



Investigación Administrativa  
ISSN: 1870-6614  
ISSN: 2448-7678  
ria@ipn.mx  
Instituto Politécnico Nacional  
México

## Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte

---


**Zapata-Cortes, Julián Andrés; Vélez-Bedoya, Ángel Rodrigo; Arango-Serna, Martín Darío**  
Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte  
Investigación Administrativa, vol. 49, núm. 126, 2020  
Instituto Politécnico Nacional, México  
**Disponible en:** <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456063405009>

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

## Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte

Distribution process improvement in a transport company

*Julián Andrés Zapata-Cortes*  
*Fundación Universitaria Ceipa, México*  
julian.zapata@ceipa.edu.co

 [http://orcid.org/ https://  
orcid.org/0000-0002-1270-3577](http://orcid.org/https://orcid.org/0000-0002-1270-3577)

Redalyc: [http://www.redalyc.org/articulo.oa?  
id=456063405009](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456063405009)

*Ángel Rodrigo Vélez-Bedoya*  
*Fundación Universitaria Ceipa, México*  
angel.velez@ceipa.edu.co

 [http://orcid.org/https://  
orcid.org/0000-0003-2135-9226](http://orcid.org/https://orcid.org/0000-0003-2135-9226)

*Martín Darío Arango-Serna*  
*Universidad Nacional de Colombia, Colombia*  
mdarango@unal.edu.co

 [http://orcid.org/ https://  
orcid.org/0000-0001-8448-8231 E-](http://orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-8448-8231)

Recepción: 04 Abril 2020  
Aprobación: 26 Junio 2020

### RESUMEN:

El transporte es una actividad clave para el desempeño competitivo de las empresas, ya que es responsable de alrededor del 50% de los costos logísticos de las mismas. El objetivo de este artículo es mejorar la gestión del ruteo de vehículos de una empresa de paquetería en Medellín-Colombia, para lo que se utilizó un método de optimización basado en el problema de ruteo de vehículos con flota de capacidad heterogénea. El resultado es la reducción en un 53% los costos de distribución, siendo una aplicación original en el sector transportador colombiano y fácilmente replicable a otras empresas de la región. Igualmente, a partir de esta aplicación se obtienen otros hallazgos que permiten reducir el número de vehículos, permitiendo disminuir los impactos negativos del transporte en la sociedad y el ambiente. La principal limitación es la complejidad implícita del modelo, que dificulta incluir otras variables para su aplicación en otras empresas y sectores.

**PALABRAS CLAVE:** Logística, Ruteo de vehículos, distribución de mercancías, Costos de transporte, optimización.

### ABSTRACT:

Transportation is a key activity for the competitive of companies, since it is responsible for around 50% of their logistics costs. The objective of this article is to present the application of an improvement method for the routing process in a courier company in Medellin-Colombia, in which an optimization method was used based on the Vehicle Routing Problem model with heterogeneous capacity. The main result is a 53% reduction in the distribution costs, being an original application in the Colombian transport sector, which can be easily replicable to other companies in the country and the region. Additional findings are obtained by reducing the number of vehicles, allowing reducing the negative impacts of transportation activities to society and the environment. The main limitation of the work is the complexity of the model that make it difficult the inclusion of other variables for its application in other companies and sectors.

**KEYWORDS:** Logistics, vehicle routing, goods distribution, transportation costs, optimization.

### INTRODUCCIÓN

La globalización y los cambios en los procesos de venta distribución de productos, fruto del comercio electrónico ha presionado a las empresas hacia nuevos entornos de mayor competitividad, en donde es

necesario desarrollar mecanismos y estrategias que les permita responder de mejor manera a los clientes y generar procesos más eficientes, con la intención de asegurar mejores niveles de servicio y menores costos para la compañía (Homaei & Hamdy, 2020). Para esto es necesario la aplicación de herramientas matemáticas y de sistemas de información que ponen a disposición de los gerentes la capacidad de tomar decisiones basados en datos e información verídica y con la capacidad de encontrar la mejor asignación de recursos posibles para el desarrollo de una actividad.

La cadena de suministros es uno de los elementos que ha tomado mayor relevancia en los últimos tiempos de cara a la competitividad de las empresas, ya que la logística afecta el nivel de servicio y los costos de los productos (Mangan & Lalwani, 2016). Una logística mal realizada puede generar demoras en la entrega de los productos, deterioro de los mismos, errores en las órdenes, excesos de movimientos e inventario y desatención de los clientes, generando de esta forma insatisfacciones de los clientes y altos costos operativos, lo cual inmediatamente resta competitividad a las empresas (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017). Es por esto que autores como Crainic, Gendreau, & Jemai (2020) y Arango-Serna, y otros (2018) argumentan que la logística ha dejado de ser una simple actividad de apoyo, para convertirse en una competencia medular en las organizaciones y los países que buscan lograr altos niveles de competitividad y posicionamiento en la economía mundial.

Es necesario que las empresas propongan mecanismos que velen por la optimización de las actividades de la cadena de suministro y la logística empresarial; en este sentido, la entrega de los productos en las ciudades, como último eslabón de la cadena de suministro, juega un papel crítico en la satisfacción de los clientes y los costos en las empresas. Según la encuesta nacional logística, en Colombia el costo del transporte equivale en promedio al 35.2% de los costos logísticos totales; en éste el 42.89% de los kilómetros recorridos realizados por empresas transportadores corresponden a viajes en el entorno urbano (Departamento Nacional de Planeación, 2018). De esta manera, proponer esquemas que mejoren la utilización de los recursos de los procesos de transporte, como es el número de los vehículos, no solo permite generar mayores eficiencias y reducir los costos para las empresas, sino que también puede impactar de manera positiva el entorno de las ciudades, ya que mediante la reducción de la intensidad del transporte es posible disminuir el número de vehículos circulando en las ciudades, lo que permite mitigar los impactos en la congestión y la contaminación generada por el transporte (Zapata-Cortes, 2016; Arango-Serna & Serna-Urán, 2018; Rajé, Tight, & Pope, 2018).

Este artículo presenta el análisis del proceso de distribución de mercancías de una empresa de paquetería en la ciudad de Medellín-Colombia y el área metropolitana que la rodea, con el objetivo de mejorar la gestión del ruteo de vehículos. Para ello, se propone la utilización de una herramienta de ruteo de vehículos buscando optimizar los costos de transporte, como una alternativa para incrementar la competitividad de las empresas de este sector. En los siguientes apartados se presenta una descripción de la importancia de una correcta gestión del transporte, para pasar a una revisión de las posibles herramientas que pueden ser utilizadas para mejorar las decisiones y optimizar las redes de distribución y transporte en las ciudades. Posterior a esto se presenta la metodología de análisis y el modelo de ruteo aplicado, para finalmente presentar los resultados y las conclusiones derivadas de la investigación realizada en la empresa objeto de estudio.

