

**Propuesta de ruteo para vehículos de carga en la distribución de productos en la
empresa LA EMPRETRIZ S.A.S.**

Yimmy Esneider Naranjo Cortes
Cristhian Danilo Zamora Fonseca

Universitaria Agustiniana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Industrial
Bogotá D.C
2019

**Propuesta de ruteo para vehículos de carga en la distribución de productos en la
empresa LA EMPRETRIZ S.A.S.**

Yimmy Esneider Naranjo Cortes
Cristhian Danilo Zamora Fonseca

Asesor del proyecto
Msc.Ing. Rodríguez William Camilo

Trabajo de grado para optar al título como profesional en Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Industrial
Bogotá D.C
2019

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	11
1. Planteamiento del problema	12
1.1. Descripción de la empresa.....	12
1.2 Información de la empresa	12
1.3 Descripción de los procesos de distribución actual.....	12
1.4 Rutas actuales.....	17
1.5 Antecedentes del problema	23
1.6 Descripción del problema.....	24
Pregunta de investigación.....	25
Objetivos.....	26
2.2 Objetivo general	26
2.3 Objetivos específicos.....	26
3 Diseño metodológico.....	27
4 Marco teórico	29
4.1 Problema de asignación de rutas	29
4.2 Modelos.....	29
4.3 VRP- modelo general	29
4.4 Tipos de VRP	29

4.5	Métodos de solución a problemas de ruteo	32
5	Definición del modelo de ruteo para la empresa.....	34
6	Estado del arte: solución del CVRP	44
7.	Modelo matemático del CVRP.....	48
7.1	Definición de las variables y parámetros del modelo CVRP	48
7.2	Formulación programación lineal del CVRP	49
8.	Métodos de solución.....	52
8.1	Método de ahorro basado en Matching	52
8.2.	Inserción Secuencial de Mole & Jameson.....	52
9	Algoritmo de solución para el CVRP.....	54
9.1	algoritmo de Clarke & Wright.....	54
9.1	Flujo grama del algoritmo de CLAKE & WRIGHT	56
	Descripción método de solución.....	57
	Mapa consolidado de localización de clientes.....	67
9.3	datos de entrada	68
10	Resultados del modelo de solución	71
10.1	Rutas del modelo.....	72
11-	validación del modelo	74
11.1	Comparación rutas actuales Vs rutas propuestas.....	74

11.2 Comparación de costos nuevas rutas	75
Conclusiones.....	78
Lista de referencias	79
Anexo	82

Lista de tablas

Tabla 1 Frecuencias de entregas por semana. Tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S....	14
Tabla 2 Relación de rutas compartidas y costos mensuales de la operación. Tomado de la empresa LA EMPERATRIZ S.A.S.....	16
Tabla 3 Proporción de costos vs kilómetros recorridos. Tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S.....	22
Tabla 4 Cuadro comparativo características del CVRP. Fuente de elaboración propia.....	34
Tabla 5 Nivel de cumplimiento CVRP. Fuente de elaboración propia	35
Tabla 6 Nivel de cumplimiento FSMVRP. Fuente de elaboración propia.....	36
Tabla 7 Nivel de cumplimiento VRPTW. Fuente de elaboración propia.....	37
Tabla 8 Nivel de cumplimiento MDVRP. Fuente de elaboración propia	38
Tabla 9 Nivel de cumplimiento PVRP. Fuente de elaboración propia.....	38
Tabla 10 Nivel de cumplimiento SDVRP. Fuente de elaboración propia.....	39
Tabla 11 Nivel de cumplimiento SVRP	40
Tabla 12 Nivel de cumplimiento VRPPD	40
Tabla 13 Nivel de cumplimiento VRPB.....	41
Tabla 14 Nivel de cumplimiento MFVRP. Fuente de elaboración propia	42
Tabla 15 Resumen de los niveles de cumplimiento. Fuente de elaboración propia.....	43
Tabla 16 Cálculo de números según el paso 6.....	61
Tabla 17 Matriz de tiempos en minutos. Elaboración propia.....	69
Tabla 18 matriz de distancias en kilómetros	70
Tabla 19 matriz de ahorros. Elaboración propia.....	72
Tabla 20 nuevas rutas propuestas por el modelo.....	73
Tabla 21 comparativo de rutas actuales vs propuestas	74

