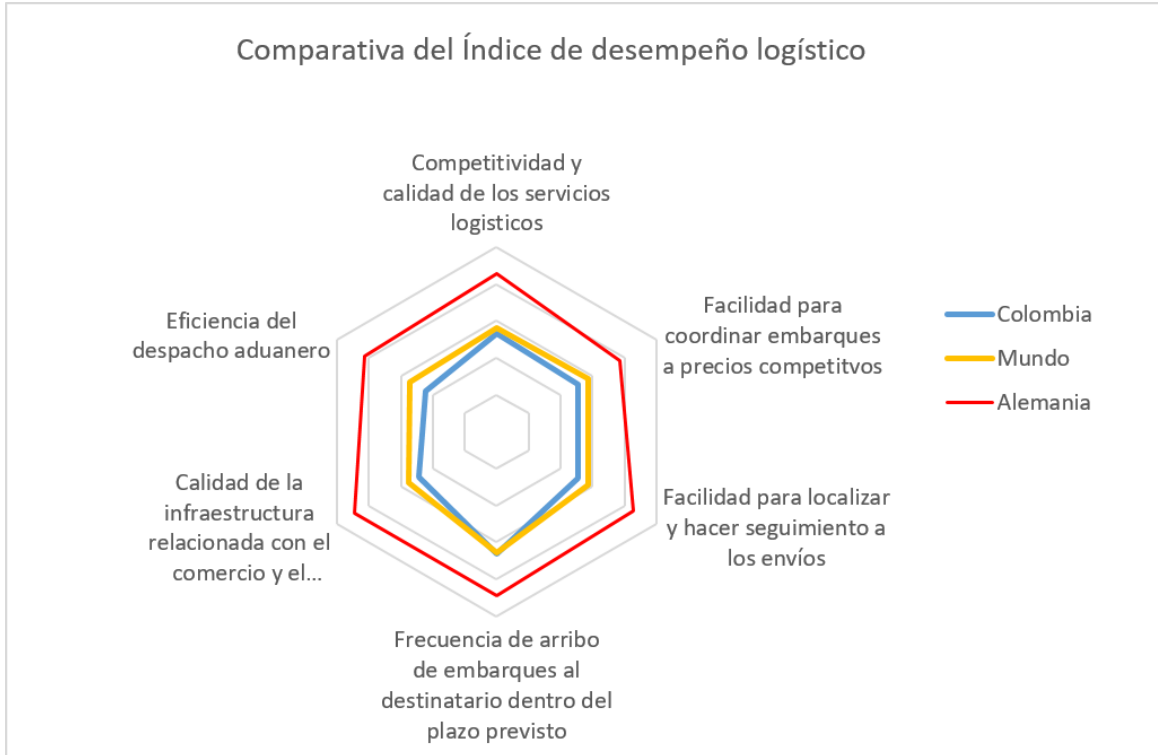
Palabras claves: Bogotá, VRPTW, Distribución, Flota Heterogénea

1. Justificación

Según el índice de desempeño logístico al año 2016 publicado por el Banco Mundial, que mide el desempeño de la cadena logística de un país (ANALDEX, 2016), Colombia está catalogada en el puesto 94 basándose en factores tales como: competitividad y calidad de los servicios logísticos, facilidad para coordinar embarques a precios competitivos, facilidad para localizar y hacer seguimiento a los envíos, frecuencia de arribo de embarques al destinatario dentro del plazo previsto, calidad de la infraestructura relacionada con el comercio y el transporte y la eficiencia del despacho aduanero, con un valor total de 2,612, siendo 1 un bajo desempeño y 5 un alto desempeño logístico.

En la Ilustración 1 se presenta un diagrama radial en el cual se realiza la comparativa por factores del índice de desempeño logístico entre El Mundo, Colombia y Alemania donde se observa que los valores del índice para Colombia son menores frente a los valores promedio que tiene el mundo, de modo similar se realiza la comparación frente a Alemania, país que ocupa actualmente la primera posición con relación al mejor desempeño logístico. Con esto se llega a la conclusión que existen oportunidades de mejora que están siendo puestas en funcionamiento en otras áreas del mundo que deberían ser estudiadas en el contexto colombiano.

Ilustración 1 Índice de desempeño logístico Colombia vs mundo



Fuente: ANALDEX, (2017)

La “Encuesta Nacional Logística 2015”, presenta el panorama logístico colombiano donde las principales barreras que afectan a los usuarios de servicios logísticos son los altos costos relacionados al transporte y la falta de sistemas de información en logística. De igual manera el prestador de servicios logísticos tiene desafíos frente a la falta de zonas adecuadas para cargue y descargue, las infraestructuras viales y la congestión vehicular (Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Investigación, 2015).

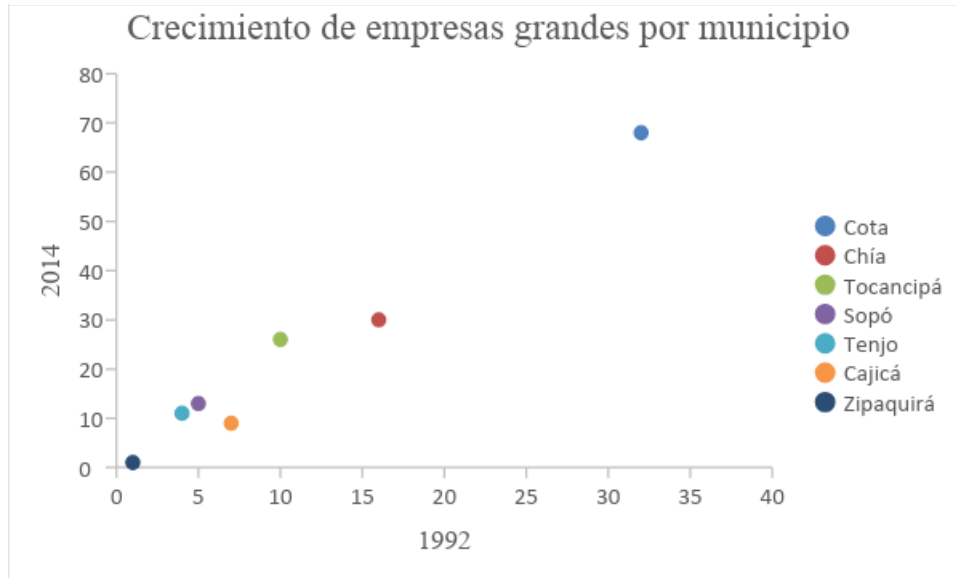
Los costos de transporte son afectados por dos factores, la infraestructura vial y situación geográfica, los cuales tienen un impacto directo sobre la distancia recorrida (ŠADEROVÁ Janka & KACMÁRY Peter, 2016). Respecto a la infraestructura vial en Colombia las entidades responsables de su administración son los Municipios y el INVIAS, por lo tanto, las empresas están limitadas a decidir sobre la ubicación geográfica de sus operaciones para reducir sus costos de transporte. Este problema de ubicación se conoce como el problema de localización de planta, el cual busca encontrar una localización tal que disminuya la distancia total recorrida entre puntos de servicio y un conjunto de puntos de demanda (Brandeau & Chiu, 1989).

Una de las tendencias que ha surgido con el pasar de los años es el traslado de las plantas e instalaciones industriales de la ciudad a Municipios aledaños en la Sabana, como lo menciona la secretaria de desarrollo económico en su nota: “La Industria bogotana: ¿Desindustrialización o desverticalización?”, (Echavarría & Villamizar, 2015). Las razones del desplazamiento se refieren al costo de tierras, impuestos, el limitado espacio para construcción del sector industrial, factores ambientales y de movilidad. Con el crecimiento poblacional se encuentra la integración económica por parte de los municipios aledaños a Bogotá. Pese a que hay industrias que se están movilizándose a otros municipios, existe otro grupo que esgrimen tres razones principales para no cambiar a Bogotá según una encuesta realizada por la Cámara de Comercio de Bogotá, tales como: La ubicación geográfica, la segunda es que consideran Bogotá un punto estratégico y la tercera razón, es la cercanía con sus clientes.

Entre el año 2010 y 2015 existió un crecimiento de 79 zonas francas en Colombia a 102, que incrementó la participación en el mercado y el movimiento de operaciones de comercio exterior. Como se observa en la ilustración 2 a

lo largo del tiempo se generó un incremento de las instalaciones industriales en municipios como Zipaquirá, Chía y Tenjo. Como menciona Castro, el crecimiento de las zonas francas se reflejó en la generación de empleos y la inversión en el desarrollo de dichas zonas (Castro Granados, 2016).

Ilustración 2 Crecimiento de grandes empresas entre el año 1992 y 2014



Fuente: (Cámara de comercio de Bogotá, 2015)

El crecimiento industrial en municipios aledaños a Bogotá se justifica en la reducción de impuestos como se evidencia en la tabla 1, en la que se expresan las tarifas por miles del impuesto de industria y comercio por las actividades que realizan las empresas en los diferentes municipios. Bogotá cuenta con la máxima tarifa nominal que asciende al 11.04 por mil dependiendo la actividad que desarrolle la empresa.

Tabla 1 Tarifas nominales del impuesto de industria y comercio para Bogotá y municipios aledaños

Actividad	Cota	Chía	Soacha	Mosquera	Madrid	Tocancipá	Funza	Bogotá
Industrial	4 a 6	4 a 7	4 a 7	6.5 a 10	7	4.5 a 7	5.9 a 6.5	4.14 a 11.04
Comercial	3 a 9	7 a 10	4 a 10	6 a 7	7 a 8	4.5 a 10	5.9 a 10	4.14 a 13.8
Servicios	3 a 10	6 a 10	4 a 10	6 a 10	6 a 10	4.5 a 10	5.9 a 10	4.14 a 13.8
Financiero	Tarifa especial	5 a 10	5	5	5	5	10	11.04

Fuente: (Alcalde Municipal de Soacha, 2013; Concejo Municipal de Chía, 2016; Concejo Municipal de Cota, 2010; Concejo Municipal de Funza, 2012; Concejo Municipal de Mosquera, 2013; Ministerio de Transporte, 2004; Secretaría de Hacienda de Madrid Cundinamarca, 2017; Secretaría Distrital de Hacienda, 2013; Secretaría Distrital de Hacienda, 2011; Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013)

Con respecto a la competitividad logística, es necesario resaltar que esta ha sido trasladada a un nivel de competitividad entre cadenas de suministro y su correcta administración y seguimiento, lo que conlleva a diseñar sus eslabones de manera organizada con el fin de generar ventajas competitivas (Latha Shankar, Basavarajappa, Kadadevaramath, & Chen, 2013). Al diseñar o rediseñar una cadena de suministros, cada una de las decisiones tomadas tendrá un gran efecto sobre los diferentes eslabones y variables involucradas, por lo que es necesario realizar las decisiones de manera simultánea que permitan obtener un nivel de costo-beneficio (*trade-off*) entre los costos de la cadena de suministros y el servicio prestado. La globalización y apertura de mercados ha permitido a muchas industrias su expansión y movilización lo que conlleva a incrementar el enfoque de diseño como lo ejemplifica (Baumgartner, Fuetterer, & Thonemann, 2012) considerando características como: locación de planta, costos de materiales, costos de producción, diseño de rutas, costos de transporte, costos de inventarios, entre otros.

