



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**DETERMINAR UNA ALTERNATIVA DE RUTEO
PARA APLICAR EN LA DISTRIBUCIÓN DE ÚLTIMA
MILLA EN LA OPERACIÓN DE ENSACADOS DE
UNA EMPRESA CEMENTERA COLOMBIANA.**

Juan Camilo Arroyave Carmona

Universidad de Antioquía
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería
Industrial.
Medellín
2020.



**DETERMINAR UNA ALTERNATIVA DE RUTEO PARA
APLICAR EN LA DISTRIBUCIÓN DE ÚLTIMA MILLA EN
LA OPERACIÓN DE ENSACADOS DE UNA EMPRESA
CEMENTERA COLOMBIANA.**

Juan Camilo Arroyave Carmona

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Industrial

Asesor Metodológico:
Msc. Miguel Ángel Arroyave Guerrero

Asesor externo:
MEng. Juan Carlos Pérez Vélez

Universidad de Antioquía
Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial.
Medellín
2020.

Resumen

El problema de ruteo o diseño de rutas es un problema común a muchas compañías que desean reducir sus costos logísticos y por ende mejorar sus ingresos en temas de transporte, cuando a este problema se le otorga variables como flota heterogénea con múltiples ventanas de servicio adquiere mayor complejidad combinatoria lo que lo convierte en un problema del tipo NP -hard.

El Presente trabajo tiene por objeto evaluar la viabilidad sobre la implementación de un modelo de ruteo, mediante la ayuda de software de uso comercial, que ayude a optimizar la planificación de rutas, en la operación de distribución de cemento en sacos hasta los clientes finales, para una compañía del sector cementero colombiano. Las medidas valorativas que ayudarán a determinar si es conveniente migrar la manera actual de diseñar rutas al modelo de ruteo propuesto, serán las variables como los tiempos de rutas, las distancias recorridas por la flota, nivel de servicio, entre otras. Además de todos los costos asociados a la distribución del producto.

Inicialmente se presenta una contextualización del problema y una revisión de literatura acerca de los temas de interés, posteriormente se aborda el proceder para el desarrollo de la metodología propuesta para el ruteo, luego se presenta la valoración de la eficiencia del modelo propuesto vs el existente y por ultimo se presentan las conclusiones y los compromisos acerca del estudio.

Contenido

INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
MARCO TEÓRICO	8
METODOLOGÍA.....	10
RESULTADOS Y ANÁLISIS	12
CONCLUSIONES Y COMPROMISOS FUTUROS.....	20
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22



Lista de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. CEMENTO GRIS CANAL DE DISTRIBUCIÓN Y EMPAQUE.....	9
ILUSTRACIÓN 2. FASES METODOLÓGICAS DEL ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	10
ILUSTRACIÓN 3. RESUMEN DE RESULTADOS BASE-LINE DÍA ESPECIFICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON ROADNET® TRANSPORTATION SUITE	13
ILUSTRACIÓN 4. RUTAS BASE-LINE ZONA SUR VALLE DE ABURRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ROADNET® TRANSPORTATION SUITE	13
ILUSTRACIÓN 5. RUTA 5 BASE-LINE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON ROADNET® TRANSPORTATION SUITE	14
ILUSTRACIÓN 6. RUTA 4 BASE-LINE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON ROADNET® TRANSPORTATION SUITE	15
ILUSTRACIÓN 7. RESUMEN DE RESULTADOS PARA ESCENARIO OPTIMIZADO DÍA ESPECIFICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON ROADNET TRANSPORTATION SUITE.	15
ILUSTRACIÓN 8. RUTAS ESCENARIO OPTIMIZADO ZONA SUR VALLE DE ABURRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON ROADNET® TRANSPORTATION SUITE	16

Lista de tablas

TABLA 1. RESUMEN GLOBAL ESCENARIO BASE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON POWER BI	17
TABLA 2. RESUMEN GLOBAL ESCENARIO OPTIMIZADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON POWER BI	18
TABLA 3. RESUMEN DE COSTOS POR ESCENARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON POWER BI	19
TABLA 4. RESUMEN DIMENSIONAMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	21

Introducción

En Colombia contamos con cierto rezago en cuanto al nivel de desarrollo en temas logísticos, ello se ve reflejado en el precario avance en logística a nivel general y específicamente a nivel de inversión e investigación. Debido a las condiciones económicas y logísticas en las que operan las empresas en Colombia, pocas empresas, medianas y grandes, han adquirido o desarrollado herramientas de software para la gestión de cadenas de suministro (VILLEGAS, PALACIO, & GUTIÉRREZ, 2007). Una consecuencia directa de esto se hace evidente en los elevados costos que implica los temas logísticos en Colombia. El costo logístico en el país está por encima de varias naciones de América y Europa. Mientras que en EE. UU. apenas representa 8,7% de las ventas, en Europa se eleva al 11,9% y en América Latina el promedio es de 14,7% (CRESPO SAAVEDRA, 2016). Para el caso puntual de Colombia el costo de logística representan el 14,97% del total de las ventas lo que quiere decir que aproximadamente \$15 de cada \$100 del valor de un producto se invierte en este rubro. En suma según la encuesta nacional logística el 83,8% de las entregas se realiza a tiempo, es decir, dos de cada diez pedidos llegan tarde; 92,2% de los encargos llegan completos al destinatario y apenas 73,3% de las solicitudes se hacen a tiempo y completas (CRESPO SAAVEDRA, 2016). Lo que deja ver también el traumatismo, no solo hablando de costos, sino también a nivel de planificación logística con el que cuenta el país.

El factor a nivel logístico o el componente de la gestión de la cadena de abastecimiento que mejor explica los costos anteriormente mencionados es la última etapa del transporte. Debido a que dentro de la cadena de suministro tan solo el transporte representa entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes (OLIVERA, 2001). A su vez la distribución urbana de mercancías, conocida también como distribución de última milla por ser última etapa de entrega en la cadena de suministro, es para muchas compañías un problema de gran importancia ya que se estima que representa alrededor de un tercio del costo total de transporte de la cadena logística (GOODMAN, 2005). Es aquí donde se hace necesario abordar y estudiar este tipo de problemas mediante herramientas que brinda la investigación de operaciones (IO), por nombrar una de las vertientes de la ingeniería. La adecuada planificación de la distribución de productos desde uno o varios depósitos hacia los usuarios finales puede significar ahorros considerables, que justifican de alguna manera la inversión de recursos para la implementación de técnicas de investigación de operaciones que permitan optimizar el costo de la operación logística (OLIVERA, 2001) de igual manera la selección, adquisición, implementación y evaluación de herramientas informáticas para el diseño de rutas, son actividades relevantes en

la búsqueda de ventajas en mercados cada vez más competidos (VILLEGAS, PALACIO, & GUTIÉRREZ, 2007).