Tabla 22	costos nuevas rutas	76
Tabla 23	matriz de tiempos completa. Elaboración propia	82
Tabla 24	matriz de distancias. Elaboración propia.....	83
Tabla 25	matriz de ahorros completa. Elaboración propia.....	84

Lista de figuras

Figura 1 logo de la empresa (tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S).....	12
Figura 2 proceso de distribución. Elaboración propia.....	13
Figura 3 ruta Bogotá - La mesa – Anapoima. Producción propia	17
Figura 4 Bogotá - Ubaté – Chiquinquirá. Producción propia.....	17
Figura 5 Bogotá - Paipa – Duitama. Producción propia.....	18
Figura 6 Bogotá - Fusagasugá – Espinal. Producción propia.....	18
Figura 7 Bogotá - Mosquera – Facatativá. Producción propia.....	19
Figura 8 Bogotá – Ibagué. Producción propia.....	19
Figura 9 Bogotá - Girardot – Neiva. Producción propia	19
Figura 10 Bogotá - Dorada - Puerto Boyacá. Producción propia.....	20
Figura 11 Bogotá - Tocancipá – Sogamoso. Producción propia	20
Figura 12 Bogotá - Villavicencio – Acacias. Producción propia	20
Figura 13 Bogotá - Villeta – Honda. Producción propia.....	21
Figura 14 Bogotá - cota - Cajicá – Zipaquirá. Producción propia.....	21
Figura 15 ponderación de los gastos por ruta Producción propia.....	22
Figura 16 producción de alimentos Fuente: calculo Anif con base en DANE.....	24
Figura 17 tomada de la empresa La Emperatriz S.A.S.....	25
Figura 18 Variantes del VRP González, (2006).....	30
Figura 19 Rutas antes de ser combinadas Fuente: Olivera, Alfredo. ruteo de vehículos.	54
Figura 20 Rutas después de ser combinadas Fuente: Olivera, Alfredo. problemas de ruteo de vehículos.....	54
Figura 21 Rutas circulares sin ser combinadas Fuente: Corona León, José Alejandro. a través de programación genética para la resolución de problemas de vehículos. 2005.....	56

Figura 22 Flujo grama Clarke & Wright. Elaboración propia.....	57
Figura 23 matriz de distancias	59
Figura 24cálculo de ahorros	59
Figura 25 datos del cálculo fuente de elaboración propia	60
Figura 26 organización de ahorros de mayor a menor fuente de elaboración propia.....	60
Figura 27 posibles enlaces fuente de elaboración propia	61
Figura 28 Bogotá – Acacias. Producción propia. Figura 29Bogotá - Anapoima Producción propia.....	62
Figura 30Bogotá – Cajicá. Producción propia Figura 31 Bogotá – Chiquinquirá. Producción propia.....	63
Figura 32 Bogotá – Cota. Producción propia Figura 33 Bogotá – Dorada. Producción propia	63
Figura 34 Bogotá – Duitama. Producción propia Figura 35Bogotá – Espinal. Producción propia	63
Figura 36 Bogotá – Girardot. Producción propia Figura37Bogotá–Honda Producción propia	64
Figura 38 Bogotá – Ibagué. Producción propia Figura 39 Bogotá – Ibagué. Producción propia	64
Figura 40 Bogotá – Mosquera. Producción propia Figura 41 Bogotá – Neiva. Producción propia.....	65
Figura 42 Bogotá – Paipa. Producción propia Figura 43 Bogotá - Puerto Boyacá. Producción propia	65
Figura 44 Bogotá – Sogamoso. Producción propia Figura 45. Bogotá – Tocancipá Producción propia.....	65

Figura 46 Bogotá – Tunja Producción propia. Figura 47 Bogotá – Ubaté. Producción propia.	66
Figura 48 Bogotá – Villavicencio. Producción propia. Figura 49 Bogotá – Villeta. Producción propia.....	66
Figura 50 Bogotá – Zipaquirá. Producción propia	66
Figura 51 Mapa general de todos los nodos. Producción propia.....	67
Figura 52 Unión de los nodos. Producción propia	67
Figura 53 Unión de los nodos, nuevas rutas. Producción propia	75
Figura 54 costos por ruta elaboración propia.	75
Figura 55 Comparativo de costos nuevas rutas vs actuales de la empresa.....	77
Figura 56 representación porcentual del ahorro en el año. Fuente de elaboración propia.	77