Considerando las diferentes problemáticas identificadas que afectan el desempeño de la competitividad logística y el desplazamiento de las industrias, se propone el diseño de un proyecto enfocado a soportar la toma de decisiones de localización y transporte en *Bogotá* y los municipios aledaños para diferentes tipos de empresas.

Para la aplicación del proyecto en *Bogotá* se deben tener en cuenta la delimitación de zonas de circulación y restricción para vehículos de transporte de carga en la ciudad, decretada por la Secretaria de movilidad. De esta forma, es posible mejorar el desempeño de las empresas disminuyendo los costos de *distribución*, teniendo en cuenta que estos costos representan entre uno a dos tercios del costo logístico total (Ballou, 2004).

En conclusión, El objetivo de este proyecto es dar respuesta a la siguiente pregunta, ¿Cómo se puede mejorar el desempeño logístico de las empresas en *Bogotá* a partir de un ruteo de vehículos, comparando las ventajas y desventajas que se tienen ubicando el centro de *distribución* en *Bogotá* o sus alrededores?

2. Antecedentes

En el problema de localización de instalaciones existen más de 50 variaciones, enfocadas a minimizar el tiempo promedio de viaje entre la instalación y los clientes, el tiempo promedio de respuesta, la función de costos de viajes, función de costos de tiempo de respuesta, minimizar el máximo tiempo de viaje o maximizar el mínimo tiempo de viaje (Brandeau & Chiu, 1989). Los problemas de localización se pueden clasificar en dos grandes familias, estáticos y dinámicos, los problemas estáticos contienen 3 grupos, CPFL (*Continuous facility location problems*), DIFLP (*Discrete facility location problems*) y NFLP (*Network facility location problem*), que se resumen en la Tabla 2 (Boloori Arabani & Farahani, 2012).

Tabla 2 Clasificación de los problemas de localización de planta s

Familia	Grupo	Problema	Descripción
STFLP	CFLP	SFLP (Single facility location problem)	Localizar una nueva planta minimizando la distancia con las existentes
		MFLP (Multiple-facility location problem)	Localizar múltiples plantas minimizando la distancia con las existentes
		FLAP (Facility allocation-location problem)	Localizar múltiples plantas minimizando la distancia con las existentes y asignando clientes a cada una
	DIFLP	QAP (Quadratic assignment problem)	Asignar plantas a clientes
		PLP (Plant location problem)	Localizar un conjunto de plantas minimizando la distancia hacia los clientes
	NFLP	Median problem	Localizar el lugar adecuado para p plantas e identificar nodos que atienden
		Covering problem	Maximizar la cobertura de la red con plantas que atienden dentro de una distancia máxima
		Center problem	Encontrar lugares de la red para ubicar plantas que cubran toda la demanda
		HLP (Hub location problem)	Minimizar la distancia y el flujo entre plantas y clientes de la red
		HIP (Hierachial location problem)	Ubicar plantas con diferentes niveles de servicio para satisfacer la red
DFLP	Dynamic deterministic facility location problem	Ubicar plantas de un conjunto minimizando los costos fijos y las distancias en un horizonte de tiempo	
	Facility location-relocation problem	Localizar y relocalizar múltiples plantas durante el horizonte de tiempo	
	Multi-period facility location problem	Localización de plantas y asignación de clientes durante el horizonte de tiempo	
	Time-depend facility location problems	Localización y relocalización de plantas asignando clientes durante el horizonte de tiempo	
	Stochastic facility location problems	Localización de plantas y asignación de clientes durante el horizonte de tiempo con condiciones inciertas	

Fuente: Boloori Arabani & Farahani, (2012)

Los objetivos de las diferentes metodologías para la resolución del problema de localización de planta son: la reducción de costos operacionales, costos de transporte, costos de producción, costos de inventarios, entre otros (Boloori Arabani & Farahani, 2012). Es por ello por lo que las investigaciones relacionadas consideran un enfoque multiobjetivo con el fin de garantizar soluciones viables a lo largo del horizonte de planeación para el cual fue diseñado. La integración de decisiones conlleva a modelos mucho más complejos y relevantes en el desempeño en las decisiones de los niveles tácticos y operacionales en la cadena de suministro (Owen & Daskin, 1998).

La localización de instalaciones es un elemento crítico dentro de la planeación estratégica para una empresa y en consecuencia tiene incidencia en la toma de decisiones a nivel operativo como es el diseño de rutas. Para dimensionar la toma de decisiones (Bhatnagar & Sohal, 2005) propone diferentes factores asociados a los costos de localización de planta tales como: costos de transporte, costo de la tierra, costos de infraestructura, costos fijos de operación entre otros.

Una de las decisiones directamente afectadas por la localización de planta es el diseño de rutas, el problema VRP (*Vehicle Routing Problem*) se fundamenta en diseñar y planear rutas bajo un conjunto de restricciones y características espaciales o temporales con el fin de obtener bajos costos de aplicación. La definición del VRP clásico posee un conjunto de clientes a ser atendidos una única vez por un único vehículo que satisface su demanda. La flota de vehículos se comporta de manera heterogénea donde se consideran n vehículos con diferentes características, como su capacidad.

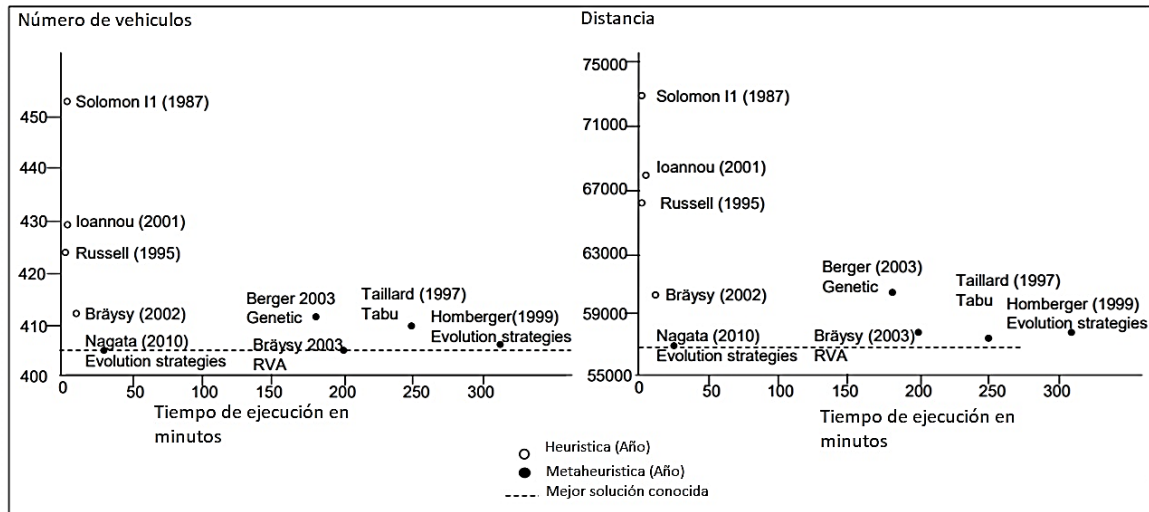
Como aproximación al problema planteado, Liu y Shen proponen la variante FSMVRPTW (*Fleet size and mix VRPTW*), del problema VRPTW, utilizando estructuras de costos para distintos tipos de vehículos que permiten configurar flotas heterogéneas al costo mínimo (Liu & Shen, 1999). Posteriormente Koç utiliza un HEA (*Hybrid Evolutionary Algorithm*) para resolver el problema FSMVRPTW y una variante con flotas finitas, adicionando un costo unitario a la distancia recorrida (Koç, Bektaş, Jabali, & Laporte, 2015).

El diseño busca evaluar las diferentes configuraciones de rutas que permitan satisfacer las peticiones de los clientes al mínimo costo. Diferentes metodologías se han propuesto para la solución del problema y las diferentes variaciones del mismo, entre ellas las formulaciones de algoritmos exactos, modelos heurísticos y metaheurísticos.

Los algoritmos exactos han sido desarrollados para dar con soluciones óptimas al problema, sin embargo, muchos de estos desarrollos no son factibles frente a instancias grandes ni cumplen los requerimientos en términos de tiempo al momento de tomar decisiones a nivel operativo. Algunas de las aproximaciones por algoritmos exactos que han generado buenas soluciones utilizan métodos como *Branch-and-Bound*, *Set Partitioning Algorithms*, *Branch-and-cut* o Generación de columnas, entre otros.

Por otra parte, cuando no es posible desarrollar soluciones exactas por requerimientos de tiempo o tamaño del problema, se han desarrollado modelos heurísticos y metaheurísticos que permiten acercarse a una solución que satisface las necesidades operativas de la empresa. En la ilustración 3 se observa la evolución de heurísticas y metaheurísticas frente a la resolución de problemas. Entre las heurísticas más usadas para resolver el problema de VRP se encuentran métodos como *Clarke and Wright (1964)*, *Sweep algorithm of Gillet and Miller (1974)*, las cuales a través de los años se han demostrado que generan soluciones razonablemente buenas. Además, a través de los años han desarrollado mejoras de estos modelos heurísticos, conocido como metaheurísticas, las cuales buscan generar alternativas que mejoren las soluciones obtenidas con los modelos heurísticos. Para la solución del problema de VRP con modelos metaheurísticos se han desarrollado métodos como *Búsqueda Local (1986)*, *Genetic algorithms (1975)*, las cuales pueden resolver instancias de más de 100 vértices dentro de 0,1% del valor de la mejor solución conocida en menos de un minuto (Laporte, 2009).