El diseño de rutas de vehículos es una de las funciones operativas más críticas del transporte, enmarcado en la gestión de cadenas de abastecimiento (VILLEGAS, PALACIO, & GUTIÉRREZ, 2012). En el caso de la distribución urbana es común hablar del problema de ruteo de vehículos (VRP, por su sigla en inglés), el cual ha sido ampliamente estudiado desde el campo de la investigación de operaciones con el fin de dar soluciones de diseño de rutas para la entrega o recolección de bienes, minimizando el tiempo de viaje o la distancia total recorrida por la flota de vehículos desde que parten de un único punto de origen (depósito), hasta que visitan la totalidad de destinos dispersos geográficamente (conjunto de clientes) y regresan nuevamente al punto de origen (GONZÁLEZ, 2016).

Para el caso de aplicación del presente proyecto la compañía atiende un conjunto de clientes, desde uno o varios centros de distribución, con una flota de vehículos heterogénea, con ventanas de tiempo de servicio y cierto número de restricciones. En la actualidad la asignación de rutas para los vehículos se realiza de manera manual siguiendo ciertos criterios como la zonificación geográfica del área a atender, de este modo la programación de la ruta que debe seguir cada vehículo se carga a un sistema de visualización móvil, donde puede o no ser cumplida la secuenciación dependiendo del criterio del conductor. Con base en esto se desea evaluar la aplicabilidad y viabilidad de una metodología que de solución al problema de la programación de rutas y que a su vez ayude a disminuir los costos logísticos, aumente los niveles de servicio cumpliendo con las restricciones a las que se den lugar en el modelamiento.

Para ello se abordará el problema mediante una variante del problema de ruteo de vehículos conocida como MDHVRPTW (Multi-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows) en la cual una flota heterogénea de vehículos parte desde varios depósitos para satisfacer la demanda de los clientes (PÉREZ, 2016). Para la construcción del modelo la compañía suministra toda la información necesaria y se considera como propuesta inicial el uso de una herramienta útil distribuida a nivel comercial, práctica, con respuesta computacional corta, este software sumado a una automatización realizada en una herramienta ofimática de uso común contribuirán a reevaluar la condición actual de programación de rutas. Roadnet® Transportation Suite, es el software que se ajusta muy bien a las necesidades de ruteo en Colombia destacada por (VILLEGAS, PALACIO, & GUTIÉRREZ, 2012) como herramienta con la posibilidad de programar paradas en tiempo real, la flexibilidad para hacer ruteo

diario, y la capacidad de considerar información de tráfico en tiempo real. Adicionalmente, esta herramienta permite contemplar múltiples criterios de optimización que pueden ser personalizados por el usuario, trabajar con ventanas de tiempo y ofrece buenas funcionalidades de visualización de las soluciones en el mapa.

Objetivo general

Determinar una alternativa para aplicar en la distribución de última milla en la operación de ensacados de una empresa cementera colombiana, como medida valorativa para determinar la mejor forma de realizar los despachos de vehículos y buscando reducir los costos logísticos afectando directamente los tiempos de ruta, los niveles de servicio, la distancia recorrida y el costo por kilómetro.

Objetivos específicos

Para la consecución del objetivo general del proyecto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión de la literatura que permita contextualizar acerca tanto de las particularidades de la industria cementera como del tema académico y de aplicación.
- Seleccionar una metodología ajustable a los requerimientos de la compañía y Hacer validaciones en campo del funcionamiento de modelo y corridas de prueba.
- Ajustar el modelo a las restricciones y medir viabilidad por medio de indicadores de desempeño.
- Evaluar la factibilidad y aplicabilidad de la alternativa propuesta de acuerdo con los resultados y a las exigencias de la empresa.

Marco teórico

El cemento se puede precisar como una mezcla de arcilla molida y otros materiales calcificados en polvo. Que después de un debido proceso, adquiere propiedades adherentes. Es considerado la materia prima más importante para el sector de la construcción (Cañon, 2008) que mezclados con otros agregados pétreos o líquidos permite diluirse para posteriormente obtener una sustancia maleable y uniforme con la propiedad de fraguar y endurecer, lo que se conoce como concreto u hormigón. Por su parte el cemento gris es un tipo de cemento cuya mezcla se compone de clinker, caliza y yeso. Como se puede intuir el cemento constituye una de las materias primas más importantes para el desarrollo civil y estructural de los países, ello se ve reflejado en el panorama mundial del sector Cementero. En 2016 el consumo mundial de cemento alcanzó las 4,129 millones de toneladas lo que representó una variación positiva del 1,8% respecto al 2015 o lo que es lo mismo un consumo per-cápita de 557 kg (ASOCEM, 2017), la producción y el consumo a nivel mundial lo encabezan China, India y Estados Unidos. En un entorno más local el panorama es igual de positivo con un crecimiento anual significativo. En enero de 2020, la producción de cemento gris a nivel nacional fue de 1.041,2 miles de toneladas, lo que representó un incremento 12,2% con relación al mismo mes de 2019. (DANE, 2020) Por otro lado según el canal de distribución analizado en el mismo periodo de tiempo anterior, los despachos de cemento gris se explicaron principalmente por el aumento en el canal de distribución de comercialización (12,1%) el cual aportó un 6,7 puntos porcentuales a la variación total de 8,5%. Del mismo modo por tipo de empaque en enero de 2020, el aumento de los despachos al canal de Constructores y Contratistas (23,1%) sumó 4,0 puntos porcentuales a la variación del cemento gris a granel (4,4%). Por su parte, el aumento del cemento gris empacado obedeció primordialmente al canal de Comercialización (11,9%) el cual contribuyó con 9,3 puntos porcentuales a la variación de 10,3% (DANE, 2020).

Canal de distribución	Granel		Empacado		Total	
	Variación anual (%)	Contribución (p.p.)	Variación anual (%)	Contribución (p.p.)	Variación anual (%)	Contribución (p.p.)
Total	4,4	4,4	10,3	10,3	8,5	8,5
Comercialización	213,8	0,4	11,9	9,3	12,1	6,7
Constructores y contratistas	23,1	4,0	-3,7	-0,7	3,9	0,7
Fibrocemento	27,2	1,3	--	--	27,2	0,4
Prefabricados	-12,3	-0,8	17,5	0,2	-2,9	-0,1
Concreteras	-2,4	-1,7	25,2	0,2	-1,8	-0,4
Otros*	142,6	1,2	124,3	1,3	129,1	1,2

Fuente: DANE, ECG.