## ADMINISTRACIÓN DEL TRANSPORTE

El transporte es una función clave en la cadena de suministro (Chopra, 2018) y tiene como función unir físicamente los clientes con los proveedores de un bien, sean materias primas, materiales semi-elaborados o productos terminados, permitiendo de esta manera el flujo de materiales y recursos entre las empresas de la cadena de suministro (Fana, Pan, Pan, Zhou, & Chen, 2020). Sin embargo, esta función no solo se encarga del desplazamiento de los materiales, sino que además contempla aspectos clave como la selección de la estrategia de transporte y distribución a implementar, el tipo de vehículo o modo de transporte a utilizar, la secuencia

de las rutas y de los procesos de transporte, el uso de tecnologías de la información y la definición de las actividades de control de mismo; todo esto buscando minimizar los costos totales de la operación y satisfacer las necesidades de los clientes en cuanto a la entrega de los productos (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017)

El transporte y la distribución de mercancías normalmente está compuesto por múltiples instancias y pasos para enviar la mercancía a los clientes desde los proveedores, dentro de los cuales también pueden existir varias instalaciones. La elección de cuál camino tomar, cuál instalación utilizar, los vehículos y las rutas a seguir, son los elementos a determinar en la estrategia de distribución (Rushton, Croucher, & Baker, 2017; Zapata-Cortes, 2016). En los procesos de transporte y distribución son además llevadas a cabo varias actividades como la carga y descarga de los productos, la manipulación de los mismos, la gestión de los inventarios y la consolidación y desconsolidación de la mercancía, entre otras, las cuales deben ser correctamente administradas para lograr reducir los costos y cumplir de manera adecuada con las exigencias de los clientes (Arango-Serna, y otros, 2018)

Los costos de transporte, que incluyen todas las actividades relacionadas, representan alrededor del 15% al 20% de los costos finales de un producto, siendo equivalentes a casi la mitad de los costos logísticos totales de las empresas (Querish, Taniguchi, & Pomboon, 2016; Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Una buena gestión de las actividades de transporte implica el desarrollo de los planes estratégicos, tácticos y operativos del proceso, con la intención de distribuir y utilizar adecuadamente los diferentes recursos involucrados, como son la infraestructura, los equipos (vehículos), las personas y la tecnología. En estos procesos de planificación es fundamental comprender que la empresa de transporte está vinculada a múltiples actores externos que afectan y se ven influenciados por las actividades de transporte como la sociedad, el gobierno y la ciudad misma, entre otros (Papoutsis & Nathanail, 2016; Richter, Löwner, Ebendt, & Scholz, 2020; García, Sánchez, & Avelar, 2020; Van Duin, Wiegman, Tavasszy, Hendriks, & He, 2019). Estos planes de transporte deben responder a las exigencias competitivas de la empresa, pero deben ceñirse a todas las restricciones impuestas por los actores, como es el caso de los límites de peso en zonas específicas de las ciudades (Silva & Teles, 2020) o las restricciones de movilidad en pro de asegurar la seguridad y calidad de vida, tanto de los trabajadores como de la comunidad en general (Gatta, Marcucci, Nigro, Patella, & Serafini, 2019; Zapata-Cortes, 2016). Sin embargo, en la administración del transporte no se debe pensar únicamente en los beneficios para la empresa, sino que es además necesario ser responsables con los otros actores y proponer planes de distribución que sean amigables con el medio ambiente y la sociedad (Diao, 2019)

En la planificación y gestión de las operaciones de transporte se deben tener presente no solo la eficiencia operativa y las restricciones impuestas por otros autores, sino que también es necesario considerar la percepción del cliente sobre la misma, lo cual determina el nivel de servicio que este percibe. Entre los aspectos más relevantes del nivel de servicio en las operaciones de transporte se encuentra el tiempo y la variabilidad de este en la operación, las condiciones de los productos entregados, la confiabilidad de las entregas, la disponibilidad de tecnologías de la información para la trazabilidad de los vehículos y las condiciones de higiene en el transporte, entre otros (Rushton, Croucher, & Baker, 2017; Querish, Taniguchi, & Pomboon, 2016; Chabot, Bouchard, Renaud, & Coelho, 2018)

El cumplimiento del nivel de servicio esperado por el cliente, es decir, sus expectativas, son fundamentales para lograr el éxito de las empresas a corto y largo plazo, ya que este cumplimiento permitirá mantener el interés de los clientes por los servicios y bienes de la empresa. Para cumplir con las expectativas de los clientes y mejorar la calidad en los procesos de transporte se requiere que estos sean ágiles, puntuales y fiables en las entregas (Sumantri, 2017), asegurar condiciones de seguridad e higiene en el transporte, cumplir requisitos de horarios y lugar de entrega y proveer buenos sistemas y tecnologías de la información, que permitan el control de las actividades u operaciones de transporte (Arango-Serna, y otros, 2018)

De esta forma, los administradores de transporte deben buscar mecanismos que permitan de manera simultánea mejorar las condiciones de operación para la empresa, los clientes y los demás actores del sistema,

lo que requiere hacer uso de estrategias como la consolidación de la mercancía para la optimización del tamaño de los envíos, la reducción de las distancias recorridas, la disminución de los vehículos necesarios, así como la generación de procesos ágiles que propendan por disminuir los tiempos de respuesta requeridos para realizar las operaciones de transporte y atender a los clientes, entre otras estrategias (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017)

Nuevas metodologías como la Logística Esbelta – Lean Logistics (Sumantri, 2017)) buscan reducir los desperdicios en la cadena de suministros y en las operaciones de transporte y distribución; se pretende reducir los recursos necesarios para el reabastecimiento de los clientes, los tiempos y aumentar la velocidad en la cadena de suministro (Arango-Serna, Gil, & Zapata-Cortés, 2009). El objetivo del lean logistics en la gestión de transporte es reducir los movimientos innecesarios y reducir el tiempo medio de dichos desplazamientos, así como la variación con respecto a ese valor promedio (Arango-Serna, Gil, & Zapata-Cortés, 2009; Sumantri, 2017)

Es importante que los administradores de las operaciones de transporte consideren que la correcta gestión de la operación no radica únicamente en la reducción del flete o de los costos de transporte, ya que esto puede llevar a deterioro de otros aspectos fundamentales del transporte que son igual de importantes, como la seguridad, la confiabilidad y el nivel de servicio (Arango-Serna, Gil, & Zapata-Cortés, 2009; Sumantri, 2017). Debe buscarse la reducción total de los desperdicios, que pueden estar asociados a tiempos muertos, subutilización de los vehículos, distancias y recorridos innecesarios, uso de vehículos inapropiados, entre otros factores que generan extra costos (Arango-Serna, Gil, & Zapata-Cortés, 2009; Departamento Nacional de Planeación, 2018)

Para reducir desperdicios en los procesos de transporte es necesario tomar medidas que conlleven a optimizar el proceso mediante la interacción entre socios comerciales y transportadores, la flexibilidad en la distribución, la compensación de objetivos entre interesados y la adopción de un enfoque de sistema adaptativo complejo (Janjevic, Knoppen, & Winkenbach, 2019).

La flexibilidad se relaciona con la capacidad de la empresa de hacer frente de manera eficiente a los cambios impuestos por el cliente y la organización, para lo cual hay que desplegar acciones efectivas ante las variaciones y no cubrir todas las posibilidades, ya que esto es costoso e ineficiente (Arango-Serna, Gil, & Zapata-Cortés, 2009). Una mejor relación con los transportadores es un impulsor de confianza que permite obtener beneficios como resultado de mayor compromiso y conocimiento de los procesos de transporte, permitiendo proponer mejoras en la operación, como rutas más eficientes y mayor utilización de los vehículos (Sumantri, 2017). Los procesos de comunicación más eficientes y el uso de tecnologías producen una generación y transferencia de datos e información más rápida, lo que mejora los procesos de control y conlleva a toma de decisiones basadas en datos reales y a un conocimiento holístico de la operación (Zapata-Cortés, Arango-Serna, & Gomez, 2013). Los procesos de optimización de las rutas y las operaciones conllevan a una reducción de costos y aumento de la satisfacción de los clientes, ya que se logra una mejor utilización de los vehículos y las instalaciones como producto de encontrar la mejor combinación de las rutas y las instalaciones, permitiendo una utilización más eficiente de los recursos (Zapata-Cortés, 2016); (Serna Urán, 2016); (Arango-Serna, y otros, 2018).

La función del transporte consiste en gestionar todas las actividades relacionadas directa e indirectamente con la necesidad de situar los productos en los lugares de destino correspondientes, de acuerdo con las condiciones de servicio y costo (Arango-Serna & Serna-Urán, 2018). Para esto se requieren sistemas de administración robustos que permitan a las empresas conseguir los resultados esperados, asegurando el abastecimiento de las mercancías a los clientes (Rajabion, Khorraminia, Andjomshoaa, Ghafouri-Azar, & Molavi, 2019).