Introducción

Uno de los principales objetivos de cualquier empresa, es lograr controlar y reducir los costos y gastos, en vista de que nos encontramos en un mercado altamente competitivo, donde los clientes miden el nivel de servicio y lo relacionan con los costos, es por esto que, las empresas deben controlar al detalle, cada peso que sale y buscar siempre la manera de hacerlo mejor y más económico, para no solo brindar, un bien o servicio sino además, con costos que puedan competir en el mercado y garantizar su permanencia en el mismo.

Utilizando herramientas adquiridas en el desarrollo de la carrera de ingeniería industrial, más específicamente, en materias de investigación de operaciones, logística, y costos. Tomando estas herramientas, y aplicándolas en la empresa La Emperatriz S.A.S, la cual produce y comercializa alimentos procesados y utiliza una flota propia, de vehículos para realizar su distribución, la cual cuenta con unos costos de distribución altos, los cuales se quieren mejorar, mediante la implementación de un CVRP (capacitated vehicle routing problema).

El trabajo contiene un modelo de distribución donde el nodo de origen siempre es el mismo ubicado en Bogotá más específicamente en la localidad de Fontibón, desde éste punto se deben desplazar una serie de vehículos para cubrir una demanda de entregas, estas entregas tienen unos costos de desplazamiento, asociados que contemplan, gastos de peajes, combustible, y otros adicionales, que se generan por el rodamiento de los vehículos propios de la empresa el objetivo es optimizar las rutas, de la manera más eficiente, y mediante esto lograr disminuir el costo de la distribución.

Al utilizar este método se buscará la mejor alternativa de solución óptima para poder encaminar a los vehículos por las rutas más viable para lo cual se utilizó un modelo heurístico de Clarke & White el cual se desarrolló en Microsoft Excel, utilizando la herramienta Visual Basic.

Después de validar muchos modelos el CVRP fue escogido para la implementación, ya que cumple con las características de la empresa y restricción de capacidad las cuales están dadas por la empresa y el fabricante del vehículo donde especifica que la capacidad máxima de carga de los vehículos son 5000 kilos, el modelo tendrá en cuenta las demandas de los clientes para poder modelar las mejores alternativas de viaje.

Al desarrollar el modelo y validarlo con los costos actuales de la empresa se pudo evidenciar que el modelo era viable ya que logro realizar una reducción del 5% con relación a los costos actuales de la empresa.

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción de la empresa

La emperatriz S.A.S es una compañía dedicada a la producción de alimentos procesados enfocada en el sector de alimentación escolar, y ofreciendo productos de gran calidad y variedad cumpliendo con las normas técnico sanitarias y reglamentados por los procesos de certificación INVIMA, en Colombia, garantizando a sus clientes los mejores productos, con los más altos estándares de calidad, sabor, y nutrientes que aportar una alimentación adecuada y balanceada. Además de ofrecer productos amigables con el medio ambiente, la empresa lleva desarrollando esta actividad, durante 4 años, tiempo en el cual se han consolidado, en el sector de la alimentación escolar logrando una ampliación a nivel nacional de sus productos y teniendo participación en 8 departamentos del territorio nacional desarrollando vínculos comerciales por medio del SECOP II.

1.2 Información de la empresa

- Nombre: LA EMPERATRIZ S.A.S



Figura 1 logo de la empresa (tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S)

- NIT:901018456-2
- Actividad producción y comercialización de alimentos.

1.3 Descripción de los procesos de distribución actual

LA EMPERATRIZ S.A.S se dedica a la producción de alimentos procesados, los cuales se comercializan y posterior mente se distribuyen en una flota de vehículos propios, la cual está compuesta por 8 automotores, cada uno con la misma capacidad de 5 toneladas y volumen de 28 metros cuadrados, para realizar la distribución de los productos en los diferentes destinos donde tienen inferencia, estos vehículos son camiones tipo NPR, los cuales cuentan con equipos de frio.