Ilustración 3 Desempeño de heurísticas y metaheurísticas



Fuente: (Rincon-Garcia, 2016))

Desde 1961 se ha considerado la resolución del problema de LRP (*Location-Routing Problem*) por la interdependencia entre las decisiones de localización y ruteo, pero por falta de desarrollo computacional no había avances. Sin embargo, en años más recientes, ver tabla 3, se han estudiado diferentes variantes y se ha demostrado que la resolución por separado de los problemas de ruteo y localización conlleva a soluciones sub óptimas frente al problema LRP (Prodhon & Prins, 0101).

Tabla 3 Artículos documentados del LRP entre 2007 y 2013

Kind of location- routing problem	Total
<i>LRP with uncapacited vehicles</i>	4
<i>LRP with capacited vehicles</i>	5
<i>Capacited LRP (CLRP)</i>	18
<i>Two-echelon LRP</i>	8
<i>Truck and trailer routing problem (TTRP)</i>	10
<i>LRP with special or multiple objectives</i>	7
<i>Additional attributes on nodes and vehicles</i>	6
<i>Multi-period LRP</i>	4
<i>Inventory LRP</i>	4
<i>LRP with uncertain data</i>	6
Total	72

Fuente: Prodhon & Prins, (2016)

En el entorno mundial existen softwares diseñados para resolver problemas de VRP y sus extensiones, capacitados con herramientas en la toma de decisiones logísticas además del apoyo de diferentes sistemas de información (geográfica, ERP, CRM, entre otros), empresas como Appian Logistics Software, RouteSmart Technologies operan mundialmente brindando soluciones logísticas frente a problemas de transporte mejorando las condiciones en términos de costos y operación de las empresas.

Tal como se menciona en (Villegas, Gutiérrez, & Palacio, 2012) existen softwares de carácter privado y académico, que buscan ser implementados de manera teórica o en un sector empresarial, dicho documento realiza un estudio en la literatura de algunos de los softwares existentes frente a la resolución de problemas VRP en el mundo además de investigar la implementación de estos softwares en el territorio colombiano. Tradicionalmente los objetivos que se buscan resolver dentro de este tipo de problemas se evalúan bajo los criterios de reducción total de la distancia recorrida o tiempo total empleado en la *distribución* por lo que es esencial o necesario contar con información geográfica que incluya mapas, mallas viales y demás información cartográfica no obstante es posible la implementación de un diseño en Colombia siempre y cuando se tenga la información mencionada anteriormente.

En la Tabla 4 se presenta el desempeño computacional de 9 diferentes softwares frente a la resolución de un problema de diseño rutas, el tiempo computacional puede variar según las especificaciones del problema, siendo 30 minutos lo máximo que tarda cualquiera de los softwares en dar una solución, las soluciones generadas dan respuesta a un problema de tamaño ilimitado de nodos adicionalmente, se observa la tendencia a utilizar algoritmos heurísticos y combinaciones de ellos, como es el caso de Axiodis.

Tabla 4 Desempeño Computacional de los Softwares Computacionales en el mercado

Software	Tiempo Computacional	Algoritmos empleados
ARC Logistics	10-30 minutos	Es necesario contactar al proveedor
Axiodis Estandar	30 seg a 5 minutos	Uso de 14 algoritmos, entre ellos heurísticos.
Axiodis Profesional	30 seg a 5 minutos	Uso de 14 algoritmos, entre ellos heurísticos.
DataRutas	10 minutos	-
Network Analysis	1-30 minutos	Es necesario contactar al proveedor
Roadnet Transportation Suite	Aproximadamente menos de un minuto	Algoritmos heurísticos
Sinmaf Vehicle Router	3,5-25 minutos	MOANT, SPEA-II
SpicaR	20-30 minutos	Es necesario contactar al proveedor
TransCad	5 minutos	-

Fuente: (Villegas et al., 2012)

Cabe aclarar que ninguno de los antecedentes recopilados anteriormente representa una solución a la totalidad del problema, sin embargo, cada uno de ellos proporcionan información o herramientas que permiten estructurar una solución a la problemática. Con base en Bhatnagar y Sohal (Bhatnagar & Sohal, 2005) se van a considerar factores como costos de transporte, costo de la tierra, costos de infraestructura y costos fijos de operación para comparar las alternativas de localización de planta. La calidad de las soluciones generadas por el algoritmo se comparará contra los resultados de Liu y Shen (Liu & Shen, 1999) y Koç (Koç, Bektaş, Jabali, & Laporte, 2015). Finalmente, se utilizarán los resultados de los tiempos computacionales de los diferentes softwares en el mercado, presentados por Villegas (Villegas et al., 2012) para comparar el modelo propuesto.

A partir de los antecedentes recopilados se diseñó un modelo de decisiones que permite analizar el impacto de la localización de planta teniendo en cuenta variables como el costo de la tierra y costos logísticos. La robustez del modelo se comparó con instancias de pruebas encontradas en la literatura logrando superar los resultados propuestos por algunos autores. Adicionalmente se realizó un acercamiento al caso real en Bogotá utilizando flota heterogénea y tiempo dependiente sobre el flujo vehicular.

3. Objetivos

General

Desarrollar una herramienta que soporte la toma de decisiones de localización y transporte para diferentes tipos de empresas en Bogotá considerando una flota heterogénea.

Específicos

- Identificar las características relacionadas a la ubicación de planta y la regulación existente en distribución en Bogotá y pueblos aledaños que tengan operaciones logísticas que sirvan a Bogotá.
- Proponer una solución de ruteo considerando las restricciones identificadas para Bogotá y pueblos aledaños que tengan operaciones logísticas que sirvan a Bogotá.
- Medir el impacto del diseño propuesto en términos de costos logísticos y nivel de servicio.

4. Metodología

El primer paso para el diseño del modelo consistió en identificar el tipo de problema abordado, de acuerdo a los antecedentes, es una variante del problema FSMVRPTW con restricciones por zonas y en consecuencia se trata de un

problema *NP-HARD* que requiere métodos heurísticos y metaheurísticos. Posteriormente se revisaron las restricciones que afectan en modelo, las instancias de prueba disponibles que garantizarán la robustez del modelo y los parámetros necesarios para medir los resultados del modelo.

Zonas en Bogotá

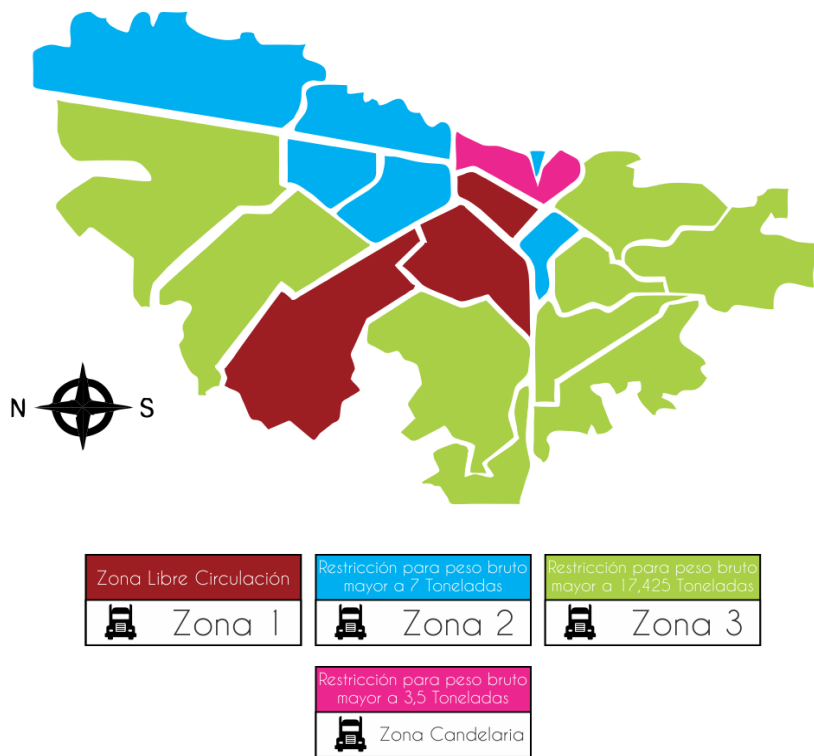
Para las restricciones por zonas la secretaria distrital de movilidad de Bogotá en el Decreto 520 del 2013 presenta varias restricciones horarias y espaciales para vehículos de carga en Bogotá. Tal decreto también define como capacidad de carga al tonelaje máximo permitido en un vehículo para circular por una vía de manera que su peso bruto no exceda las restricciones propuestas.

En Bogotá se definen cuatro zonas de circulación, la zona 1 es libre de restricciones de circulación todo el día y se conforma por las unidades de planeación zonal entre la Avenida calle 13 y la Avenida calle 26, Montevideo, Puente Aranda, Zona Industrial, Paloquemao y Ricaurte.

La zona 2 posee una restricción de tonelaje permitiendo la circulación de vehículos con hasta siete toneladas de capacidad de carga, adicionalmente, se tiene una restricción horaria en el que se prohíbe la circulación de vehículos de carga en hora pico definida entre las 6:00-8:30 y las 17:00 y 19:30. La zona se ubica al oriente de Bogotá limitándose por la Calle 170 en el norte y la Avenida Boyacá al occidente la Avenida Primera de mayo en el sur. Es importante resaltar que las restricciones no aplican para vehículos de carga que transporten alimentos perecederos, animales vivos, operativos de servicios públicos o vehículos de valores, quienes deberán portar documentación de verificación.

La zona 3 es la zona más grande y por la que podrán circular vehículos de carga de hasta 3 ejes que transporten hasta 17,425 toneladas, de igual manera se tendrá restricción horaria en la hora pico. Finalmente, la cuarta zona se delimita en la localidad La candelaria con restricción a vehículos de peso mayor a 3,5 toneladas y permitiendo el cargue y descargue solamente en el horario 20:00 horas a 8:30 horas.