Cuando los procesos de transporte se realizan en entornos urbanos, su gestión se hace más compleja, toda vez que se requiere conciliar dicho proceso con las restricciones propias de las ciudades, como lo son medidas de movilidad más estrictas que buscan mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, infraestructura limitada

en espacios para circular y aparcar, así como considerar otros sistemas de transporte público y el privado de pasajeros. Por lo anterior es necesario estudiar a profundidad los procesos de distribución de mercancías en ciudades y proponer estrategias tendientes a mejorar los procesos empresariales, buscando rentabilidad y asegurando un impacto social mínimo (Zapata-Cortés, Vanoni-Martínez, & Perdomo-Charry, 2020)).

## DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

Los procesos de distribución de mercancía en ciudades han tomado gran interés en el estudio de la cadena de suministros, ya que las conglomeraciones urbanas son cada vez más grandes (United Nations, 2018) y enfrentan problemas de tráfico y contaminación física y química; esta situación se ha empeorado con los procesos de distribución que son cada día más intensos, debido a los nuevos patrones de compra y distribución que ha generado el comercio electrónico, la globalización de los mercados, una oferta más pluralista y cambiante de productos y nuevos patrones de consumo de los clientes (Crainic, Gendreau, & Jemai, *Planning hyperconnected, urban logistics systems*, 2020) que en últimas genera un mayor número de vehículos circulando por las ciudades (Diao, 2019; Zapata-Cortés, Vanoni-Martínez, & Perdomo-Charry, 2020). A pesar de estos impactos negativos, los procesos de distribución de mercancías no pueden ser frenados, ya que de estos depende en gran medida la competitividad de las empresas y las ciudades mismas (Gayialis, Konstantakopoulos, & Tasiopoulos, 2019). Se deben desarrollar nuevas alternativas de distribución y procesos más eficientes que logren encontrar planes de distribución que logren un balance entre los beneficios económicos de las empresas y los impactos negativos a las ciudades (Russo, 2020). Estas propuestas deben generar procesos de transporte rápidos y eficientes que disminuyan el número de vehículos y las distancias innecesarias, que puedan ser aplicados a toda la ciudad y responder a los cambios generados por el entorno y los clientes (Quack, 2019). Estas medidas no solo deben velar por disminuir los costos e impactar negativamente a la ciudad, deben también asegurar la calidad del servicio de los clientes, los cuales están relacionados con los tiempos de viaje, que varían por aspectos sociales, económicos y relacionados con las características del viaje en las ciudades mismas. Estos tiempos son consecuencia de las distancias, la velocidad promedio, la recogida y/o entrega de mercancía, las paradas, el tráfico, etc.; elementos estos que deben considerarse al momento de proponer acciones para mejorar el funcionamiento de las redes de transporte (Querish, Taniguchi, & Pomboon, 2016).

Son varias las dificultades encontradas alrededor de la distribución urbana de mercancías, las cuales son resumidas por Domínguez (2013) y que conllevan a la generación de alternativas de solución que permitan hacerles frente.

- Existen ineficiencias en la distribución, generalmente relacionada con procesos de reparto erróneos y sin considerar la gestión ambiental.
- Generalmente para completar una entrega es necesario visitar dos o tres veces el lugar de destino.
- Los clientes generan franjas de tiempo de atención (ventanas de tiempo) inflexibles o cortas, generando que los vehículos repartidores deban recorrer mayores distancias para realizar la misma cantidad de entregas.
- Envíos únicos a zonas lejanas del área de intervención, es decir zonas alejadas a más de 40 Km, lo cual genera una ocupación baja de los vehículos, alrededor del 30% o 40%.
- La carga y descarga de los vehículos generan traumatismos en el tráfico y reducen el espacio de las vías y de las zonas de comercio y de actividades de los peatones.
- Algunas ciudades no tienen la infraestructura adecuada en tamaño y ubicación de las zonas de carga y descarga adecuadas, produciendo traumatismos en el tráfico.
- No existe una coordinación o colaboración eficiente entre los diferentes agentes que intervienen en la distribución urbana de mercancías.
- Los viajes completos (Round Trips) pueden llegar a alcanzar solo entre 60% y el 65% de todos los viajes de mercancías, pero estos solo abastecen entre 25% y el 30% de las mercancías.

· Debido al crecimiento de las ciudades, a la adopción cada vez mayor de compras online y del reparto just-in-time, las cantidades de mercancía a abastecer en zonas urbanas está en aumento, lo cual intensifica el transporte

Las propuestas encontradas en la literatura científica para mejorar los procesos de transporte y distribución en las ciudades pueden ser clasificadas en dos categorías: La primera consiste en las medidas establecidas por los administradores locales y el gobierno, que esencialmente se encargan de restringir la movilidad de los vehículos en ciertas zonas y horarios en los cascos urbanos, o forzar la utilización de ciertas infraestructuras como los centros logísticos de consolidación ubicado en las periferias de las ciudades (Crespo García, 2009; Neghabadi, Samuel, & Espinouse, 2019). La segunda categoría es desarrollada por empresas transportadoras que tienen como principal finalidad encontrar planes que permitan hacer los procesos más eficientes, reduciendo costos y haciendo frente a las medidas establecidas por las administraciones locales y los gobiernos. Para esto en la mayoría de los casos se recurre al uso de tecnologías de la información y a la optimización de la red de transporte, que conllevan al uso de vehículos con capacidades adecuadas y a la generación de rutas óptimas para la distribución (Crespo, 2009)

En la tabla 1 se presentan las medidas encontradas en la literatura científica, la cual recoge los análisis realizados por autores como Zapata-Cortés (2016), Gatta, Marcucci, Nigro, Patella, & Serafini (2019), Papoutsis & Nathanail (2016), Crespo García (2009), Neghabadi, Samuel, & Espinouse (2019), Giuliano, O'Brien, Dablanc, & Holliday (2013), Buldeo Rai, Verlinde, Merckx, & Mercharis (2017), Domínguez (2013) y Sanz, Pastor, & Bedito, 2013).

Medidas para la distribución urbana de mercancías	Gobierno	Transportadores	Ambos
Regulación del precio de rodamiento	x		
Regulaciones y licencias para circular	x		
Regular el parqueo y la descarga	x		
Zonas específicas de circulación, parqueo, carga y descarga	x		
Zonas y franjas de tiempo de acceso controlado	x		
Mejoramiento de los sistemas logísticos	x		
Peajes urbanos	x		
Estandarización de unidades de carga		x	
Modernización de equipos (equipos especiales - ej.: bicicletas)		x	
Repartos nocturnos		x	
Cooperación entre transportadores		x	
Mejoramiento del ruteo de vehículos (optimización de la ruta)		x	
Innovación en la tecnología de los vehículos		x	
Consolidación de mercancías en instalaciones propias y vehículos		x	
Uso de centros de consolidación			x
Desarrollo de infraestructura para el transporte			x
Subastas de transporte			x
Transporte intermodal			x
Optimización logística de las terminales			x
Uso de sistemas y tecnologías de información			x
Modernización de equipos (vehículos eléctricos)			x

Tabla 1. Medidas públicas y privadas para la distribución de mercancías en ciudades

Elaboración propia.

Este artículo se centra en las medidas que son desarrolladas por las empresas transportadoras, especialmente aquellos esfuerzos en optimizar las rutas de los vehículos, como alternativa que permite hacer una mejor utilización de los mismos y reducir la distancia total recorrida (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017).