Ilustración 1. cemento gris canal de distribución y empaque

Como ya se había mencionado previamente para el caso de estudio el problema se abordará como un problema de ruteo de vehículos (VRP, por su sigla en inglés) y dentro de este estudio el modelamiento del problema se realizará mediante una variante de este, conocida MDHVRPTW (Multi-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows) en la cual una flota heterogénea de vehículos parte desde varios depósitos para satisfacer la demanda de los clientes, dando cumplimiento a las restricciones de horarios de atención impuestas por cada destino (DONDO & CERDÁ, 2007). El MDHVRPTW es un problema de alta complejidad matemática (NP-Hard) debido a su característica combinatoria que hace que el tiempo computacional necesario para obtener la solución óptima crezca en función de la cantidad de elementos que lo componen (vehículos, depósitos, ventanas horarias, etc.) (PÉREZ, 2016). Esta variación al problema de ruteo ha sido ampliamente estudiada pero se estudio por primera vez según (DONDO, MÉNDEZ, & CERDÁ, 2003) en el año 2003, así como se estudio desde considerable tiempo atrás el problema de transporte en general, con registro de finales de los años cincuenta; el problema de ruteo de flota es en la actualidad es uno de los problemas más estudiados en investigación de operaciones y logística. (PÉREZ, 2016). Pese a que en la literatura existen varias metodologías para solucionar los problemas de este tipo ninguno considera un conjunto de clientes tan numeroso con es nuestro caso pues la mayoría de metodologías basadas en algoritmos heurísticos y/o metaheurísticos que hasta ahora existen para abordar el MDHVRPTW están en capacidad de resolver problemas con conjuntos de clientes relativamente pequeños (BETTINELLI, CESELLI, & RIGHINI, 2011) adicionalmente a eso las características del MDHVRPTW otorgan variables al modelo como las ventanas del servicio y la heterogenidad de la flota que dificultan su aplicabilidad, es por

ello que deben evaluarse la implementación del mejor modelo que se acerque a la optimalidad sugerida debido a que aunque se han desarrollado múltiples metodologías de optimización basadas en técnicas exactas, heurísticas o metaheurísticas para dar solución a problemas complejos de ruteo de vehículos, aun no se conoce en la literatura ningún algoritmo exacto para el MDHVRPTW (BETTINELLI, CESELLI, & RIGHINI, 2011).

Metodología

A continuación, se presenta de manera gráfica un resumen de las fases metodológicas que se llevaron a cabo paso a paso, para el desarrollo del presente estudio.

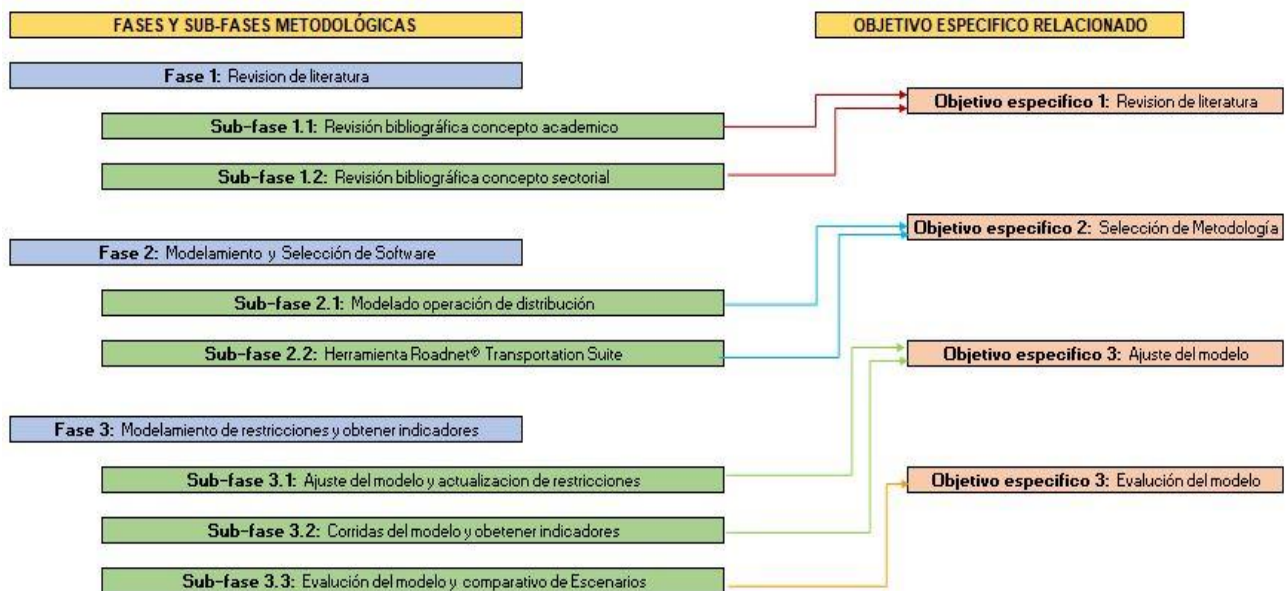


Ilustración 2. Fases metodológicas del estudio. Fuente: elaboración propia

A manera de resumen para la fase metodológica inicial, para la revisión bibliográfica y estudio del arte tanto del sector, como de los conceptos académicos, se recurrió a base de datos bibliográficos de la universidad de Antioquia y de la universidad nacional de Colombia, se hizo uso de estudios previos al interior de la compañía que colaboró e hizo posible la realización del presente estudio. Posterior a la revisión literaria, y como segunda etapa metodológica del presente proyecto fue posible realizar un acompañamiento y acercamiento a la operación y planeación de rutas del proceso a intervenir, adicional a ello, la empresa facilito el acceso a la herramienta, a la capacitación y uso del software con el cual se apoyo el modelo de ruteo, su posterior análisis

y evaluación. Mas tarde se realizo una intervención en campo realizando corridas de prueba y ajustado el modelo a los requerimientos particulares. Finalmente se realizaron corridas en paralelo al modelo de asignación de rutas existente y de obtuvieron datos para su posterior análisis y comparación.

Como principal herramienta entonces para apoyar la toma de decisiones se contó con el software que ayudo al ruteo por su rápida respuesta computacional y en adición a ello, algunas desarrollos y herramientas ofimáticas de uso comercial para reducir el tiempo de procesamiento de los datos, estas ultimas herramientas de acceso abierto son necesarias para el manejo de bases de datos de clientes, sku's, tamaño de pedido, ubicación, entre otros, cabe aclarar que el tema de la georreferenciación o geolocalización de los clientes es vital para cualquier tipo de modelo de ruteo, pues de la calidad de estos datos depende los buenos resultados del modelo en general para ello se hizo uso de mapas web, API's de Google, entre otros. Muchos de estos facilitados por el tutor externo a este proyecto.