Para desarrollar las entregas cada vehículo cuenta con un conductor y un auxiliar los cuales laboran en un horario de lunes a sábado, y en estas jornadas de trabajo los conductores y auxiliares

deben realizar tres recorridos a los diferentes puntos de entrega. Los vehículos realizan cargue el primer día de la semana es decir el día lunes sin importar si es festivo, las rutas están compuestas, por una gran variedad de productos por lo cual los conductores, deben cargar muy ordenadamente vasados en una guía entregada por la empresa que lleva el detallado de los refrigerios que se deben entregar para cada punto, posterior al alistamiento y cargue, los vehículos ingresan a un parqueadero y al día siguiente salen a las horas de la mañana, cada conductor sale, entre las 3 y 4 de la madrugada, posterior a la entrega se repite el mismo procedimiento para realizar cargues los días miércoles y viernes. La empresa realizó una serie de pruebas para determinar cuáles son los gastos de los vehículos desde la bodega principal a todos los clientes, en los gastos se contempla el consumo de combustible y los peajes y gastos del conductor, a cada uno de los puntos donde se realizan entregas.

Representación gráfica del proceso de distribución actual de la compañía

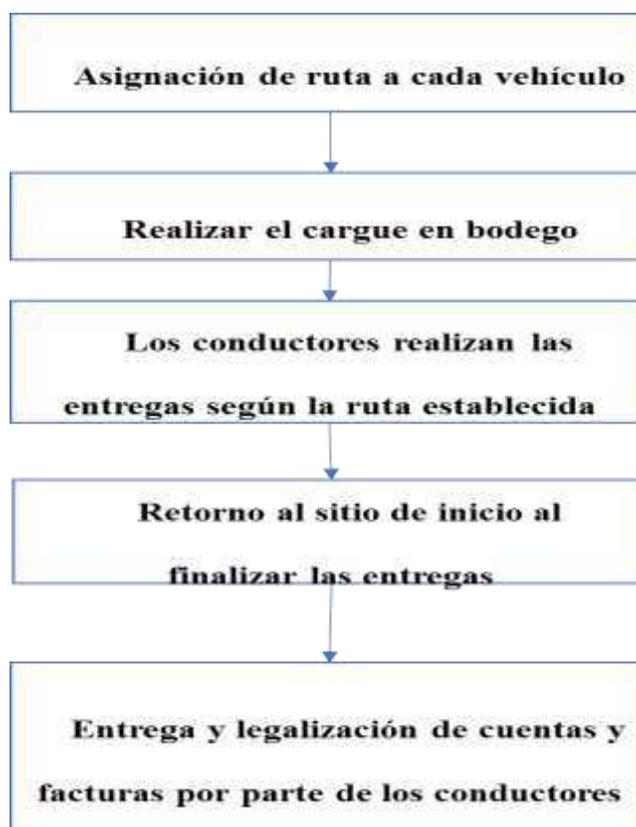


Figura 2 proceso de distribución. Elaboración propia

La empresa realiza dos entregas por semana para todos los clientes, las entregas no requieren un día en específico, pero sí que las entregas se realicen fraccionadas ya que al ser centros educativos no cuentan con una capacidad de almacenamiento que les permita recibir todo en una sola entrega, sin contar que en las entregas hay alimentos precederos, la tabla presentada a continuación muestra las frecuencias de entregas, que debe realizar, al igual que el peso aproximado que se entrega en un viaje por cada vehículo, a cada uno de los clientes, la información relacionada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1

Frecuencias de entregas por semana. Tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S