## MODELOS DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El análisis de ruteo de vehículos tiene como finalidad reducir las distancias recorridas por parte de los vehículos para atender un conjunto de clientes, con la intención de reducir los costos totales del transporte para las empresas (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017; Rushton, Croucher, & Baker, 2017). Este análisis debe realizarse de forma sistemática, siendo necesario involucrar las restricciones propias del sistema de transporte, tales como las limitaciones de capacidad, el tiempo de utilización de los vehículos y las condiciones de las vías (Kim, Ong, Heng, S., & Zhang, 2015).

Existen varios enfoques para realizar procesos de ruteo, desde métodos simples que incluyen procedimientos heurísticos de fácil entendimiento, hasta procedimientos complejos que requieren de herramientas de inteligencias artificial y técnicas metaheurísticas para su solución. Esto depende de la robustez del modelo de ruteo a utilizar, ya que entre más variables y condiciones reales del proceso de distribución se incluyan, mayor será su grado de complejidad, tanto para la formulación como para la solución (Arango-Serna, Zapata-Cortés, & Romano, 2015).

En la mayoría de los casos, las propuestas para mejorar los procesos de distribución de mercancías en las empresas, desde el punto de optimización matemática, se centran en resolver el problema de ruteo de vehículos -VRP- (Quack, 2019). Este modelo es la abstracción más sencilla del problema de asignar la mercancía que debe ser repartida por una empresa, la cual considera un único punto de origen para abastecer un conjunto de clientes mediante la utilización de uno o varios vehículos con la misma capacidad (Azmi, Abdul, Hussin, & Ibrahim, 2017). En tanto el ruteo de vehículos (VRP) es uno de los problemas de planificación de rutas más importantes y más estudiados, presenta un gran número de variantes, y es aplicable a muchas situaciones del mundo real, como es el caso del transporte y la distribución de mercancías (Toth & Vigo, 2002).

Algunos modelos más completos para los procesos de distribución, como los encontrados en los entornos urbanos, según (Querish, Taniguchi, & Pomboon, 2016; Zapata-Cortes, 2016), consideran variaciones del VRP que incluyen aspectos como:

- Múltiples vehículos con diferentes capacidades.
- Múltiples proveedores/almacenes.
- Ventanas de tiempo.
- Sistemas de transporte de dos escalones.
- Múltiples almacenes (puntos de origen de la mercancía).
- Descargas y recogidas.
- Enfoques dinámicos

En la literatura científica es posible encontrar múltiples trabajos que aplican variaciones del VRP para la optimización de los procesos de distribución en entornos urbanos. En la tabla 2 se presenta un resumen de las técnicas y enfoques utilizadas por varios autores en esta temática.



Modelo de optimización	Autor
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agente viajero múltiple (m-TSP)</li> <li>• Ruteo de vehículos (VRP)</li> <li>• Ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)</li> <li>• Ruteo de vehículos con depósitos múltiples (MDVRP)</li> <li>• Localización conjunta de localización y ruteo (LRP)</li> </ul>	(Muñoz, 2013)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VRP capacitado y con restricciones de distancia (DCVRP).</li> <li>• Ruteo de vehículos con recogidas y entregas (PDVRP)</li> <li>• Ruteo de vehículos con retornos (Backhauls) (VRPB).</li> </ul>	(Grzybowska, 2012)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruteo de vehículos capacitados (CVRP)</li> <li>• VRP con múltiples depósitos (MDVRP).</li> </ul>	(Sterle, 2009)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• (MDVRPPD)</li> </ul>	(Arango, Serna, Zapata, & Álvarez, 2014)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruteo-localización de dos escalones</li> </ul>	(Crainic, Sforza, & Sterle, 2011)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VRP con ventanas de tiempo, programación sincronizada, múltiples depósitos, tours y vehículos heterogéneos (2SS-MDMT-VRPTW).</li> </ul>	(Crainic, Khanh, & Toulouse, 2016)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VRP de dos escalones</li> <li>• Problema de localización y ruteo - LRP</li> </ul>	(Hemmelmayr, Doerner, & F.H., 2009)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo <u>VRPTW</u> -</li> </ul>	(Pradhananga, Taniguchi, Yamada, & Qureshi, 2014)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VRP dinámico</li> </ul>	(Hu, Ding, & Shao, 2009)

Tabla 2. Selección de trabajos que aplican variaciones del VRP en la distribución urbana de mercancías  
Elaboración propia

En el contexto colombiano, Amador-Fontalvo, Paternina-Arboleda, & Montoya-Torres (2014) propusieron una metaheurística de comportamiento de bacterias para resolver el problema VRP con flota heterogénea, ventanas de tiempo y múltiples productos, aunque dicho procedimiento no fue aplicado en un caso real, sino que fue contrastado con la instancia de 100 clientes de Solomon (2005). Bula (2018) desarrollo un modelo para el problema del transporte de mercancías peligrosas utilizando el ruteo de vehículos con capacidad heterogénea HVRP; para este efecto se desarrolló un modelo bi-objetivo que permitiera optimizar costos y riesgos de manera simultánea. Para la solución se aplicó una metaheurística de búsqueda local. El modelo fue puesto a prueba utilizando las instancias modificadas de Golden, Assad, Levy, & Gheysens (1984) y no bajo condiciones reales.

En aplicación reales, Arboleda-Zúñiga, Gaviria-Gómez, & Álvarez-Romero (2018) aplicaron el modelo VRP con flota heterogénea y ventanas de tiempo para una empresa comercializadora en la ciudad de Cali, utilizando la heurística de Clarke y Wright mediante el uso del software LOGWARE® para la asignación de rutas de 34 clientes. Por su parte Rodríguez-Vásquez (2020) aplican un modelo similar incluyendo múltiples depósitos para el servicio de entrega de valores de 545 clientes en la ciudad de Bogotá. El procedimiento de solución se basó en un híbrido entre las heurísticas de colonia de hormiga para el problema del agente viajero con ventanas de tiempo (ACO-TSPTW) y el método de barrido.

A continuación, se presenta la aplicación de un método de optimización para definir el plan de distribución de mercancía en una empresa de paquetería real en la ciudad de Medellín Colombia, el cual utiliza una heurística de inserción más eficiente que los métodos de aplicación real mencionados anteriormente, con la finalidad de reducir los costos logísticos incurridos y los impactos negativos a la sociedad.

## MÉTODO

Este artículo tiene como objetivo presentar la aplicación de un modelo optimización de la distribución en una empresa de paquetería en Medellín-Colombia, para lo cual se utiliza el problema de ruteo de vehículos con flota de capacidad heterogénea. La empresa realiza una distribución diaria de productos provenientes de otras partes del país a 87 clientes ubicado en la zona urbana y en las periferias del área metropolitana del valle de Aburra, que agrupa la ciudad de Medellín como urbe central y a otros 9 municipios cercanos. La

investigación que originó este artículo partió del análisis del problema y de la información de la empresa sobre los planes de ruteo y las características actuales de distribución. Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica de los modelos de ruteo aplicables para resolver el problema, identificando el modelo VRP con vehículos heterogéneos como la alternativa que mejor se ajustaba a las condiciones del ruteo de la empresa. Posterior a esta revisión, se desarrolló un algoritmo que permitió la aplicación y solución del modelo, para la posterior evaluación de resultados y formulación del plan en la empresa.