Conociendo de manera más precisa el software empleado Roadnet Transportation Suite ® es un software disponible en el mercado desde el año 1983, que fue diseñado por la filial de desarrollos tecnológicos de la UPS (United Parcel Service), UPS Logistics Technologies, conocida por ser uno de los más grandes operadores logísticos a nivel mundial con operación en Estados Unidos desde el año 1907 (PÉREZ, 2016). El programa está habilitado para trabajar con múltiples depósitos y distintos tipos de vehículos, pero no está en capacidad de trabajar con ventanas de tiempo rígidas, por lo cual el usuario debe parametrizar el modelo y realizar las configuraciones necesarias para garantizar que se cumplan todas las restricciones (PÉREZ, 2016). La construcción del modelo de optimización se construirá entonces sobre las exigencias del software y sobre las interfaces que se requieren, esto para construir de manera adecuada el insumo que requiere la herramienta para ayudar en cuanto a su rápida respuesta computacional. Como dato relevante según Gutiérrez, Palacio, & Villegas (2012) Este software es una herramienta creada para diseñar las rutas de los vehículos de manera eficiente, con base en algoritmos heurísticos constructivistas para la clusterización de clientes y secuenciación de visitas, considerando aspectos como las distancias entre clientes, las ventanas de servicio, las capacidades de los vehículos disponibles, las restricciones de las vías, entre otros.

Para finalizar y enmarcados en el tema de análisis de resultados y toma de decisiones referente al objetivo principal del estudio, se hizo uso de herramientas de reportería y de manejo de datos como Power BI y Excel de la casa Microsoft,

que facilitan en gran medida el resumen y recopilación de datos y la forma en como estos se pueden presentar de manera consolidada.

Resultados y Análisis

Para el apartado de los resultados y su análisis se presentan 2 escenarios, el escenario inicial bajo el cual la empresa operaba su modelo “empírico” de distribución y ruteo, el cual fue base line o escenario base para medir el modelo propuesto, en cuanto a los indicadores propuestos y para un segundo escenario se mostrarán los resultados obtenidos bajo las mismas condiciones iniciales, corriendo el modelo de ruteo propuesto, lo que reflejará un escenario optimizado y sobre el cual se harán las respectivas comparaciones, que ayuden a determinar la aplicabilidad del modelo propuesto a las necesidades de operación logística.

El modelo se puso a prueba durante aproximadamente 3 meses y medio, diseñando rutas en paralelo al modelo con el que se venía programando la distribución dentro de los municipios pertenecientes al área metropolitana y algunos del valle de aburra, como la zona de palmas, esto sin que los vehículos realizarán las rutas arrojadas por el modelo propuesto, solo para efectos de medición teórica y análisis de datos, para ello se tomaban los pedidos pendientes por cliente o demanda por cada Sku, la ubicación y las ventanas horarios para atención y se diseñaban rutas cumpliendo los parámetros de demanda y restricciones asociadas al modelo. Previo a esto se habían realizado corridas de prueba al modelo para verificar su ajuste a las exigencias de la operación real.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos al representar por medio de Roadnet® Transportation Suite una muestra de una semana habitual y aleatoria, ubicada dentro del periodo de los 3 meses y medio (para efectos de visualización) para el escenario base. La semana corresponde a la ultima semana del mes de enero de 2020, desde el día 27 de enero hasta el 2 de febrero sin incluir el ultima día ya que la empresa no opera los domingos.

Número de ruta	ID de ruta	Equipo	Cantidad de paradas	Distancia	Distancia (gráfica)	Tiempo de servicio	Tiempo de desplazamiento	Tiempo total	Tiempo total (gráfica)	Ton	Cargar Ton (gráfica)	Ventanas de servicio fallidas	Fecha
1	EQW530	T32 -	2	25.21		00:54:43	01:08:15	02:02:58		3,648000		1	29/1
2	ESR337	T33 -	4	53.53		04:30:00	02:04:40	06:34:40		18,000000		1	29/1
3	EXU893	T34 -	2	37.56		01:12:15	01:28:16	02:40:31		8,500000		1	29/1
4	EXU980	T23 -	1	5.12		01:15:00	00:13:17	01:28:17		5,000000		1	29/1
5	EXV135	NK7 -	9	72.29		01:10:58	02:45:55	03:56:53		4,734000		4	29/1
6	GDW543	T27 -	3	40.18		03:45:00	01:34:12	05:19:12		15,000000		1	29/1
7	GDX090	S23 -	3	33.69		06:45:00	01:21:56	08:06:56		27,000000		2	29/1
8	GEU844	E01 -	9	57.72		01:53:29	02:22:09	04:15:38		7,568000		6	29/1
9	GEU845	E02 -	3	39.24		01:51:56	01:37:32	03:29:28		7,463000		1	29/1
10	GEU846	E03 -	5	34.58		01:27:14	01:41:09	03:08:23		5,817000		3	29/1
11	GEU847	E04 -	16	59.97		01:11:02	02:37:24	03:48:26		4,739000		4	29/1
12	GEU848	E05 -	14	91.27		02:44:35	03:38:37	06:23:12		10,976000		3	29/1
46			207	2,044.56		160:23:55	83:54:26	244:18:21		801.632000		82	

Ilustración 3. Resumen de resultados base-line día específico. Fuente: elaboración propia con Roadnet® Transportation Suite

En la Ilustración 3. podemos ver el resumen de rutas del día 29 de enero, donde es evidente el alto número de ventanas fallidas, lo que afecta directamente uno de los indicadores que es el nivel de servicio, además de la relación no coherente entre la grafica de la distancia y de la gráfica del tiempo total para el escenario base, por otra parte para el análisis puntual de las rutas construidas para este día podemos observar en la grafica de cargar toneladas la manera que en se densifico o se uso la capacidad de carga de cada uno de los vehículos relacionados, donde es evidente en algunos casos la sobre carga (color rojo) y en otros casos la capacidad ociosa en los vehículos.