Ilustración 4 Mapa de restricción vehicular en Bogotá



Fuente: (Secretaría Distrital de Movilidad, 2017)

Con base a las restricciones definidas por la Secretaría de Movilidad se definieron las áreas de circulación que tendrán un impacto directo en la manera en la que se realice el ruteo desde el centro de distribución hacia los clientes, de esta manera fue necesario tener en cuenta la hora del día en la que circula el camión por la ciudad además de la zona en la que se moviliza, esto también requiere definir una flota de vehículos que sea capaz de ingresar a las zonas respetando las restricción de capacidad y tipo de camión (Ministerio de Transporte, 2004).

Función de velocidad

La investigación se plantea desde un enfoque determinístico, sin embargo, hay que tener en cuenta la presencia de factores variables del contexto real como el tiempo de viaje, que depende de las condiciones del camión, la pericia del conductor y el estado de las vías. Por ello se usa función de tiempo para determinar la velocidad promedio de los vehículos. Bogotá cuenta con horarios pico en el que el tráfico vehicular aumenta y la velocidad promedio en las vías disminuye, para identificar la velocidad en los diferentes horarios se obtuvo la velocidad aproximada entre localidades y municipios en intervalos de 30 minutos para la franja horaria de 6:00 a.m. a 8:00 p.m., de esta manera se construyó una función de velocidad dependiente del lugar de destino, lugar de salida y la hora del día. Para la velocidad en horas fuera de la franja se asumió una condición *Free Flow* (la mayor velocidad registrada para cada par de ubicaciones).

Caracterización de la flota

Para calcular el consumo de combustible de la flota se utilizaron las curvas de Litros Diesel/Km contra Velocidad promedio para vehículos de carga acorde a la clasificación que el Renio Unido les otorga, tales como LGV (*Light Goods Vehicle*), OGV1 y OGV2 (*Ordinary Goods Vehicle*) Dentro de la categoría LGV se encuentran las Vans, camionetas pickups y algunas ambulancias, vehículos caracterizados por un eje trasero con llantas individuales. En la categoría OGV 1 se tienen los camiones de carga rígidos con dos o tres ejes y un eje trasero con doble llanta. Finalmente, la categoría OGV 2 está conformada por vehículos articulados y con más de cuatro ejes.

Con base en la resolución 4100 de 2004 del ministerio de transporte se construyó la tabla 5, que resume los tipos de vehículos de carga utilizados en Colombia, la columna “designación” el primer número hace referencia a la cantidad de ejes del vehículo y el número posterior a la letra “S” corresponde a los ejes del semirremolque. Las siglas “P.B.V.” significan peso bruto vehicular o el peso máximo que puede soportar el vehículo incluyendo el peso de su carga.

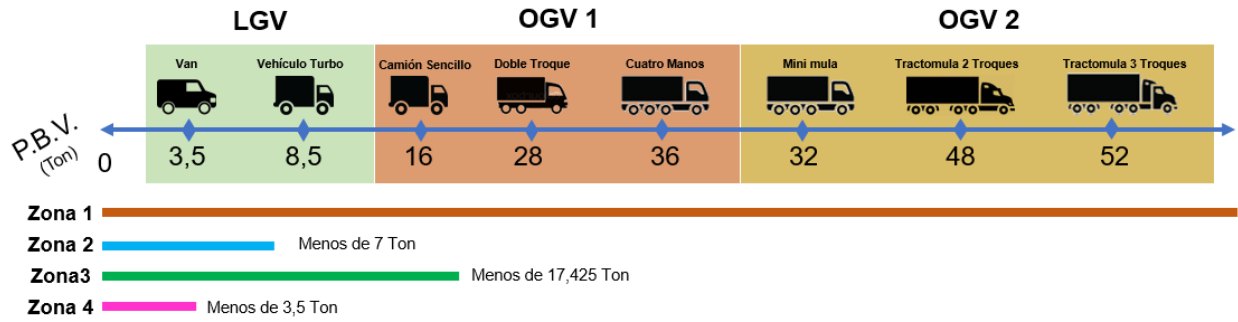
Tabla 5 Resolución 4100 del 2004

Designación	Nombre	Dimensiones			P.B.V. (Ton)
		Ancho máx. (m)	Altura máx. (m)	Longitud máx. (m)	
2	Vehículo Turbo	2.30	2.30	5.00	8.50
2	Camión Sencillo	2.60	4.40	10.80	16.00
3	Camión Doble troque	2.60	4.40	12.20	28.00
4	Cuatro ejes	2.60	4.40	12.20	36.00
2S2	Mini mula	2.60	4.40	18.50	32.00
3S2	Tracto mula dos troques	2.60	4.40	18.50	48.00
3S3	Tracto mula tres troques	2.60	4.40	18.50	52.00

Fuente: (Ministerio de Transporte, 2004)

A continuación, en la ilustración 5 se presentan los vehículos de carga según su nombre, peso bruto vehicular máximo, zonas por las que pueden transitar y su clasificación.

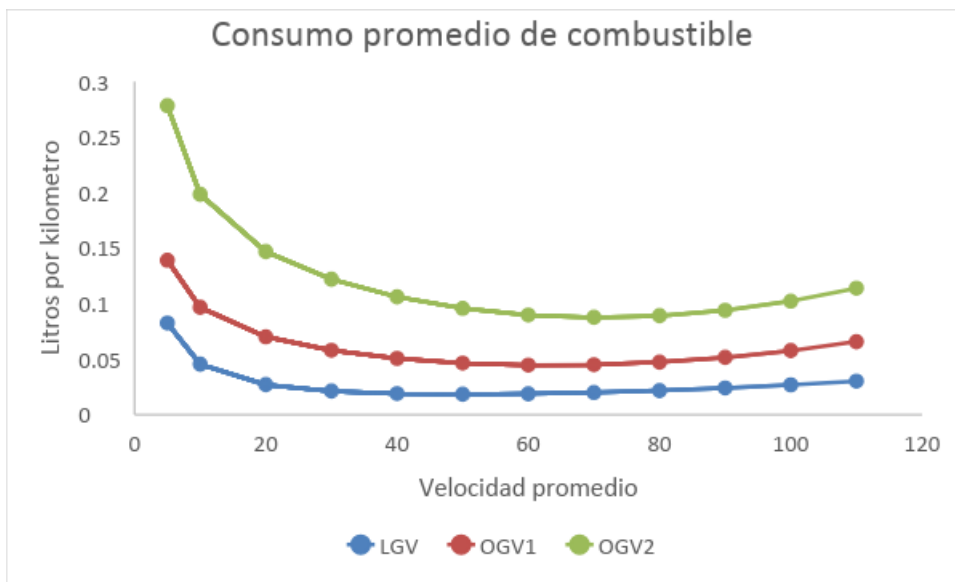
Ilustración 5 Clasificación de camiones según tonelaje



Fuente: Autores

La clasificación de los vehículos permite realizar un estimado del consumo de combustible teniendo en cuenta el consumo promedio según la categoría en la que se encuentra el vehículo a utilizar, de esta manera se realiza una aproximación del costo con base a variables como la velocidad promedio de la ruta y la distancia recorrida. En la ilustración 6 se presenta la función de consumo según la clasificación del vehículo.

Ilustración 6 Funciones de consumo de combustible según clasificación



Fuente: (Rincon-Garcia, 2016)

Costos

Los vehículos utilizados en el modelo se representan en la tabla 6, en donde se expresa el costo estimado por día por medio de una depreciación lineal a 10 años y con un valor de salvamento obtenido a partir de la base gravable de vehículos de carga de 2018 definidos por el ministerio de transporte. Para determinar los costos de otros rubros como las llantas, mantenimiento, parqueaderos, seguros, e impuestos, se utilizaron los porcentajes de costos del ICTC (índice de costos de transporte de carga por carretera), presentado en la tabla 7, a partir del costo del combustible.

Tabla 6 Caracterización de la flota utilizada

Tipo	Modelo	Costo estimado día	Capacidad (unidades)
Van	Starex H1	13 626.59	140
Turbo	NHR REWARD	14 359.34	221
Sencillo	FRR	29 907.71	491
Doble Troque	FVR	40 856.64	679
Cuatro manos	GU 813 T8	35 714.76	1217

Fuente: Autores

Tabla 7 Porcentajes de grupos de costos del ICTC

Rubro	Porcentaje del ICTC
Combustible	40.2
Servicios de estación, lubricantes, filtros y parqueadero	4.27
Llantas	5.53
Impuestos, revisiones, seguros y mano de obra	20.07
Peajes	11.82
Partes y piezas del motor, caja, embrague y dirección	0.93
Partes y piezas del diferencial, rodamientos y retenedores	0.24
Partes y piezas de los frenos	0.24
Partes y piezas del sistema eléctrico e inyección	0.58
Partes y piezas de la suspensión y el tráiler	0.21
Servicios de mantenimiento y reparación del vehículo	2.61

Fuente: DANE (2018)

Los municipios identificados para la investigación fueron seleccionados debido a su cercanía a Bogotá y crecimiento industrial. El precio del metro cuadrado de cada municipio es el resultado de investigar diferentes bodegas en cada municipio y realizar el promedio de su costo de arriendo. Las bodegas seleccionadas poseen patios de maniobra adecuados para distribución y características de almacenamiento aptas para ser competitivas. Dado que las tarifas del impuesto de industria y comercio para actividades industriales tienen valores y clasificaciones diferentes según el municipio, se utilizó el valor promedio de todas las clasificaciones por municipio, valores recopilados en la tabla 8.

Tabla 8 Parámetros por municipio del modelo

Ubicación	Tarifa por miles de pesos	Valor de la tierra por día
Cota	4,96	\$484,54
Chía	6,35	\$486,54
Soacha	5,75	\$312,37
Mosquera	6,89	\$389,09
Madrid	7,00	\$322,82
Tocancipá	5,87	\$203,39
Funza	6,07	\$414,93
Bogotá Río Negro	7,52	\$752,44
Bogotá Montevideo	7,52	\$601,25

Fuente: Autores

Localización

Teniendo en cuenta que se necesita definir la ubicación de una planta, estamos tratando con tipo de problema SFLP (*Single Facility Location Problem*). Para definir la localización de la bodega se consideró una versión del problema *p-medians* donde se tiene una bodega, de 9 disponibles, para atender a 180 clientes, adicionalmente se deben incluir los costos de la tierra y las tarifas del impuesto ICA dado que dependen directamente de la ubicación a seleccionar.