El modelo VRP con vehículos Heterogéneos (HVRP) o también conocido como VRP de fletes mixtos, se encarga de asignar las rutas de distribución cuando se tiene un conjunto de vehículos con múltiples capacidades. El modelo básico considera como función objetivo la minimización de la suma de los costos fijos Importar imagen de utilización de los vehículos y los costos de transporte Importar imagen, la cual se formula como se presenta en la ecuación 1, en donde Importar imagen corresponde al vehículo k que sale del depósito a visitar al cliente j (Baldacci, Battarra, & Vigo, 2008):

$\text{Función Objetivo: Minimizar } \sum_{k \in M} F_k \sum_{j \in V'} x_{0j}^k + \sum_{k \in M} \sum_{i, j \in V', i \neq j} c_{ij}^k \cdot x_{ij}^k$	(1)
Sujeto a:	
$\sum_{k \in M} \sum_{j \in V'} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in V'$	(2)
$\sum_{i \in V'} x_{ip}^k - \sum_{j \in V'} x_{pj}^k = 0, \quad \forall p \in V', \forall k \in M$	(3)
$\sum_{i \in V'} x_{0i}^k \leq m_k, \quad \forall k \in M$	(4)
$\sum_{i \in V'} y_{ij} - \sum_{j \in V'} y_{ji} = q_j, \quad \forall i, j \in V'$	(5)
$q_i x_{ij}^k \leq y_{ij} \leq (Q_k - q_i) x_{ij}^k, \quad \forall i, j \in V', i \neq j, \forall k \in M$	(6)
$y_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in V, i \neq j$	(7)
$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in V, i \neq j, \forall k \in M$	(8)

En donde k hace referencia a uno de los vehículos disponibles identificados como el conjunto K. i, j corresponden a los clientes, pertenecientes al subconjunto V' que incluye todos los nodos excepto el depósito. V es el conjunto que incluye todos los nodos clientes más el depósito. y<sub>ij</sub> corresponde a la cantidad de mercancía que lleva un vehículo cuando parte del cliente i al cliente j. q<sub>j</sub> es la mercancía dejada en el cliente j, equivalente a su demanda y Q<sub>k</sub> es la capacidad máxima del vehículo k.

Las ecuaciones 2 y 3 aseguran que cada cliente es visitado una y solo una vez si el vehículo debe atender dicho cliente y que debe salir de cada cliente a atender otro cliente j. La restricción 4 asegura que el número de vehículos utilizados no exceda la flota de vehículos disponibles. La ecuación 5 asegura el flujo de materiales, en la cual la diferencia de carga que un vehículo tiene antes y después de visitar un cliente, es igual a la demanda del mismo. La restricción 6 asegura que no se exceda la capacidad de los vehículos. La ecuación 7 es la restricción de no negatividad de la cantidad a transportar del cliente i al cliente j y la ecuación 8 asegura que la variable de decisión Importar imagen sea binaria.

El modelo es ajustado para que cumpla con el tiempo máximo de operación disponible en la empresa y considera las distancias reales mediante la geolocalización de todos los nodos, expresando la distancia entre cada uno en kilómetros. Para el cálculo de los tiempos se utiliza la velocidad promedio de los vehículos en la ciudad de Medellín, definida por la empresa y expresada en Km/h. Para la solución del modelo se aplica un algoritmo meta heurístico de inserción (Nalepa, 2019; Pinto, Alves, Valerio, & Moura, 2015).

## APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la distribución de la mercancía de la empresa objeto de estudio, se realiza el análisis de ruteo utilizando el modelo VRP con múltiples vehículos de capacidad heterogénea (HVRP), presentado en el apartado anterior.

La empresa requiere distribuir diariamente la mercancía a 87 clientes distribuidos en el área metropolitana, a los cuales en total se les debe abastecer 69.9 toneladas, para lo cual se utilizan vehículos subcontratados.

La flota de vehículos utilizados por la empresa para la distribución de los clientes es presentada en la tabla 3, de donde se puede apreciar las diferentes configuraciones de los vehículos, así como de los costos fijos por día de vehículo que debe pagar la empresa de paquetería para hacer uso de los mismos. Es importante anotar que la empresa de paquetería solo paga el canon de arrendamiento del vehículo (valor fijo). En esta tabla se puede observar que la empresa en la actualidad utiliza una flota de 32 vehículos, con capacidades y valores de arrendamiento diferente. El costo diario incurrido por la empresa para el proceso de distribución es igual \$COP 5.664.800, que corresponde a multiplicar cada valor por el número de vehículos correspondiente.

<b>Tipo vehículo</b>	<b>Capacidad vehículo (ton)</b>	<b>Número vehículos</b>	<b>Valor fijo del vehículo</b>
1	1,2	2	\$ 151.400
2	2,5	5	\$ 140.600
3	4	4	\$ 175.200
4	5	15	\$ 175.200
5	7	3	\$ 221.700
6	10	3	\$ 221.700

Tabla 3. Flota y costos de los vehículos utilizados por la empresa.

Elaboración propia.

Debido a las restricciones de movilidad encontradas en la ciudad de Medellín y los municipios cercanos, se han separado los clientes en dos grupos: Aquellos que se encuentran al interior de las urbes y los que se encuentran en las periferias de las mismas. En ese orden de ideas, los grupos quedan conformados por 76 clientes para la distribución urbana y 11 clientes para la distribución en las afueras. Para cada uno de estos grupos se aplica el modelo de ruteo HVRP y al final se unifican las respuestas para definir el proceso de distribución de la empresa.

En la distribución urbana, que es la que tiene mayor número de clientes, se desarrolla el modelo poniendo a disposición todos los vehículos con capacidad inferior a 7 toneladas, con el objetivo de cumplir con los requisitos de movilidad impuestos por la Alcaldía de Medellín, en los que se establece que en la zona centro de la ciudad no pueden circular, cargar, descargar o aparcar vehículos cuya capacidad de carga supere los 8.500 kilogramos, o una altura máxima de 4.40 (Alcaldía de Medellín, 2016). Para el transporte fuera del área urbana se ponen a disposición el resto de vehículos, incluyendo los que no fueron ocupados en la distribución urbana y aquellos vehículos con capacidad de 10 toneladas. La velocidad de los vehículos promedio estimada por la empresa es de 17 km hora en toda el área urbana de la ciudad y de 25 km para las periferias. La demanda diaria y el tiempo de atención promedio se presentan en la tabla 4 para los 76 clientes ubicados en la zona urbana. Por motivos de presentación, reserva de los clientes y relevancia de la información, las ubicaciones expresadas en latitud y longitud de los clientes se omiten en este artículo. El tiempo máximo estimado para el abastecimiento de los clientes por cada vehículo es de 9 horas, equivalente a 540 minutos, que contempla la hora de descanso que tienen los trabajadores a la hora de almuerzo y una hora de alistamiento del vehículo al inicio del día. De esta manera los conductores tienen una jornada laboral de 8:00 am a 5:00 pm de lunes a sábado para un tiempo efectivo de distribución de entre las 9:00 y las 5:00 pm, correspondiente a 480 minutos, periodo en el que deben salir y regresar a la empresa, ubicada en las proximidades del centro de la ciudad.

Cliente	Demanda (kg)	Duración (min)	Cliente	Demanda (kg)	Duración (min)	Cliente	Demanda (kg)	Duración (min)
1	580	20	27	345	20	52	328	20
2	290	11	28	3294	45	53	443	20
3	332	20	29	980	45	54	786	30
4	147	6	30	514	20	55	232	11
5	852	30	31	444	20	56	1150	45
6	600	30	32	130	6	57	2747	45
7	719	30	33	200	11	58	180	11
8	279	11	34	84	6	59	513	20
9	129	6	35	31	6	60	303	20
10	2568	45	36	515	20	61	403	20
11	502	20	37	146	6	62	5600	45
12	1158	45	38	1526	45	63	1302	45
13	685	30	39	50	6	64	258	11
14	769	30	40	1285	45	65	289	11
15	884	30	41	169	11	66	403	20
16	329	20	42	399	20	67	5	6
17	662	30	43	31	6	68	83	6
18	43	6	44	434	20	69	447	20
19	400	20	45	386	20	70	1300	45
20	180	11	46	172	11	71	979	45
21	832	30	47	825	30	72	980	45
22	269	11	48	478	20	73	1094	45
23	2913	45	49	980	45	74	712	30
24	147	6	50	513	20	75	1193	45
25	4652	45	51	945	45	76	389	20
26	980	45						

Tabla 4. Datos de los clientes para la distribución urbana de la empresa  
Elaboración propia.