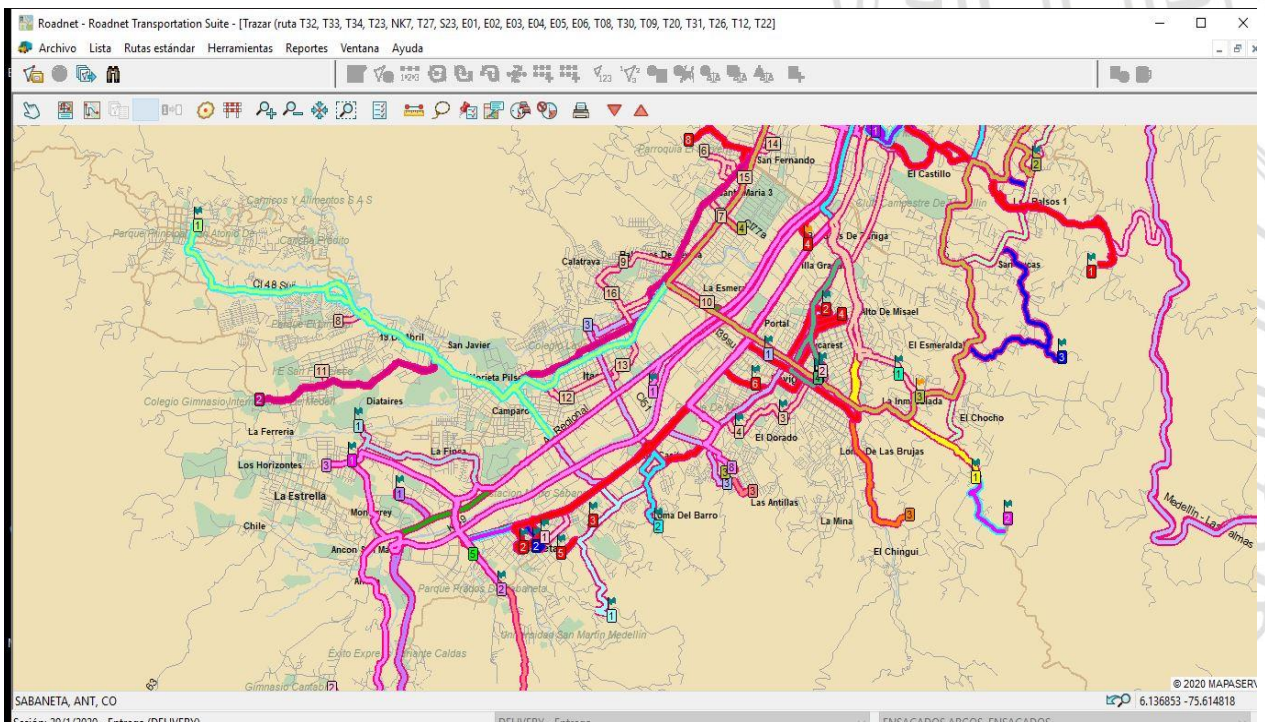


Ilustración 4. Rutas base-line zona sur valle de aburra. Fuente: elaboración propia Roadnet® Transportation Suite

En la Ilustración 4 podemos ver la distribución de las rutas en la zona sur del área metropolitana para el día 29 de enero, donde se movilizaron un total de 801.6 toneladas de cemento ensacado, de manera gráfica puede verse el desbalance de las rutas, pues algunas rutas son demasiado extensas y otras por otro lado muy cortas.

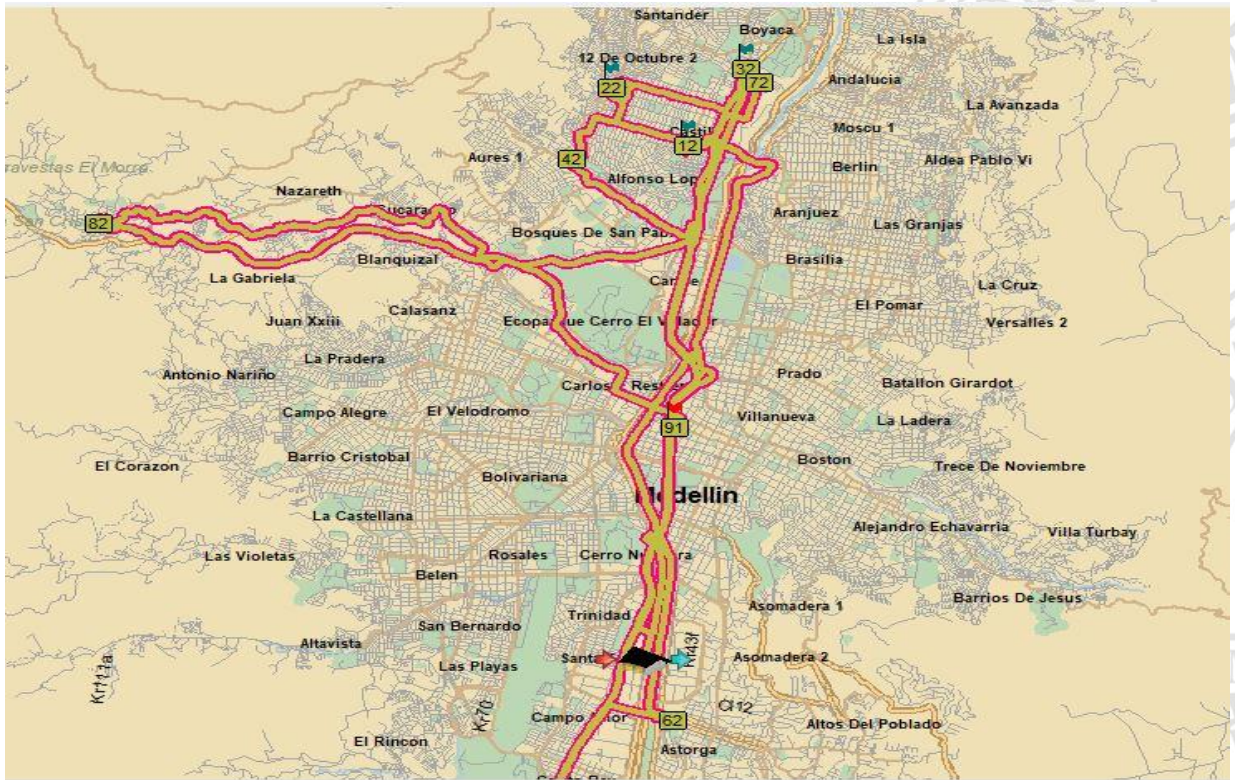


Ilustración 5. Ruta 5 base-line. Fuente: Elaboración propia con Roadnet® Transportation Suite

La Ilustración 5 representa la ruta número 5 para el escenario base, el día 29 de enero, dicha ruta acumuló un total de 72.29 kilómetros recorridos, movilizándolo 4.7 toneladas de cemento en sacos. Esto en contraste con la ruta número 4 que se puede ver en la Ilustración 6, ruta que movilizó para el mismo día en el escenario base un total de 5 toneladas con tan solo recorrer 5 kilómetros, lo que hace evidente el desbalance que se nombraba anteriormente entre las distancias de rutas programadas para los diferentes vehículos.



Ilustración 6. Ruta 4 base-line. Fuente: Elaboración propia con Roadnet® Transportation Suite

En contraste con el análisis del escenario base, a continuación, y de forma análoga, se presenta la información del escenario optimizado para el mismo día del periodo analizado y para las mismas variables observadas anteriormente.