Para evaluar las ubicaciones disponibles bajo las mismas condiciones se construyó una función objetivo a partir de los costos de la tierra, las tarifas del impuesto y los costos de transporte, en este contexto consideró un consumo promedio de combustible equivalente entre todos los vehículos para asociarlo con el costo de transporte que cada unidad de la demanda se vendía a \$1 para aplicar la tarifa del impuesto ICA y que cada unidad demandada ocupa 1m² para relacionar el espacio requerido de todas las unidades demandadas con el costo de la tierra. Con el objetivo de comparar la efectividad del método de *p-medians* se resolverá el problema de ruteo para cada una de las bodegas ignorando el resultado del método mencionado.

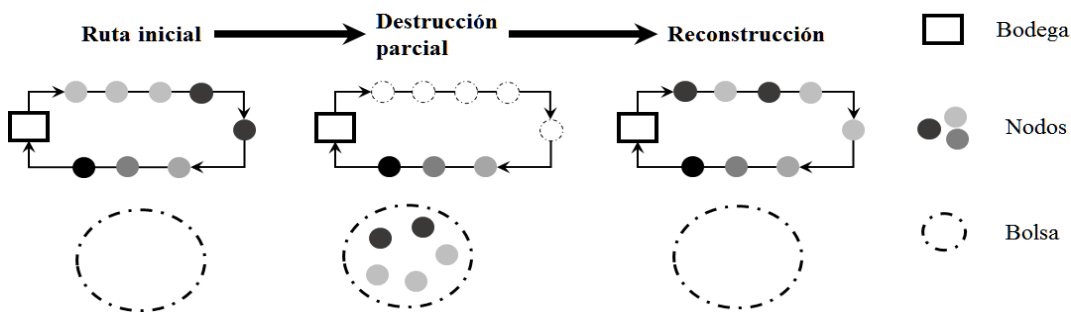
Modelo de ruteo

El modelo empieza evaluando el ruteo para cada tipo de vehículo con cuatro ordenamientos de clientes diferentes; vecino más cercano, nodos más cercanos a la bodega, orden por menor *due date* y orden por *early date*. A partir de este momento se tiene un conjunto de soluciones iniciales correspondientes al número de tipos de vehículos disponibles y cada ordenamiento mencionado, posteriormente se escoge como única solución inicial aquella con menor costo total, es decir la suma de costos de distancia y costos por tamaño de la flota.

A partir de la solución homogénea seleccionada se realiza de una búsqueda local con cambios entre cada par de nodos (*2-opt*) y para cada ruta se selecciona el camión que más se ajusta a la demanda a atender, esto se realiza con el objetivo de mezclar los camiones de la solución, disminuir los costos de ruta y los costos de utilización del camión. Con la necesidad de explorar otros espacios de solución se implementó la metaheurística LNS (*Large Neighborhood Search*), este método se encarga de destruir y reconstruir rutas para poder generar nuevas soluciones, ver ilustración 7. Adicionalmente, al final de cada iteración del LNS se ajusta cada ruta.

Los vecindarios de búsqueda del LNS se construyen con base al ordenamiento de donde salió la solución inicial, luego se selecciona un nodo aleatorio y para llenar la bolsa se remueve una cantidad aleatoria de nodos, en cualquiera de las rutas, que oscila entre el 5% y el 10% de todos los clientes. Para reducir la variabilidad de las soluciones se incluyó un multi-arraque, este procedimiento ejecuta las iteraciones del LNS hasta cumplir con un criterio de parada de iteraciones sin mejora en la función objetivo global.

Ilustración 7 Metodología LNS



Fuente: Autores

A continuación, se presenta el pseudocódigo y una representación de la destrucción y reconstrucción de las rutas usando el algoritmo de LNS.

Ilustración 8 Pseudo código LNS

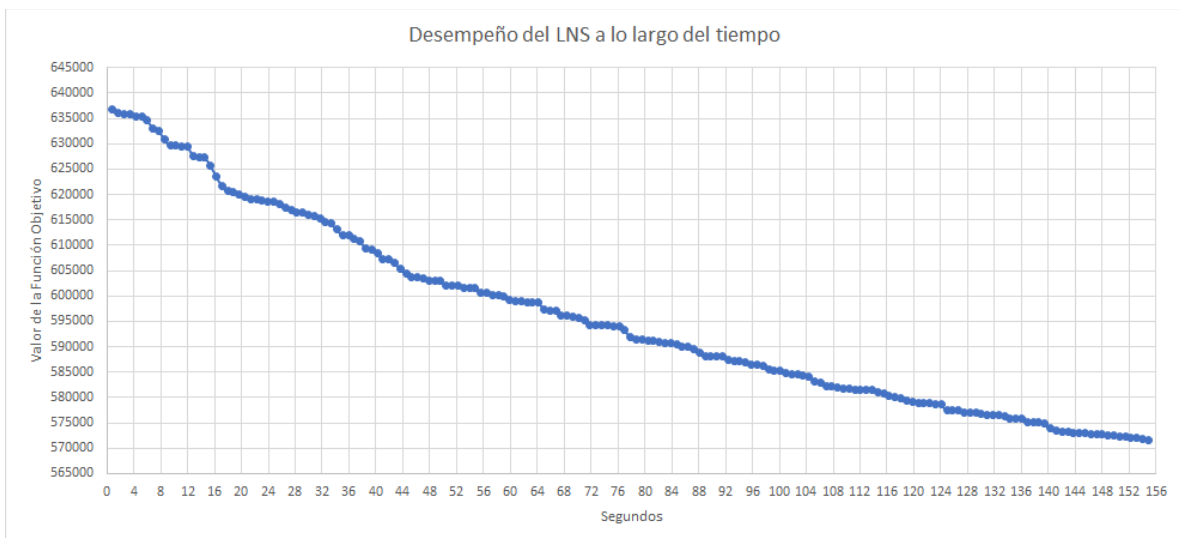
Algorithm 1 Large Neighborhood Search

```
1: procedure LNS(bs, it)
2:   Define bestCosto as Infinite
3:   Define bolsa as Array
4:   for i = 1 to it do
5:     Obtener RUTAS
6:     Vaciar bolsa
7:     while tamaño de bolsa  $\neq$  bs do
8:       ruta  $\leftarrow$  Seleccionar ruta aleatoria de RUTAS
9:       nodo  $\leftarrow$  Seleccionar nodo aleatorio de ruta
10:      if nodo  $\notin$  bolsa then
11:        Agregar nodo a la bolsa
12:        Quitar nodo de ruta
13:      end if
14:    end while
15:    for nodo  $\in$  bolsa do
16:      Insertar nodo en RUTAS
17:    end for
18:    if RUTAS es factible then
19:      costo  $\leftarrow$  Obtener costo total de RUTAS
20:      if costo < bestCosto then
21:        bestCosto  $\leftarrow$  costo
22:        Guardar RUTAS
23:      end if
24:    end if
25:  end for
26:  return RUTAS
27: end procedure
```

Fuente: Autores

Para ejemplificar el desempeño del algoritmo LNS se presenta la ilustración 9 Desempeño del LNS a lo largo del tiempo, la gráfica representa los valores de la función objetivo en el caso de estudio en Bogotá a medida que el algoritmo LNS utilizado se ejecutaba.

Ilustración 9 Desempeño del LNS en tiempo computacional



Fuente: Autores

La metaheurística LNS logró reducir en un 10,24% la solución obtenida por medio de la búsqueda local en un lapso de 155 segundos. La decisión de utilizar LNS se debe al impacto sobre el tiempo de ejecución y a la mayor diversidad de vecindarios explorados frente al uso de una búsqueda local (2-opt).

La implementación de la estrategia LNS permitió mejorar los valores obtenidos por heurísticas como la búsqueda local a través de la exploración de vecindarios. La estructura del LNS utilizado para resolver el problema incluyó el uso de factores como una bolsa de tamaño variable, en la que el número de nodos extraídos varía en cada una de las iteraciones del LNS, de esta manera a diferencia de la literatura no se hace uso de un número fijo de nodos a extraer, adicionalmente, la estrategia de multi arranque permite evaluar los valores generados por la heurística debido a la aleatoriedad que posee el algoritmo.

Instancias de prueba

Para garantizar un algoritmo robusto se buscaron instancias con características similares a las del problema propuesto, sin embargo, no se encontraron dichas instancias en la literatura y se utilizaron las propuestas por Liu y Shen, basados en las instancias de Solomon, que consideran clientes con ventanas de tiempo, flota heterogénea, costos asociados al tipo de vehículo y costos dependientes del tiempo de viaje.

Estas instancias consisten en 168 conjuntos de clientes diferentes con 3 subconjuntos denominados con las letras C, R y RC. El grupo C corresponde a clientes agrupados en clusters, el grupo R corresponde a clientes ubicados aleatoriamente y el grupo RC posee clientes ubicados en semi-cluster. A su vez cada grupo contiene dos subconjuntos denominados por los números 1 y 2, es decir, C1, C2, R1, R2, RC1, RC2, donde el número 1 hace referencia a horizontes de planeación cortos y capacidades pequeñas, a diferencia del número 2 donde tienen horizontes de planeación y capacidades mayores.

El valor de la función objetivo está conformado por un componente fijo y uno variable. Para el componente variable solo se utiliza el tiempo total de viaje, considerando que una unidad de distancia es igual a una unidad de tiempo y ambos aportan un punto a la función objetivo. Para el componente fijo se considera un costo por tipo de vehículo asociado a un juego de costos (a, b, c) y un subconjunto de clientes (C1, C2, R1, R2, RC1 y RC2) , en la tabla 9 se presenta el juego de costos definido por los autores (Liu y Shen, 1999)

El modelo se ejecutó en un computador con las siguientes características: 8 Gb RAM y un procesador Intel core i7 2.8Hz.