Vehículo	Ruta	tiempo	Carga	% utilización vehículo
v2-1	0-11-58-20-34-41-72-16-0	367,58	2424	97,0%
v2-2	0-9-66-73-21-0	275,10	2458	98,3%
v3-1	0-65-1-51-14-71-42-0	404,65	3961	99,0%
v4-1	0-17-55-10-15-27-39-37-0	434,53	4887	97,7%
v4-1	0-54-4-56-50-76-44-61-52-0	465,03	4150	83,0%
v4-2	0-60-23-70-19-0	336,86	4916	98,3%
v4-3	0-28-13-49-0	359,39	4959	99,2%
v4-4	0-46-8-57-30-48-36-2-0	459,97	4995	99,9%
v4-5	0-32-35-24-43-67-68-33-29-5-63-18-0	444,04	3804	76,1%
v4-6	0-7-12-22-75-38-0	357,00	4865	97,3%
v4-7	0-6-64-74-47-40-3-45-59-0	472,57	4911	98,2%
v5-1	0-26-31-25-69-53-0	365,44	6966	99,5%
v5-2	0-62-0	188,91	5600	80,0%

Tabla 5. Resultados del ruteo del vehículo en la zona urbana  
Elaboración propia

En estos vehículos se logra una ocupación alta de la capacidad del vehículo, así como una utilización del tiempo de servicio de los mismos, lo que no permite unir rutas para mejorar aún más los resultados. Esto puede verse en el caso de la ruta del quinto vehículo tipo 4 (v4-5), el cual tiene la menor ocupación de la carga posible del vehículo (76,1%), pero llega al depósito en el minuto 444, lo cual no da tiempo para visitar un cliente cercano, demostrando una buena utilización en tiempo. Por su parte, el segundo vehículo del tipo 5 (v5-2) tiene el menor tiempo de utilización (188,91 minutos), lo cual se debe a la cantidad de carga que debe ser enviada al cliente 62, el cual es el nodo de mayor demanda diaria. Debido a la alta cantidad requerida de

mercancías, no es posible asignar o combinar la ruta con otro envío sin aumentar los costos de distribución, por lo que se asigna un vehículo único para la atención de este cliente.

De manera similar al análisis anterior, se realiza el estudio para los clientes en las periferias de las zonas urbanas. Las capacidades y la duración de la atención de los clientes que deben ser abastecidos en este caso son presentados en la tabla 6.

Cliente	Demanda (kg)	Duración (min)	Cliente	Demanda (kg)	Duración (min)
1	1000	60	7	1281	60
2	654	45	8	1625	60
3	654	45	9	1700	60
4	1278	60	10	1500	60
5	56	10	11	373	30
6	906	60			

Tabla 6. Clientes en las afueras del área urbana

Elaboración propia

Los resultados de las rutas arrojadas al utilizar modelo HVRP son presentados en la tabla 7, donde se aprecia que para esta distribución se requieren tres rutas, utilizando un vehículo tipo 2 (capacidad de 2,5 toneladas) y dos vehículos tipo 4 (capacidad de 5 toneladas), para un costo total de \$COP 491.000 diarios. En este proceso de distribución se observa una baja utilización del vehículo 2, lo cual se debe a la alta utilización en capacidad y tiempo disponible de los otros dos vehículos.

Vehículo	Ruta	tiempo	Carga	% utilización vehículo
v2-3	0-1-11-5-0	266,75	1429	57,2%
V4-8	0-2-7-9-4-0	477,177	4913	98,3%
V4-9	0-6-3-10-8-0	448,41	4685	93,7%

Tabla 7. Resultados del ruteo del vehículo en las afueras del área urbana

Elaboración propia

De esta manera, el costo del proceso de distribución es la suma de las rutas urbanas y de las rutas en las afueras, equivalente a \$COP 2.126.200 + \$COP 491.000 = \$COP 2.617.000 que comparados con el costo actual incurrido en la empresa de \$COP 5.664.800 equivale a un ahorro del 53.08% en los costos de distribución. Esta reducción se logra mediante una mejor utilización de los vehículos, la cual en promedio para todas las rutas del plan de distribución presentadas en las tablas 5 y 7 es de 92,04% de la capacidad máxima de los vehículos.

Como resultado adicional a la optimización de costos del proceso de distribución, se puede determinar el impacto que este nuevo plan de distribución tiene en la sociedad y el medio ambiente. Para esto, se puede apreciar a partir de los resultados arrojados por el modelo de ruteo de vehículo con flota heterogénea (HVRP), que en el nuevo esquema de distribución el número de vehículos requeridos para abastecer a los clientes pasa de 32 a 16, considerando los 13 vehículos para la distribución en las ciudades más los 3 vehículos requerido para las rutas de las afueras. Esto implica una reducción en 16 vehículos equivalente a una reducción del 50% en el número de los mismos. Esta reducción permite disminuir el número de camiones circulando en la ciudad, generando con esto un posible impacto positivo en la disminución de la congestión de la ciudad. Además, esta disminución en el número de los vehículos también genera que se reduzca las emisiones de gases efecto invernadero y otros contaminantes expulsados al ambiente, toda vez que una parte importante de los vehículos salen de circulación.

Es importante llamar la atención que, si bien este resultado es importante para la empresa, su impacto puede ser aún mayor en el caso de que las otras compañías que realizan transporte en la ciudad desarrollen

análisis de este tipo, con lo cual la mejora en las condiciones de tráfico y contaminación sería mucho más importante.

## CONCLUSIONES

A partir de lo presentado en el artículo, se resalta la importancia de la gestión del transporte como un elemento crítico en la competitividad de las empresas, ya que este es factor de la generación de una porción importante de los costos logísticos que, en últimas, repercute en el precio de los productos. Es de gran importancia para las empresas desarrollar herramientas y proponer mecanismos que permitan desarrollar planes de transporte eficientes, logrando reducir costos, satisfacer las necesidades de los clientes y mitigar los impactos negativos que el transporte puede generar a la sociedad y el ambiente.

Tras la revisión de literatura científica se puede evidenciar un alto número de trabajos que proponen modelos para una mejor distribución de las rutas en las empresas, lo que demuestra el gran interés de académicos y profesionales por utilizar este tipo de enfoques, tanto para el proceso de distribución en ambientes urbanos como en las afueras de las ciudades. La optimización de las rutas y el transporte es uno de las principales alternativas que llevan a cabo las empresas para el establecimiento de mejores condiciones de distribución. Dentro de los modelos más utilizados para el diseño de las rutas de distribución en las empresas, se encuentra el de ruteo de vehículos (VRP), el cual es fácilmente aplicable a problemas reales debido a la capacidad de ser modificado para incluir otras variables. Entre las variaciones más relevantes de este problema de ruteo de vehículos para responder con mayor precisión a problemas de las empresas, se encuentra el VRP con vehículos heterogéneos (HVRP), con ventanas de tiempo, con entregas parciales y con entregas y recogidas simultáneas. En el contexto colombiano, se encontraron varios trabajos desarrollados para resolver el problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea encontrando que aquellos que realizan aplicaciones reales utilizan técnicas de solución simples, como el caso de los algoritmos de barrido y Clarke y Wright, aspecto que es mejorado con la utilización de la heurística de inserción utilizada en este trabajo.

Mediante la aplicación del modelo de ruteo con flota heterogénea HVRP (VRP con vehículos de capacidad heterogénea), que tenía como objetivo la optimización de los costos de distribución en la empresa, se logró mejorar las rutas de distribución en una empresa de paquetería colombiana, la cual diariamente debe atender 87 clientes, para lo cual utilizaba una flota de 32 vehículos. Con el plan de distribución generado por el modelo, se logró no solo reducir los costos de transporte en un 53.08%, sino que mediante el aumento de la utilización de la capacidad de los vehículos, establecida en un 92%, fue posible reducir el número de vehículos requeridos para abastecer los clientes, pasando de 32 a 16 que equivale al 50% de la flota, lo cual produce la disminución de costos mencionada y, además, evita que el otro 50% de los vehículos circule por la ciudad, mitigando de esta forma el impacto negativo de la empresa en la congestión y la contaminación producida por la actividad del transporte.