Número de ruta	ID de ruta	Equipo	Cantidad de paradas	Distancia	Distancia (gráfica)	Tiempo de servicio	Tiempo de esplazamiento	Tiempo total	Tiempo total (gráfica)	Ton	Cargar Ton (gráfica)	Ventanas de servicio fallidas	Fec
264	RUTA116	NH1 -	1	51.81		00:25:30	02:12:08	02:37:38		1.700000		0	
383	RUTA10	NH1 -	4	116.80		01:59:59	04:10:52	07:19:02		8.000000		0	
285	RUTA95	E04 -	6	131.22		02:58:02	05:42:54	10:00:12		11.869000		0	
349	RUTA31	NK7 -	15	100.51		03:04:19	04:23:39	09:07:07		12.291000		0	
268	RUTA112	E05 -	7	148.56		03:04:42	05:56:16	10:56:59		12.315000		0	
339	RUTA41	E01 -	19	139.99		03:16:29	05:53:37	10:34:35		13.104000		0	
293	RUTA87	E03 -	7	91.86		03:42:28	04:26:48	09:55:23		14.832000		0	
274	RUTA106	T17 -	13	142.44		03:50:54	05:09:14	10:11:10		15.400000		0	
305	RUTA75	T19 -	4	66.86		03:54:22	02:29:36	09:19:40		15.625000		0	
308	RUTA72	T26 -	3	63.03		03:55:51	02:24:02	09:06:32		15.724000		0	
298	RUTA82	F02 -	7	104.49		03:58:15	04:15:46	10:01:49		15.750000		0	
36			227	2,672.09		160:23:53	108:59:43	339:58:03		801.632000		0	

Ilustración 7. Resumen de resultados para escenario optimizado día específico. Fuente: Elaboración propia con Roadnet transportation suite.

Como es evidente en la Ilustración 7 el escenario optimizado presente mejoras considerables, en los indicadores que interesa medir en el modelo de ruteo, ello frente a los resultados del escenario base que pueden verse en la Ilustración 3, para los resultados obtenidos a partir del escenario optimizado tan solo fue necesario la construcción de 36 rutas, frente a las 46 rutas que fueron necesarias

en el escenario base para atender igual número de toneladas (801.6 ton), por otro lado el modelo optimizado presenta una mejora sustancial en términos de la demanda servida y en consecuencia del nivel de servicio ya que este no incumple con ninguna de las ventanas de servicio existentes por cliente, frente a las 82 ventanas de servicio fallidas en el escenario inicial, es importante resaltar en este punto que para el escenario propuesto tanto la distancia recorrida como el tiempo total empleado es mayor, esto cumpliendo con las restricciones de tiempo máximo laboral y ventanas de servicio por cliente, como ultima observación a comparar, se puede observar que la densificación para los vehículos para el segundo escenario es mucho mejor, lo que representa mejoras en la utilización de la capacidad de carga de los vehículos, reduciendo a su vez capacidad ociosa.

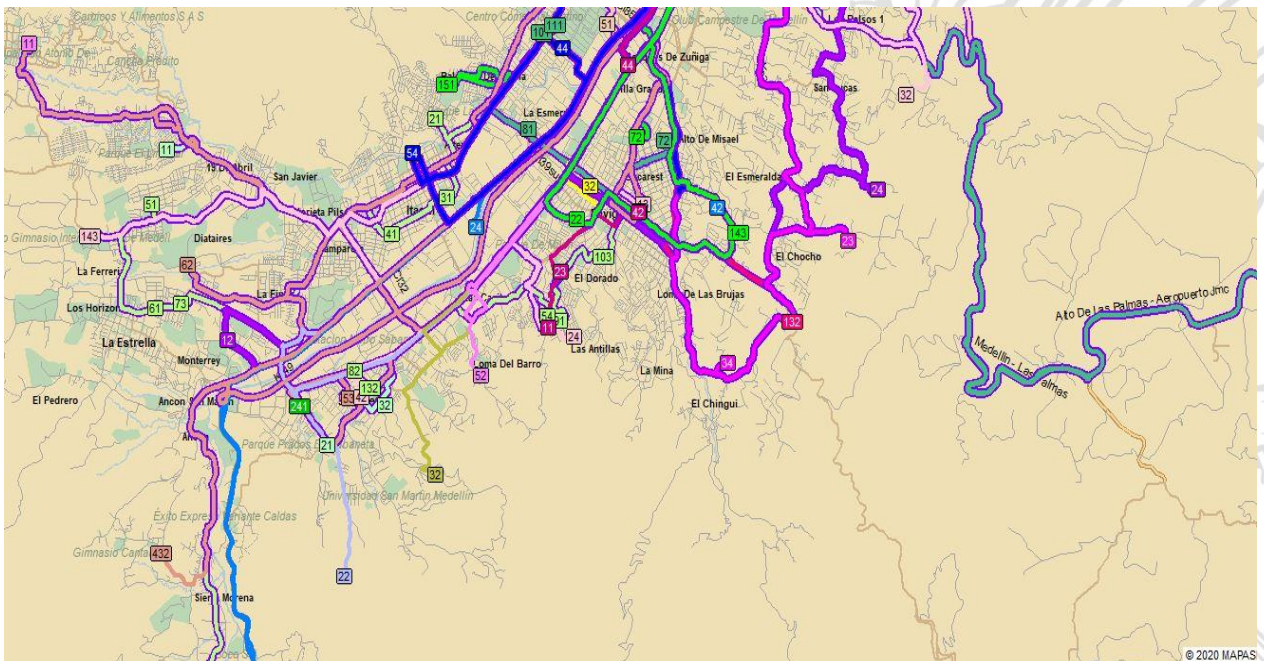


Ilustración 8. Rutas escenario optimizado zona sur valle de aburra. Fuente: Elaboración propia con Roadnet® Transportation Suite

De manera general y como lo muestra la Ilustración 8, frente a el trazado de las rutas del escenario base, el escenario propuesta deja ver rutas más balanceadas en términos de las distancias que los diferentes vehículos recorren, sin mencionar el reducido numero de rutas para en este caso la zona sur del área metropolitana.

En adición a los resultados presentados anteriormente y con el objetivo de analizar los demás indicadores que se proponen como variables de decisión, se presenta a continuación de manera agregada y resumida, los resultados para cada uno de los escenarios de manera global, donde se podrán evidenciar los demás indicadores que sustentarán la decisión que determinen la aplicabilidad

del modelo propuesto y su pertinencia en términos de las exigencias de la empresa.