Tabla 9 Juego de costos de Liu & Shen

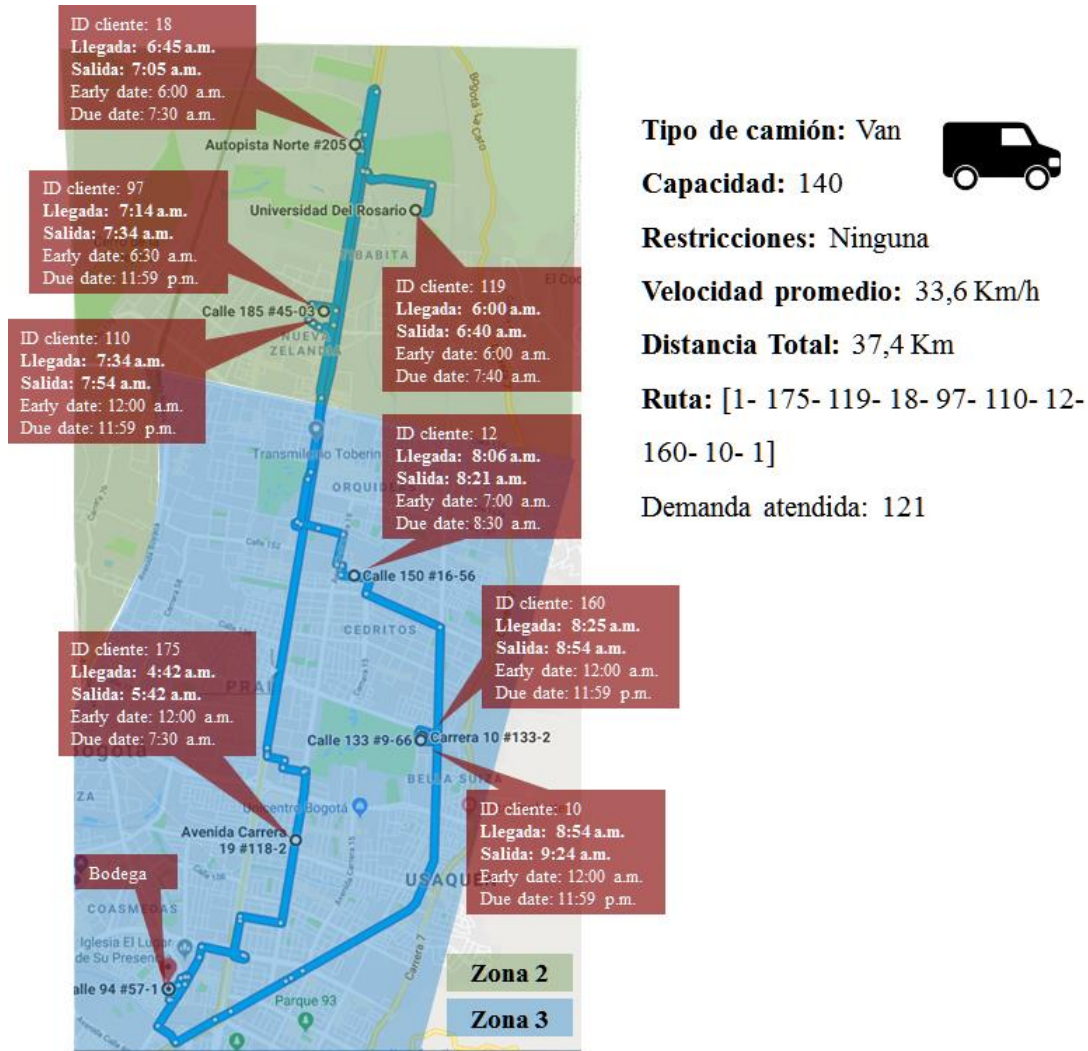
Juego de costos Liu & Shen									
Vehículo	Capacidad	COSTOS			Vehículo	Capacidad	COSTOS		
R1		a	b	c	R2		a	b	c
A	30	50	10	5	A	300	450	90	45
B	50	80	16	8	B	400	700	140	70
C	80	140	28	14	C	600	1200	240	120
D	120	250	50	25	D	1000	2500	500	250
E	200	500	100	90	C1		a	b	c
C1		a	b	c	A	400	1000	200	100
A	100	300	60	30	B	500	1400	280	140
B	200	800	160	80	C	600	2000	400	200
C	300	1350	270	135	D	700	2700	540	270
RC1		a	b	c	RC2		a	b	c
A	40	60	12	6	A	100	150	30	15
B	80	150	30	15	B	200	350	70	35
C	150	300	60	30	C	300	550	110	55
D	200	450	90	45	D	400	800	160	80
					E	500	1100	220	110
					F	1000	2500	500	250

Fuente: (Liu y Shen, 1999)

Para probar el modelo con todas sus restricciones se utilizó un conjunto de datos disponibles de 180 clientes con sus respectivas demandas y ventanas de tiempo. Posteriormente se geolocalizaron los clientes, ver ANEXO 2 Mapa de clientes, para construir las matrices de distancia entre bodegas y clientes.

Finalmente, para verificar la factibilidad de la solución del modelo se realizaron pruebas sobre las restricciones planteadas, a continuación, se presenta una de las rutas generadas en la solución del ruteo desde Bogotá con sus respectivos datos:

Ilustración 10 Recorrido de ruta



Fuente: Autores

Como anexo se presenta la comprobación de la ruta enunciada en la que se incluye la hora en la que se llega a la ubicación y la hora de salida con base a su tiempo de servicio. Teniendo en cuenta la implementación de la función de tiempo dependiente en algunas ocasiones el vehículo tendrá más de una velocidad en estas situaciones se realiza el cambio de velocidad que reestablece una velocidad acorde a la hora.

5. Resultados

Caso teórico

Con el objetivo de desarrollar un algoritmo robusto, se ejecutó el modelo con instancias de prueba de una versión relajada del problema, dado que no se encontraron instancias en la literatura con todas las restricciones planteadas, y se comparó este modelo frente a las mejores soluciones conocidas en la literatura, los resultados promedio se encuentran en la tabla 10. Estas instancias fueron propuestas por Liu y Shen considerando el problema de flota heterogénea, ventanas de tiempo duras, costos por tiempo de viaje y costos por tipos de vehículos de la flota. Los juegos de instancias son agrupadas por tipo de costo.

Los resultados a presentar corresponden a los siguientes autores: Liu y Shen con su algoritmo MOOS (Modified Optimistic Opportunity Savings) que combina el método de ahorros propuesto por Clarke y Wright, con un parámetro de forma para controlar los nodos secuenciales añadidos a rutas previas con más de dos nodos. Vidal con su metaheurística UHGS (Unified Hybrid Genetic Search), diseñada para resolver 10 variantes diferentes de problemas de ruteo como el VRPB (VRP with Backhauls), VRPSDP (VRP with Simultaneous Deliveries and Pickups), LDVRP (Load dependent VRP), entre otras. Koc con su algoritmo HEA (Hybrid Evolutionary Algorithm) que utiliza 9 operadores genéticos diferentes para remover a los miembros en cada generación y finalmente se presentan los resultados del modelo de esta investigación, denominado LNS 2018.

Tabla 10 Resultados del método LNS según juego de instancias contra la literatura

Juego de instancia	MOOS (Liu & Shen.1999)	UHGS (Vidal.2014)	HEA (Koc.2014)	LNS.2018	Diferencia a la mejor solución
R1A	4401	4103.16	4118.7	4188.83	2.09%
R1B	2054	1891.63	1898.1	1956.17	3.41%
R1C	1700	1574.32	1577.04	1624.50	3.19%
C1A	8295	7138.93	7143.35	7125.33	-0.19%
C1B	2485	2359.63	2362.38	2393.89	1.45%
C1C	1705	1618.18	1619.63	1631.00	0.79%
RC1A	5184	4915.1	4952.16	5092.75	3.61%
RC1B	2252	2129.04	2139.23	2205.60	3.60%
RC1C	1859	1752.19	1762.56	1847.50	5.44%
R2A	3975	3267.31	3272.48	3214.82	-1.61%
R2B	1797	1480.3	1471.33	1491.18	1.35%
R2C	1530	1237.79	1245.97	1257.36	1.58%
C2A	6889	5769.29	5746.63	5696.25	-0.88%
C2B	1970	1750.37	1748.52	1722.38	-1.50%
C2C	1300	1221.17	1218.18	1231.88	1.12%
RC2A	5273	4381.73	4391.16	4408.63	0.61%
RC2B	2338	1877.84	1867.8	1854.88	-0.69%
RC2C	1978	1545.29	1530.08	1537.25	0.47%

Fuente: (Koc, 2014), (Vidal 2014), (Liu & Shen 199) y los autores

El método diseñado a partir de una metaheurística LNS logró mejorar las mejores soluciones conocidas de 5 juegos de costos (identificadas con diferencia a la mejor solución con porcentaje negativo), realizadas estas pruebas se identifican y agregan las restricciones que permiten aplicar el modelo a una situación real como lo es el caso Bogotá.

En la tabla 11 presentada a continuación se incluyen los tiempos computacionales en minutos del algoritmo LNS, el algoritmo UHGS y HEA. El tiempo promedio para ejecutar las instancias con el algoritmo LNS es de 4.38 minutos mientras que el algoritmo UHGS toma un 40.7% más tiempo para ser ejecutado, por otra parte, el algoritmo HEA obtuvo un resultado promedio en tiempos de ejecución menor al LNS por lo que podría ser posible que algunos de los valores propuestos de función objetivo puedan ser mejorados a cambio de mayor tiempo de ejecución. La medición de tiempos de ejecución permitió evaluar la calidad del algoritmo propuesto con referentes de la literatura y de esta manera mejorar

Tabla 11 Tiempos computacionales contra la literatura

Juego de instancias	UHGS (Vidal.2014)	Diferencia con LNS	HEA (Koc.2014)	Diferencia con LNS	LNS 2018
R1a	5.38	-65.43%	4.99	-62.73%	1.86
R1b	5.54	-60.65%	4.80	-54.58%	2.18
R1c	5.68	-53.7%	4.57	-42.45%	2.63
C1a	5.79	-50.78%	4.45	-35.96%	2.85
C1b	5.97	-47.24%	4.20	-25.00%	3.15
C1c	5.96	-41.78%	4.01	-13.47%	3.47
RC1a	6.35	-41.42%	3.83	-2.87%	3.72
RC1b	6.61	-32.83%	3.61	22.99%	4.44
RC1c	6.67	-26.69%	3.42	42.98%	4.89
R2a	6.8	-23.97%	3.30	60.06%	5.17
R2b	6.84	-18.71%	3.35	68.48%	5.56
R2c	7.16	-18.72%	3.30	73.73%	5.82
C2a	6.99	-9.87%	3.47	90.91%	6.3
C2b	6.63	-9.35%	3.65	73.2%	6.01
C2c	6.16	-8.77%	3.93	53.97%	5.62
RC2a	5.79	-6.74%	3.93	37.4%	5.4
RC2b	5.49	-8.20%	4.21	19.71%	5.04
RC2c	5.15	-7.96%	4.4	7.73%	4.74
Promedio	6.16		3.92		4.38
Desv. estándar	0.61		0.55		1.39

Fuente: (Koc, 2014), (Vidal 2014) y los autores

Caso aplicado

En la tabla 12 se presentan los costos calculados para cada ubicación con el fin de seleccionar una ubicación como centro de distribución, los costos obtenidos por la metodología *p-mediana* se encuentran en la columna de Costo estimado, mientras que la columna de Costo final presenta los costos obtenidos al realizar el ruteo para cada ubicación. Estos dos casos se compararon bajo las mismas condiciones en cuanto a tamaño de bodega y precio de venta, columna de Costo fijo, sin embargo, el costo del ruteo es diferente en cada caso.