A partir del trabajo y el modelo presentado en este artículo, es posible identificar nuevas líneas de investigación orientadas hacia la implementación de este tipo de enfoques en otras empresas del sector transporte, con el objetivo de reducir costos para aumentar su competitividad, pero también buscando mitigar el impacto en la sociedad y el medio ambiente por parte de las empresas transportadoras. Se recomienda aplicar modelos que permitan integrar otras variables como las ventanas de tiempo y las entregas y recogidas de productos de manera simultánea, lo cual puede ser el caso de aplicación de otras empresas del sector.

Se sugiere además desarrollar enfoques en conjunto con otros actores de la distribución urbana de mercancía, con el objetivo de indagar en otras alternativas de solución para reducir los costos y los impactos negativos del sector transporte, como lo es el intercambio y colaboración en el transporte y en los inventarios entre clientes, transportadores y empresas colaboradoras. También es posible desarrollar una nueva línea alrededor de la simulación de agentes, la cual es una técnica de inteligencia artificial que permite proponer

planes de distribución considerando los comportamientos, actitudes y metas propias de las diferentes empresas y organizaciones involucradas en el transporte de mercancías, tanto en ambientes urbanos como intermunicipales.

#### Contribuciones de los coautores:

Todos los autores participaron del desarrollo de la investigación y escritura del artículo. La responsabilidad específica en cada una de las fases es: Conceptualización, Julián Andrés Zapata, Ángel Rodrigo Vélez Bedoya y Martín Darío Arango; Curación de datos, Julián Andrés Zapata y Martín Darío Arango; Análisis formal, Ángel Rodrigo Vélez y Julián Andrés Zapata Cortés; Investigación, Julián Andrés Zapata, Ángel Rodrigo Vélez y Martín Darío Arango, Metodología, Ángel Rodrigo Vélez y Martín Darío Arango, Validación; Visualización y Redacción del borrador original, Julián Andrés Zapata, Ángel Rodrigo Vélez y Martín Darío Arango.

#### Financiamiento de la investigación:

El presente artículo se deriva del proyecto de investigación titulado “Modelización matemática para decisiones conjuntas de inventario, transporte y almacenamiento en la cadena de suministro” financiado por la Institución universitaria CEIPA, con número de folio de la unidad de investigaciones 2264.

## REFERENCIAS

- Alcaldía de Medellín. (16 de 5 de 2016). *Vías de la ciudad de Medellín con regulación para la circulación, cargue y descargue de materiales y mercancías*. Recuperado el diciembre de 2019, de <https://www.medellin.gov.co>: <https://bit.ly/2XdvHcV>
- Amador-Fontalvo, J., Paternina-Arboleda, C., & Montoya-Torres, J. R. (2014). Solving the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products via a bacterial meta-heuristic. *International Journal Advanced Operations Management*, 6(1), 81-100. doi:10.1504/IJAOM.2014.059622
- Arango, M., Serna, C., Zapata, J., & Álvarez, A. (2014). Vehicle routing to multiple warehouses using a memetic algorithm. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 160(19), 587-596. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.172>
- Arango-Serna, M. Z.-C., & Serna-Urán, C. (2018). Collaborative Multiobjective Model for Urban Goods Distribution Optimization. En J. García Alcaráz, G. Alor Hernández, A. Maldonado Macías, & C. Sánchez Ramirez, *New Perspectives on Applied Industrial Tools and Techniques. Management and Industrial Engineering* (págs. 47-70). Cham: Springer.
- Arango-Serna, M., Gil, H., & Zapata-Cortés, J. (2009). Logística Esbelta Aplicada al Transporte en el Sector Minero. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(25), 121-136.
- Arango-Serna, M., Zapata-Cortés, J., & Romano, C. (2015). Metaheuristics for goods distribution. *Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)* (págs. 99 – 107). Sevilla: IEEE Publications. doi:10.1109/IESM.2015
- Arango-Serna, M., Zapata-Cortés, J., Serna-Urán, C., Gómez-Lizarazo, J. A., Gutiérrez-Sepúlveda, D., & Ruiz-Moreno, S. (2018). *Sistema logístico de carga en Colombia: retos y escenarios futuros*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/3i9yUnh>
- Arboleda-Zúñiga, J., Gaviria-Gómez, J., & Álvarez-Romero, J. (2018). Propuesta de ruteo de vehículos con flota heterogénea y ventanas de tiempo (hfvrtw) aplicada a una comercializadora Pyme de la ciudad de Cali. *Revista de Investigación*, 11(1), 39-55. Obtenido de <https://bit.ly/3i2eMn0>
- Azmi, I., Abdul, H., Hussin, N., & Ibrahim, N. (2017). Logistics and supply chain management: the importance of integration for business processes. *MUTRFC Conference* (págs. 1-9). Malasya: MUTRFC Conference. Obtenido de <https://bit.ly/3e3q0VB>
- Baldacci, R., Battarra, M., & Vigo, D. (2008). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In B. L. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil, *The Vehicle Routing Problem. Latest Advances and New Challenges* (pp. 3 – 27). Boston: Springer. Retrieved from <https://bit.ly/2LN0xGN>

- Brynjolfsson, E., Hitt, L., & Kim, H. (2011, April 24). SSRN. Retrieved from <https://papers.ssrn.com>: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1819486](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1819486)
- Bula, G. (2018). *Ruteo de vehículos en el transporte de materiales peligrosos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá. Obtenido de <https://bit.ly/38483od>
- Buldeo Rai, H., Verlinde, S., Merckx, J., & Mercharis, C. (2017). Crowd logistics: an opportunity for more sustainable urban freight transport? *European Transport Research Review*, 9(39), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1007/s12544-017-0256-6>
- Chabot, T., Bouchard, F., A., L., Renaud, J., & Coelho, L. (-1. (2018). Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 1(110), *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.11.008>.
- Chopra, S. (2018). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and operation*. London: Pearson Education.
- Crainic, T., Gendreau, M., & Jemai, L. (2020). Planning hyperconnected, urban logistics systems. *Transportation Research Procedia*, 47, 35-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.070>
- Crainic, T., Khanh, N., & Toulouse, M. (2016). Synchronized Multi-trip Multi-traffic Pickup & Delivery in City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 1(12), 26-39. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.023>
- Crainic, T., Sforza, A., & Sterle, C. (julio de 2011). *Location-Routing Models for Two-Echelon Freight Distribution System Design (CIRRELT-2011-40)*. Obtenido de <https://www.cirrelt.ca/>: <https://bit.ly/3cRzB1s>
- Crespo, L. (2009). La movilidad urbana: un gran reto para las ciudades de nuestro tiempo. *Ingeniería Civil*, 1(154), 97-106. Obtenido de <http://www.cedex.es/>: <https://bit.ly/3i7O24A>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística 2018*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de <https://bit.ly/2LNqppj>
- Diao, M. (2019). Towards sustainable urban transport in Singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*(81), 320-330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.05.005>.
- Domínguez, A. (2013). *Modelización del comportamiento de los comerciantes ante nuevas políticas de reparto urbano de mercancías (Tesis Doctoral)*. Santander: Universidad de Cantabria.
- Fana, T., Pan, Q., Pan, F., Zhou, W., & Chen, J. (2020). Intelligent logistics integration of internal and external transportation with separation mode. *Transportation Review Part E*(133), 1-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.10.011>
- García, J. L., Sánchez, C., & Avelar, L. (2020). *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Global Supply Chain Ecosystems*. Switzerland: Springer Nature. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26488-8>
- Gatta, V., Marcucci, E., Nigro, M., Patella, S., & Serafini, S. (2019). Public Transport-Based Crowdshipping for Sustainable City Logistics. Assessing Economic and Environmental Impacts. *Sustainability*, 11(1), 145-157.
- Gayialis, S., Konstantakopoulos, G., & Tatsiopoulos, I. (2019). Vehicle Routing Problem for Urban Freight Transportation: A Review of the Recent Literature. En P. K. Sifaleras A., *Operational Research in the Digital Era – ICT Challenges. Springer Proceedings in Business and Economics* (págs. 84-104). Cham: Springer.
- Giuliano, G., O'Brien, T., Dablanc, L., & Holliday, K. (2013). *Synthesis of Freight Research in Urban Transportation Planning (NCFRP REPORT 23)*. WASHINGTON, D.C: Library of Congress. Obtenido de <https://bit.ly/2ZqczuO>
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-6.
- Grzybowska, H. (2012). *Combination of Vehicle Routing Models and Dynamic Traffic Simulation for City Logistics Applications (Tesis Doctoral)*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hemmelmayr, V., Doerner, K., & F.H., R. (2009). A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems. *European Journal of Operational Research*, 1(195), 791-802. doi:10.1016/j.ejor.2007.08.048