Tabla 1. Resumen global escenario base. Fuente: Elaboración propia con Power BI

Fecha	ESCENARIO	12:01:44		11.839,18		4.138,52			
Todas	BASE	tiempo total X escenario		Distancia(km)		Toneladas Entregadas			
Fecha	ESCENARIO	Placa	Ton_	Ventanas de servicio fallidas_	Tiempo_de_desplazamiento_	Tiempo_de_servicio_	Tiempo_total_	tiempo total X escenario	Distancia(km)
27/1/2020	BASE	TFR531	18,00	1	00:20:42	04:30:00	04:50:42	04:50:42	8,38
27/1/2020	BASE	TRF972	18,00	1	00:20:42	04:30:00	04:50:42	04:50:42	8,38
27/1/2020	BASE	TRF998	36,00	2	00:20:42	09:00:00	09:20:42	09:20:42	8,38
27/1/2020	BASE	GDX090	8,50	1	00:22:20	02:07:30	02:29:50	02:29:50	9,28
27/1/2020	BASE	SVF558	18,00	1	00:24:34	00:36:00	01:00:34	01:00:34	10,54
27/1/2020	BASE	SVF555	14,00	1	00:25:27	03:30:00	03:55:27	03:55:27	11,40
27/1/2020	BASE	SVF559	22,75	2	00:47:50	00:45:30	01:33:20	01:33:20	18,74
27/1/2020	BASE	TNG947	13,50	1	00:54:47	03:22:30	04:17:17	04:17:17	23,14
27/1/2020	BASE	SVF610	18,50	1	00:56:30	04:37:30	05:34:00	05:34:00	24,09
27/1/2020	BASE	TAW472	10,00	1	01:03:22	02:30:00	03:33:22	03:33:22	31,31
27/1/2020	BASE	SVF617	18,50	1	01:04:52	04:37:30	05:42:22	05:42:22	27,57
27/1/2020	BASE	SNW452	9,25	1	01:06:22	02:18:45	03:25:07	03:25:07	26,32
27/1/2020	BASE	SMH190	28,09	2	01:09:06	07:01:20	08:10:26	08:10:26	29,42
Total			4.138,52	420				12:01:44	11.839,18

En la Tabla 1, tenemos la información agregada para el escenario base, donde es notorio observar las variables como tiempo total en el horizonte de tiempo evaluado para dicho escenario, la distancia total recorrida en kilómetros por los diferentes vehículos que conforman la flota y por último como indicador de relevancia el total de las toneladas entregadas para el escenario base durante el periodo de tiempo.

Tabla 2. Resumen global escenario optimizado. Fuente: Elaboración propia con Power BI

Fecha	ESCENARIO	Placa	Ton_	Ventanas de servicio fallidas_	Tiempo de desplazamiento_	Tiempo de servicio_	Tiempo total_	tiempo total X escenario	Distancia(km)
27/1/2020	OPTIMIZADO3	SMH190	23,53	0	02:43:28	05:52:56	10:00:31	10:00:31	73,04
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TRM309	17,05	0	03:45:03	04:15:45	09:34:00	09:34:00	108,04
27/1/2020	OPTIMIZADO3	SOI087	19,38	0	04:19:19	04:50:42	10:51:20	10:51:20	105,55
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TKI225	13,17	0	04:37:57	03:17:35	09:19:13	09:19:13	109,97
27/1/2020	OPTIMIZADO3	EQW530	15,99	0	05:08:55	03:59:48	10:41:41	10:41:41	115,79
27/1/2020	OPTIMIZADO3	EXV135	10,10	0	06:08:26	02:31:20	10:10:08	10:10:08	139,58
27/1/2020	OPTIMIZADO3	SNU183	28,50	0	02:31:32	07:07:30	11:23:02	11:23:02	64,92
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TOP019	24,45	0	02:47:10	06:06:45	10:23:55	10:23:55	64,91
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TIZ715	22,00	0	02:51:27	05:30:00	10:06:27	10:06:27	72,41
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TNG947	19,35	0	03:11:16	04:50:15	09:46:55	09:46:55	76,15
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TER382	18,42	0	03:59:09	04:36:17	09:53:18	09:53:18	103,86
27/1/2020	OPTIMIZADO3	SVF558	30,75	0	00:47:53	01:01:30	02:55:23	02:55:23	20,21
27/1/2020	OPTIMIZADO3	TRF972	31,86	0	00:56:13	07:57:51	10:04:29	10:04:29	20,10
Total			4.138,52	0				18:31:42	15.278,57

La Tabla 2, muestra las variaciones para el escenario propuesto con la misma información de la Tabla 1, donde puede evidenciarse un aumento en la distancia recorrida para el escenario optimizado, como ya se había mencionado anteriormente, con una igualdad en las toneladas entregadas, y un aumento en el tiempo total requerido para atender la demanda.

Por ultimo y para analizar el tema de los costos asociados en ambos casos, se muestra una tabla resumen con los costos de interés por escenario y su respectiva variación.

Tabla 3. Resumen de costos por escenario. Fuente: Elaboración propia con Power BI

ESCENARIO		Fecha				
<input type="checkbox"/> BASE		Todas				
<input type="checkbox"/> OPTIMIZADO						
<input type="checkbox"/> OPTIMIZADO2						
<input type="checkbox"/> OPTIMIZADO3						
Año	Mes	Día	Costo base1	Costo optimizado3	Diferencia costo1	Reducción costo1
2020	enero	31	\$15.286.288	\$ 17.180.174,96	-\$ 1.893.887	-12,39 %
2020	enero	30	\$17.225.260	\$ 16.851.951,61	\$ 373.309	2,17 %
2020	enero	29	\$16.377.512	\$ 15.486.418,37	\$ 891.094	5,44 %
2020	enero	27	\$15.768.095	\$ 15.128.644,90	\$ 639.450	4,06 %
2020	enero	28	\$15.476.914	\$ 14.253.637,35	\$ 1.223.277	7,90 %
2020	febrero	1	\$7.692.177	\$ 8.674.902,34	-\$ 982.725	-12,78 %
Total			\$87.826.246	\$ 87.575.729,54	\$ 250.517	0,29 %

En la Tabla 3 puede verse el detalle de los costos asociados al escenario base por fecha con su respectivo total contrastado con el mismo rubro del escenario propuesto que en este caso es el escenario optimizado 3, donde al final se muestra la variación en términos de costos y la variación porcentual de los mismo, de manera general hay un ahorro en términos de costos igual a 250.517 para el periodo de análisis, o lo que es lo mismo una disminución de costo del 0.29% bajo las condiciones dadas.

Conclusiones

Dentro del proceso de revisión de literatura fruto del presente trabajo, fue evidente que las metodologías estudiadas hasta ahora, para abordar el problema de ruteo con múltiples depósitos, flota heterogénea y ventanas de tiempo de servicio, por medio de un método exacto son pocas. Pues según el estudio de literatura realizado la gran mayoría de publicaciones y autores que han abordado el tema o se han interesa por dar solución a esta variación del problema de ruteo, han buscado hacerlo por aproximaciones mediante métodos heurísticos y metaheurísticos, que a groso modo ofrecen muy buenos resultados dada la complejidad del MDHVRTW.

Adicional a esto y en marcados en el análisis del sector logístico colombiano, se reflejó de manera vivencial lo encontrado en la literatura, en cuanto al rezago marcado que presentan países como Colombia en temas logísticos, pues la mayoría de las compañías dedicadas a la operación logística basan sus modelos de operación en modelos empíricos y con confiabilidad en la experticia de uno o más operarios que intervienen el modelo a nivel general.