Tabla 12 Costos de localización

Ubicación	Costo fijo	Costo Estimado	Costo final
Bogotá 1	\$ 1,362,690.31	\$2,323,625.27	\$ 1,661,032.80
Bogotá 2 (Montevideo)	\$ 1,088,883.41	\$2,448,142.14	\$ 1,376,963.12
Cota	\$ 877,508.51	\$3,422,629.55	\$ 1,286,572.03
Chía	\$ 881,175.89	\$3,819,285.43	\$ 1,291,061.3
Soacha	\$ 565,712.48	\$3,278,894.67	\$ 1,039,162.91
Mosquera	\$ 704,637.57	\$4,593,206.71	\$ 1,059,678.98
Madrid	\$ 584,637.89	\$3,864,270.05	\$ 1,077,959.89
Tocancipá	\$ 368,345.69	\$5,864,328.88	\$ 1,044,864.00
Funza	\$ 751,457.07	\$3,516,690.71	\$ 1,066,276.9

Fuente: Autores

En el método de *p-median* el costo de ruteo se compone de la distancia de la bodega a todos los clientes por una tasa de consumo promedio de combustible de todos los tipos de vehículos, en contraste con el segundo caso donde el costo de ruteo contempla las rutas y la configuración de la flota generada por el modelo. El fallo del método de *p-median* es consecuencia de los costos de ruteo, lo cual permite resaltar el impacto que tiene el ruteo en este problema

La aplicación del modelo en el escenario de Bogotá requirió el análisis de costos resultante de la ubicación de la bodega en diferentes municipios como: Chía, Tocancipá, Cota, Soacha, Mosquera, Madrid y Funza, adicionalmente se incluyó una segunda bodega en el sector industrial de Montevideo en Bogotá. En la tabla 13 se encuentran los parámetros de costo por metro cuadrado identificados para cada ubicación, el costo del impuesto de industria y el resultado del ruteo para el conjunto de 180 clientes disponibles en el área de Bogotá y sus alrededores.

Tabla 13 Parámetros de análisis y el modelo

Ubicación	Valor metro cuadrado/día	Tarifa de impuesto por miles de pesos	Costo Ruteo por día
Bogotá 1	\$ 752,44	7,52	\$ 298.341
Bogotá 2 (Montevideo)	\$ 601,25	7,52	\$ 288.080
Cota	\$ 484,54	4,96	\$ 409.064
Chía	\$ 486,56	6,35	\$ 409.885
Soacha	\$ 312,37	5,75	\$ 473.449
Mosquera	\$ 389,08	6,89	\$ 355.041
Madrid	\$ 322,82	7,00	\$ 493.322
Tocancipá	\$ 203,39	5,87	\$ 619.773
Funza	\$ 414,93	6,07	\$ 314.820

Fuente: Autores

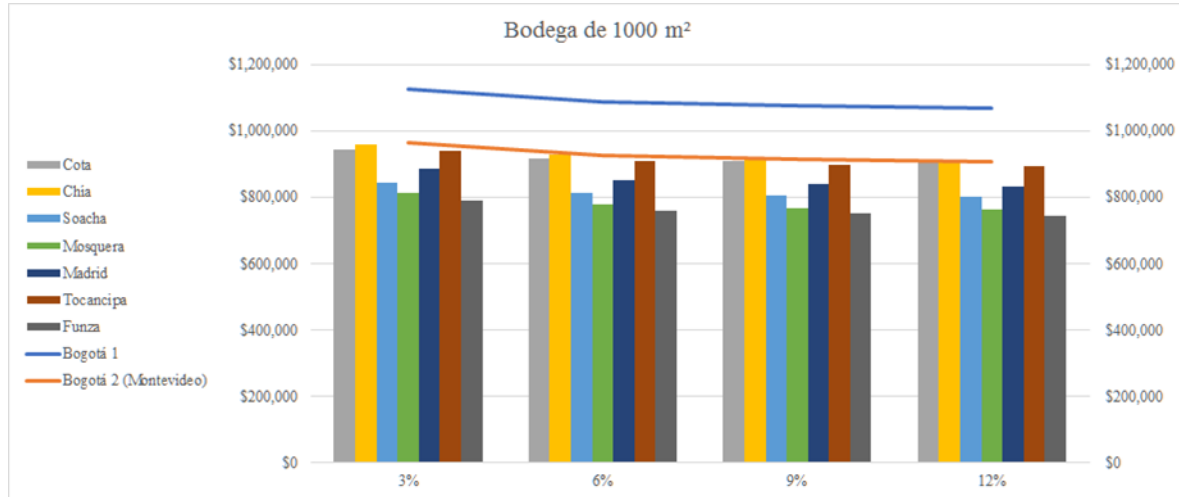
Para medir el impacto de la localización de la bodega en diferentes municipios se utilizó un análisis de sensibilidad, ver anexo 3 Análisis de sensibilidad, donde se varía el tamaño de la bodega de 200 m² a 1000 m² en intervalos de 200m² y el porcentaje total de ventas desde el 3% hasta el 12% en intervalos de 3 puntos porcentuales. Los costos asociados a la bodega en cada ubicación son resultado de multiplicar el tamaño de la bodega por precio del metro cuadrado correspondiente, los costos del ruteo corresponden al resultado generado por el modelo y los costos por impuesto se calculan aplicando la tarifa correspondiente al total de ventas.

Para calcular el total de ventas se divide el costo del ruteo en la ubicación de Bogotá 1 sobre el valor del porcentaje de ventas del escenario, de esta manera se tiene un mismo valor de ventas totales en todas las ubicaciones y la tarifa no va a ser afectada por los costos del ruteo.

En la ilustración 11 se presenta el comportamiento de los costos totales frente a un tamaño de bodega constante y múltiples porcentajes de ventas, a partir de una bodega con estas dimensiones el impacto del ruteo se vuelve decisivo. Con bodegas de tamaño inferior a los 1000m² los costos de tierra en Bogotá solo son inferiores a los de municipios como Madrid y Tocancipá, con bodegas de dimensiones superiores las ubicaciones en Bogotá dejan de ser competitivas contra cualquier municipio, siendo Funza el que presenta los menores costos totales en cada escenario.

El aumento de costos es consecuencia del uso de la tierra que, para el caso de los municipios genera un balance con respecto a los costos de transporte. Adicionalmente a medida que se incrementa el tamaño de la bodega, incrementa la brecha entre las ubicaciones de Bogotá 1 y Bogotá 2.

Ilustración 11 Escenarios con dimensiones de la bodega constante



Fuente: Autores

6. Conclusiones

El modelo propuesto aborda el problema de ruteo con ventanas de tiempo con flota heterogénea incluyendo la restricción de acceso a los clientes, esta variante no ha sido detallada de manera conjunta en la literatura y es una aproximación a un caso real como se evidencia en la ciudad de Bogotá. Para el desarrollo del modelo se utilizaron múltiples ordenamientos iniciales para los clientes, dado que esta estrategia mejoró la calidad de las soluciones durante la etapa de comprobación con instancias. También se utilizó una hibridación de una búsqueda local con la metaheurística LNS que superó algunos de los mejores valores conocidos para las instancias de Liu & Shen para flota heterogénea, la comparación se realizó frente al algoritmo HEA de Koç y el UHGS de Vidal presentados en el año 2014.

El algoritmo es capaz de modificar la configuración de flota con el fin de determinar el tipo de vehículo adecuado para la ruta, de esta manera es posible cumplir con las restricciones de circulación utilizando una flota heterogénea. En el caso de Bogotá se observó que es necesario utilizar la flota heterogénea para acceder a todas las zonas de la ciudad sin violar las restricciones del distrito. Adicionalmente, la función de tiempo dependiente permitió analizar el impacto del flujo vehicular a lo largo del día en la ciudad e integrarlo dentro del modelo para brindar una representación más cercana de realidad.

La decisión de localizar una bodega dentro o fuera de la ciudad analiza hasta qué punto es rentable para una empresa administrar sus operaciones logísticas en un municipio aledaño a la ciudad teniendo en cuenta beneficios como la reducción en la tarifa de impuestos, el costo de la tierra o las facilidades logísticas disponibles. Como resultado del análisis se encontró que los municipios de Funza, Mosquera y la zona de Montevideo poseen ventajas competitivas en cuanto al costo de la tierra, sin embargo, las tarifas del impuesto de industria y comercio en Bogotá son superiores a los de cualquier municipio estudiado y esto incentiva a que las operaciones logísticas de gran volumen sean menos costosas en los municipios aledaños.

Finalmente, la industria demanda soluciones en horizontes de tiempo cortos con el fin de tomar decisiones operativas como el ruteo de vehículos, por este motivo uno de los criterios de desempeño al evaluar un modelo es su calidad en términos de tiempo. Las decisiones asociadas a la localización son consideradas decisiones tácticas o estratégicas por lo que resolverlo junto al problema de ruteo puede requerir de métodos más sofisticados para su desarrollo que a su vez requerirá de mayores tiempos. Las nuevas metodologías deben enfocarse en el impacto de la localización de planta en el ruteo de vehículos teniendo en cuenta las características propias del problema de distribución para dar solución al problema general, metodologías de localización como *p-median* no son muy eficaces en el problema estudiado debido a su enfoque en el factor distancia y no en el impacto de las decisiones subsiguientes.