- Homaei, S., & Hamdy, M. (2020). A robustness-based decision making approach for multi-target high performance buildings under uncertain scenarios. *Applied Energy*, 267, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114868>
- Hu, Z., Ding, Y., & Shao, Q. (2009). Immune co-evolutionary algorithm based partition-balancing optimization for tobacco distribution system. *Expert Systems with Applications*, 1(36), 5248–5255. doi:10.1016/j.eswa.2008.06.074
- Janjevic, M., Knoppen, D., & Winkenbach, M. (2019). Integrated decision-making framework for urban freight logistics policy-making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1(72), 333-357 . doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.05.006>
- Kim, G., Ong, Y., Heng, C. K., S., T. P., & Zhang, N. A. (2015). City Vehicle Routing Problem (City VRP): A Review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(49), 1654-1666. doi:10.1109/TITS.2015.2395536
- Mangan, J., & Lalwani, C. (2016). *Global Logistics and supply chain management*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. Obtenido de <https://bit.ly/2zPSvHx>
- Muñoz, A. (2013). *Solución de los problemas de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de sus vehículos (Tesis de Maestría)*. Bogotá: Universidad de La Sabana.
- Nalepa, J. (2019). *mart Delivery Systems: Solving Complex Vehicle Routing Problems (Intelligent Data-Centric Systems: Sensor Collected Intelligence)*. Amsterdam: Elsevier.
- Neghabadi, P., Samuel, E., & Espinouse, M. (2019). Systematic literature review on city logistics: overview, classification and analysis. *International Journal of Production Research*, 57(3), 865-887. doi:10.1080/00207543.2018.1489153
- Papoutsis, k., & Nathanail, E. (2016). Facilitating the selection of city logistics measures through a concrete measures package: A generic approach. *Transportation Research Procedia*, 12, 679 – 691. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.10.011>.
- Pinto, T., Alves, C., Valerio, J., & Moura, A. (2015). An Insertion Heuristic for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Loading Constraints and Mixed Linehaults and Backhaults. *FME Transactions* 1(43), ., 311-318. doi:10.5937/fmet1504311P
- Pradhananga, R., Taniguchi, E., Yamada, T., & Qureshi, A. (2014). Bi-objective decision support system for routing and scheduling of hazardous materials. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1(48), 135-148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seps.2014.02.003>
- Quack, T. H. (2019). Fast real-time localization with sparse digital maps for connected automated vehicles in urban areas. *IFAC-Papers OnLine*, 52(5), 366-371. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.059>
- Querish, A. G., Taniguchi, E., & Pomboon, S. (2016). Evaluation of Cost Structure and Impact of Parameters in Location-routing Problem with Time Windows. *Transportation Research Procedia*, 12, 213-226. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.060>
- Rajabion, L., Khorraminia, M., Andjomshoaa, A., Ghafouri-Azar, M., & Molavi, H. (2019). A new model for assessing the impact of the urban intelligent transportation system, farmers' knowledge and business processes on the success of green supply chain management system for urban distribution of agricultural products. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 1(50), 154-162. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.05.007>.
- Rajé, F., Tight, M., & Pope, F. (2018). Traffic pollution: A search for solutions for a city like Nairobi. *Cities*, 82, 100-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.05.008>.
- Richter, A., Löwner, M., Ebdndt, R., & Scholz, M. (2020). Towards an integrated urban development considering novel intelligent transportation systems: Urban Development Considering Novel Transport. *Technological Forecasting and Social Change*(155), 1-14.
- Rodríguez-Vásquez, W. (2020). Modelado de un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos, ventanas de tiempo y flota heterogénea de un servicio de mensajería. *Información Tecnológica*, 31(1), 207-214. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100207>
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The handbook of logistics and distribution management*. London: Kogan Page Limited.

- Russo, F. a. (2020). Investigating the Effects of City Logistics Measures on the Economy of the City. *Sustainability*, 12(4), 1-11. doi:doi:10.3390/su12041439
- Sanchez, R. (2008). Establishing a transport operation focused uncertainty model for the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 388-411.
- Sanz, G., Pastor, R., & Benedito, E. (2013). Distribución urbana de mercancías: descripción y clasificación de soluciones existentes e implementación de dos soluciones novedosas. *DYNA*, 80(179), 6-13. Obtenido de <http://bit.ly/3cQ5fMN>
- Serna Urán, C. (2016). *Modelo multi-agente para problemas de recogida y entrega de mercancías con ventanas de tiempo usando un algoritmo memético con relajaciones difusas (Tesis Doctoral)*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Silva, B., & Teles, M. (2020). Pathways to sustainable urban mobility planning: A case study applied in São Luís, Brazil. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100102>
- Solomon, M. (24 de marzo de 2005). *VRPTW Benchmark Problems*. Obtenido de <http://web.cba.neu.edu/>: <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>.
- Sterle, C. (2009). *Location-Routing models and methods for Freight Distribution and Infomobility in City Logistics (Tesis Doctoral)*. Napoli: Universita' degli Studi di Napoli "Federico II".
- Sumantri, Y. (2017). Lean Logistics Implementation Level in Small and Medium Enterprises (SMES) Sector. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(12), 195-198. Obtenido de <https://bit.ly/3dX2jhM>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *VRP with Backhauls*. Filadelfia: SIAM. doi:<https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.ch8>
- United Nations. (16 de mayo de 2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. Obtenido de <https://www.un.org/>: <https://bit.ly/2Vkf8fi>
- Van Duin, R., Wiegmans, B., Tavasszy, L., Hendriks, B., & He, Y. (2019). Evaluating new participative city logistics concepts: The case of cargo hitching. *Transportation Research Procedia*, 39, 565-575. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.058>
- Zapata-Cortes, J. (2016). *Optimización de la distribución de mercancías utilizando un modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes (Tesis doctoral)*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zapata-Cortés, J., Arango-Serna, M., & Gomez, R. (2013). Information systems applied to transport improvement. *DYNA*, 80(180), 77- 86. Obtenido de <https://bit.ly/2LNL86m>
- Zapata-Cortés, J., Vanoni-Martínez, G., & Perdomo-Charry, G. (2020). Urban Goods Distribution Under Environmental Contingency in Medellín. En J. García Alcaraz, C. Sánchez Ramírez, L. Avelar Sosa, & G. Alor Hernández, *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Global Supply Chain Ecosystems* (Vol. 116, págs. 73-90). Berlin: Springer Cham. Obtenido de <https://bit.ly/2LRgPLL>

CC BY-NC