En consecuencia con lo anterior, el acceso y uso de herramientas que faciliten la optimización de redes logísticas compuestas y que involucren intrínsecamente problemas de ruteo, en Colombia es sumamente precario, pues es limitado el acceso a software especializado (algunas ocasiones por temas económicos, en otras por temas técnicos). Esto dificulta en gran medida la adaptación de estos recursos a los modelos logísticos del entorno colombiano, cuando pueden incluirse, pues estos modelos y particularmente los de distribución, desde su misma estructuración no contemplan cambios a los que puedan darse lugar al implementar software de este tipo o cambios que la implementación de un modelo nuevo pudiese sugerir.

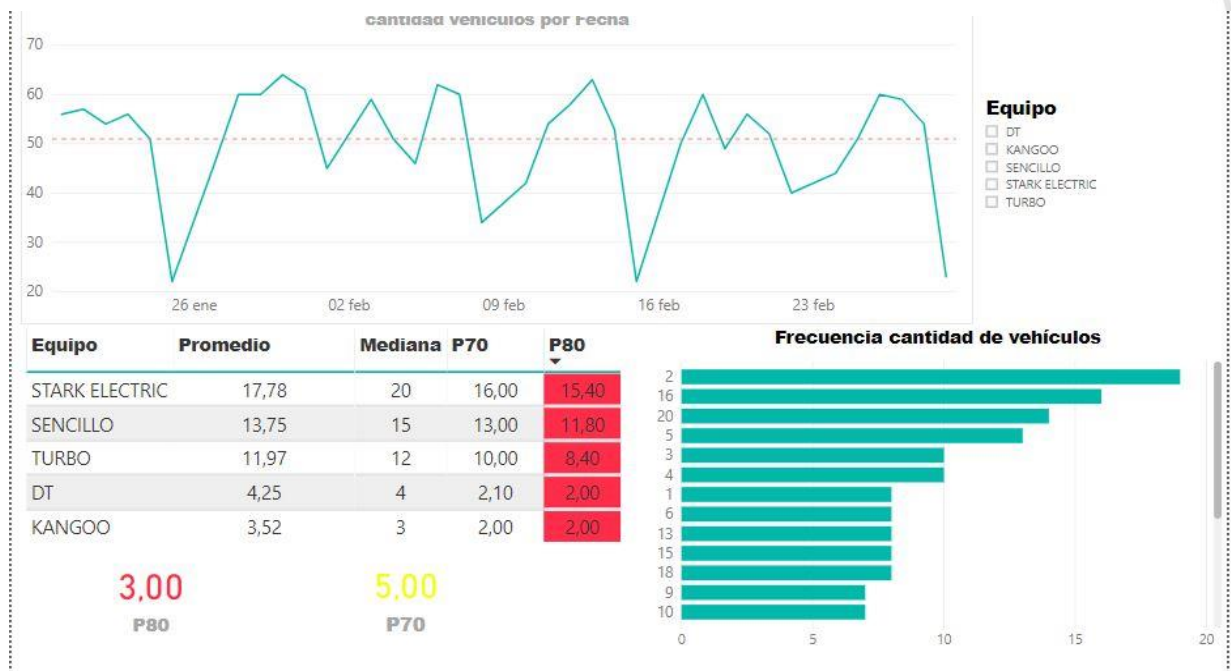
Lo anterior pese a que como en este caso de aplicación y por medio de la herramienta usada, se generen buenos resultados en términos de indicadores de eficiencia y logísticos. El uso de software como lo reflejo el resultado de este estudio puede ofrecer alternativas que efectivamente optimicen tamaños y uso de flota, distancias recorridas, tiempos de viaje, en incluso, representar un ahorro en términos de costos involucrados en el transporte.

Trabajos futuros

Como compromiso futuro al presente estudio se propone una re-evaluación de la implementación del modelo de ruteo, bajo condiciones diferentes a las que propone la actual estructuración del modelo de distribución que maneja la empresa cementera, pues con esto las bondades del modelo en cuanto a resultados medidos por medio de los indicadores de interés, serán aun mas evidentes, esto debido a que en la actualidad se le están otorgando restricciones adicionales al modelo de ruteo propuesto, que no hacen parte integral del modelo de distribución que la empresa desea alcanzar y se podrían omitir dentro de la propuesta final.

Como parte inicial de los compromisos futuros al presente estudio y como un análisis adicional al alcance determinado para este proyecto, a continuación, se presentan los resultados del análisis de dimensionamiento y de mix de flota optimo calculado para la misma operación intervenida, los resultados y resumen se muestran en la Tabla 4 donde se visualiza la propuesta del número de vehículos que se debería incluir en la operación por cada tipo, con base en el análisis de la demanda durante el tiempo de estudio y asegurando demanda mínima servida del 80% diaria por medio de un percentil 80 (campo en rojo).

Tabla 4. Resumen dimensionamiento. Fuente: elaboración propia



Referencias bibliográficas

- ASOCEM. (2017). *PANORAMA MUNDIAL DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO*. Colombia: ASOCEM.
- BETTINELLI, A., CESELLI, A., & RIGHINI, G. (2011). A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 723-740.
- Cañon, A. (2008). *LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN COLOMBIA DETERMINANTES Y COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA*. Pontificia Universidad Javeriana.
- CRESPO SAAVEDRA, M. A. (5 de Julio de 2016). El costo logístico en Colombia sigue siendo alto. *El mundo*, págs. 1-2.
- DANE. (2020). *Estadísticas de Cemento Gris (ECG)*. Bogotá: Boletín Técnico.
- DONDO, R., & CERDÁ, J. (2007). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 1478-1507.
- DONDO, R., MÉNDEZ, C., & CERDÁ, J. (2003). An Optimal Approach To the Multiple-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem With Time Window and Capacity Constraints. *Latin American Applied Research*, 33, 129-134.
- DONDO, R., MÉNDEZ, C., & CERDÁ, J. (2003). An Optimal Approach To the Multiple-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem With Time Window and Capacity Constraints. *Latin American Applied Research*, 33, 129-134., 129-134.
- GONZÁLEZ, J. (2016). Una metodología de solución para el problema de ruteo de vehículos con demandas estocásticas. *Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Medellín*.
- GOODMAN, R. W. (2005). Whatever You Call It, Just Don't Think of Last-Mile Logistics, Last. *Global Logistics & Supply Chain Strategies*, 2.
- OLIVERA, A. (2001). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. *Reportes Técnicos*, 4-8.
- PÉREZ, J. C. (2016). Metodología para la solución de un problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos, ventanas de tiempo y flota heterogénea. *Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión, Medellín*.
- VILLEGAS, J. G., PALACIO, J. D., & GUTIÉRREZ, V. (2012). Reseña del Software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios. *REVISTA Universidad EAFIT*, 61-70.