7. Glosario

VRP: El VRP es un problema de diseño de rutas para N vehículos que busca minimizar el costo total donde, cada vehículo inicia y termina en un depósito tal que cada cliente es visitado una sola vez. (Berov, 2016)

VRPTW: Es una extensión del problema VRP donde cada cliente tiene una ventana de tiempo asociado y específico de visita. (Solomon, 1987)

Planeación Estratégica: Conjunto de decisiones logísticas que consideran horizontes de tiempo superiores a un año e incluyen el diseño y localización de recursos de largo plazo. (Gutiérrez, 2013)

Metaheurística: Son métodos de solución que controlan la exploración de un espacio de soluciones mediante técnicas de independientes del problema con estrategias de alto nivel. Esto les permite explorar el espacio de solución de manera más extensiva y generar mejores soluciones evitando caer en óptimos locales. (Labadie, Prodhon, & Prins, 2016)

Robustez: Capacidad de un algoritmo para generar buenas soluciones frente a una instancia dada. (Olli Bräysy & Gendreau, 2005)

8. Referencias

Acuerdo No 107. *Por medio del cual se expide el Estatuto de Rentas, se adiciona el Procedimiento Tributario y el Régimen de Sanciones para el municipio de Chía, Cundinamarca y se dictan otras disposiciones.* Chía, Cundinamarca. 28 de diciembre de 2016. Tomado de http://concejochia.micolombiadigital.gov.co/sites/concejochia/content/files/000028/1353_2016_acuerdo_no_107_de_2016.pdf

Acuerdo No. 24. *Por el cual se dictan disposiciones en materia de impuestos del municipio de Cota, se armoniza su administración, procesos y procedimientos con el estatuto tributario nacional, se expide el estatuto tributario municipal o cuerpo jurídico de las normas sustanciales y procedimentales de los tributos municipales y se dictan otras disposiciones de carácter tributario.* Cota, Cundinamarca. 30 de diciembre de 2010. Tomado de http://madridcundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/madridcundinamarca/content/files/000137/6816_resolucion-004-de-enero-12-de-20171.pdfpdf-codigos-ciiu.pdf

Acuerdo No. 3. *Por medio del cual se modifican las tarifas del impuesto de industria y comercio y avisos y tableros y se establecen otras disposiciones.* Funza, Cundinamarca. 12 de mayo de 2012. Tomado de <https://incp.org.co/Site/2014/info/archivos/acuerdo-03-funza.pdf>

Acuerdo no. 31. *Por medio del cual se modifica el estatuto de rentas municipal, se adiciona la normatividad sustantivo tributario, el procedimiento tributario y el régimen sancionatorio para el municipio de Mosquera y se dictan otras disposiciones.* Mosquera, Cundinamarca. 20 de diciembre de 2013. Tomado de http://mosqueracundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/mosqueracundinamarca/content/files/000007/343_acuerdon_031estrent2014.pdf

ANALDEX. (2016). *Índice de desempeño logístico 2016.* (). Asociación Nacional de comercio exterior: Tomado de <http://www.analdex.org/2016/07/11/indice-desempeno-logistico-2016/>

Baldacci, R., Mingozzi, A., & Roberti, R. (2012). *Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints* doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.ejor.2011.07.037>

Ballou, R. H. (Ed.). (2004). *Business logistics. planning, organizing, and controlling the supply chain* Upper Saddle River, New Jersey Pearson Education Prentice Hall c2004; 5th ed. Tomado de <http://search.ebscohost.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login.aspx?direct=true&db=cat01040a&AN=pjbc.703554&lang=es&site=eds-live>

Baumgartner, K., Fuetterer, A., & Thonemann, U. W. (2012). *Supply chain design considering economies of scale and transport frequencies* doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.ejor.2011.11.032>

Berov, T. D. (2016). Initial solutions for vrptw by taking into account the time windows. *Proceedings of the Multidisciplinary Academic Conference*, , 111-116.

Bhatnagar, R., & Sohal, A. S. (2005). *Supply chain competitiveness: Measuring the impact of location factors, uncertainty and manufacturing practices* doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/10.1016/j.technovation.2003.09.012>

- Bolloori Arabani, A., & Farahani, R. Z. (2012). *Facility location dynamics: An overview of classifications and applications* doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>
- Brandeau, M. L., & Chiu, S. S. (1989). An overview of representative problems in location research. *Management Science*, (6), 645.
- Cámara de comercio de Bogotá. (2015). *Caracterización económica y empresarial de diecinueve municipios de Cundinamarca*. (). Bogotá: Cámara de comercio de Bogotá. Tomado de <http://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14584/caracterizacion%20economica%20y%20empresarial%20de%2019%20municipios.pdf?sequence=1>
- Castro Granados, D. P. (2016). *Crecimiento en los últimos años de las zonas francas en Colombia – caso región andina* (1). Available from Repositorio UMNG Bogotá. (8600844).
- Decreto No. 094. *Por el cual se establece la clasificación de actividades económicas, para el impuesto de industria y comercio en Soacha - Cundinamarca*. Soacha, Cundinamarca. 15 de julio 2013. Tomado de http://www.alcaldiasoacha.gov.co/phocadownloadpap/Normatividad/normatividad_municipal/normatividad_sec_hacienda/DECRETO%20%20No.%20%20094%20%20DE%20%202013%20-%20CODIGO%20CIU%20-%20TARIFAS%20A%20PARTIR%20DEL%202013.pdf
- Decreto 520 de 2013 alcalde mayor, Decreto Definiciones generales (2013). Tomado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=55472>
- Clarke, G. and Wright, J.R. (1964) *Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. *Operations Research*, 12, 568-581.
<http://dx.doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
- Cordeau, J., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., & Vigo, D. (2007). Chapter 6 vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 14, 367-428. doi:10.1016/S0927-0507(06)14006-2
- Echavarría, J. J., & Villamizar, M. (2015). La industria bogotana: ¿Desindustrialización o desverticalización? [La industria bogotana: ¿Desindustrialización o desverticalización?] *Nota Editorial no.135 La Industria Bogotana: ¿Desindustrialización O Desverticalización?, 1, 2*.
- Gutiérrez, V. (2013). Home health care logistics management: Framework and research perspectives. *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJEM)*, 4(3), 173.
- Labadie, N., Prodhon, C., & Prins, C. (2016). *Metaheuristics for vehicle routing problems*. London: Wiley-ISTE. Tomado de <http://search.ebscohost.com.ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login.aspx?direct=true&db=edsebk&AN=1170143&lang=es&site=eds-live>
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, (4), 408.
- Latha Shankar, B., Basavarajappa, S., Kadavevaramath, R. S., & Chen, J. C. H. (2013). A bi-objective optimization of supply chain design and distribution operations using non-dominated sorting algorithm: A case study. *Expert Systems with Applications*, 40, 5730-5739. doi:10.1016/j.eswa.2013.03.047
- Liu, F., & Shen, S. (1999). The fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. *50*, 721.
- Olli Bräysy, & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation Science*, (1), 104.
- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). *Strategic facility location: A review* doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6)
- Prodhon, C., & Prins, C. (0101). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1.
- Resolución 4100 de 2004 ministerio de transporte, Resolución (2004). Tomado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15600>
- Resolución 004. *Por medio del cual se reglamenta el detalle de los códigos CIU y tarifas del impuesto de industria y comercio y reteica establecidos en el artículo 62 del acuerdo 018 de 2016 "estatuto de rentas del municipio de Madrid"*. Madrid, Cundinamarca. 12 de Enero de 2017, Tomado de http://madridcundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/madridcundinamarca/content/files/000137/6816_resolucion-004-de-enero-12-de-20171.pdfpdf-codigos-ciu.pdf
- Resolución SDH-000079. *Por medio de la cual se adopta para la administración del impuesto de industria y comercio, avisos y tableros en el Distrito capital de Bogotá, la Clasificación de actividades económicas - CIU revisión 4 adaptada por el DANE para Colombia*. Bogotá D.C. 11 de marzo de 2013. Tomado de

[http://www.shd.gov.co/shd/sites/default/files/files/impuestos/RES-SDH-000079-2013 CLASIFICACION ACTIVIDADES CIU.pdf](http://www.shd.gov.co/shd/sites/default/files/files/impuestos/RES-SDH-000079-2013%20CLASIFICACION%20ACTIVIDADES%20CIU.pdf)

Rincon-Garcia, N. (2016). *Freight transport, routing software and time-dependent vehicle routing models*

Rincon-Garcia, N., Waterson, B. J., & Cherrett, T. J. (2017). Requirements from vehicle routing software: Perspectives from literature, developers and the freight industry. *Transport Reviews*, , 1-22.
doi:10.1080/01441647.2017.1297869

ŠADEROVÁ Janka, a., & KACMÁRY Peter, a. (2016). Allocation of distribution warehouse as one option for transport costs reduction. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, (3), 36.

Secretaría Distrital de Hacienda. (2011). *Efectos fiscales del desplazamiento de empresas desde Bogotá a otros municipios del país*. (). Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. Tomado de http://pricc-co.wdfiles.com/local--files/grupo-analisis-de-dinamica-regional/eduardo_olivar_-_presentacion_desplazamiento_empresas_jul_2011.pdf

Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). Consolidado restricciones, programación restricción 2017 mapa restricción vehículos de carga. Tomado de <http://www.movilidadbogota.gov.co/web/node/1987>

Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Investigación. (2015). “**Colombia es logística**” - **la encuesta nacional de logística 2015**. Tomado de <http://www.colombiacompetitiva.gov.co/prensa/2015/Paginas/Colombia-es-Logistica-La-Encuesta-Nacional-de-Logistica-2015.aspx>

Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, (2), 254.

Vidal, T., Crainic, T., Gendreau, M., Prins, C., (2014). A unified solution framework for multi attribute vehicle routing problems. *Operations Research*, (3), 658-673.

Villegas, J., Gutiérrez, V., & Palacio, J. (2012). Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios. *Revista Universidad EAFIT*, 43(145), 60-<http://pubaones.eaft.edu.og/nde.php/resta-unersdad-eaft/arte/ew/781>.