RUTA	ORIGEN	DESTINO	ENTREGAS	GASTOS	Kls por viaje
1	BOGOTA	ACACIAS	2	\$ 290.000	1730
2	BOGOTA	ANAPOIMA	2	\$ 86.000	1.400
3	BOGOTA	CAJICA	2	\$ 50.000	3.600
4	BOGOTA	CHIQUINQUIRA	2	\$ 120.000	1.300
5	BOGOTA	COTA	2	\$ 40.000	2.100
6	BOGOTA	DORADA	2	\$ 300.000	2.075
7	BOGOTA	DUITAMA	2	\$ 230.000	2.370
8	BOGOTA	ESPINAL	2	\$ 170.000	1.925
9	BOGOTA	FACATATIVA	2	\$ 60.000	765
10	BOGOTA	FUSAGASUGA	2	\$ 80.000	1.350
11	BOGOTA	GIRARDOT	2	\$ 200.000	1.950
12	BOGOTA	HONDA	2	\$ 165.000	1.650
13	BOGOTA	IBAGUE	2	\$ 350.000	1.400
14	BOGOTA	LA MESA	2	\$ 75.000	1.400
15	BOGOTA	MOSQUERA	2	\$ 50.000	3.600
16	BOGOTA	NEIVA	2	\$ 350.000	1.300
17	BOGOTA	PAIPA	2	\$ 210.000	2.100
18	BOGOTA	PUERTO BOYACA	2	\$ 380.000	2.075
19	BOGOTA	SOGAMOSO	2	\$ 320.000	2.370

20	BOGOTA	TOCANCIPA	2	\$ 50.000	1.925
21	BOGOTA	TUNJA	2	\$ 160.000	1.350
22	BOGOTA	UBATE	2	\$ 100.000	1.950
23	BOGOTA	VILLAVICENCIO	2	\$ 290.000	1.650
24	BOGOTA	VILLETA	2	\$ 170.000	1.400
25	BOGOTA	ZIPAQUIRA	2	\$ 50.000	1.400

La empresa realiza unas entregas compartidas para optimizar los recursos de vehículos disponibles y lograr una reducción en los costos de distribución, las entregas unificadas por lo general, son rutas que facilitan la entrega sin que se incrementen los gastos de desplazamiento, que la empresa ya tiene establecidos ya que los destinos, donde realiza los desplazamientos por lo general son puntos por donde debe pasar el vehículo para llegar al cliente final es decir la ruta cumple una secuencia establecida, que evita que conductor se tenga que desviar más de 10 kilómetros, esto permite que los vehículos entreguen la mercancía sin generar incumplimiento en las entregas, todas las rutas son diseñadas para que se culminen en el mismo día, en la tabla presentada a continuación se pueden evidenciar las rutas que la empresa desarrolla, así como también los gastos mensuales promedio, empleados para realizar la distribución de sus productos al cliente.

Tabla 2

Relación de rutas compartidas y costos mensuales de la operación. Tomado de la empresa LA EMPERATRIZ S.A.S

	ORIGEN	DESTINO	ENTREGAS	GASTOS	PESOXRUTA	VALOR SEMANAL	VALOR MENSUAL	
1	BOGOTA	ANAPOIMA LA MESA	2	\$ 86.000	2.800	\$ 172.000	\$ 688.000	
2	BOGOTA	CHIQUEQUIRA UBATE	2	\$ 120.000	3.250	\$ 240.000	\$ 960.000	
3	BOGOTA	DUITAMA PAIPA	2	\$ 230.000	4.470	\$ 460.000	\$ 1.840.000	
4	BOGOTA	ESPINAL FUSAGASUGA	2	\$ 170.000	3.720	\$ 340.000	\$ 1.360.000	
5	BOGOTA	FACATATIVA MOSQUERA	2	\$ 60.000	4.365	\$ 120.000	\$ 480.000	
6	BOGOTA	IBAGUE	2	\$ 350.000	2.800	\$ 700.000	\$ 2.800.000	
7	BOGOTA	NEIVA GIRARDOT	2	\$ 350.000	3.250	\$ 700.000	\$ 2.800.000	
8	BOGOTA	PUERTO BOYACA DORADA	2	\$ 380.000	4.150	\$ 760.000	\$ 3.040.000	
9	BOGOTA	SOGAMOSO TUNJA TOCANCIPA	2	\$ 320.000	4.980	\$ 640.000	\$ 2.560.000	
10	BOGOTA	VILLAVICENCIO ACACIAS	2	\$ 325.000	3.380	\$ 650.000	\$ 2.600.000	
11	BOGOTA	HONDA VILLETA	2	\$ 170.000	3.050	\$ 340.000	\$ 1.360.000	
12	BOGOTA	ZIQUAIRA CAJICA COTA	2	\$ 50.000	4.960	\$ 100.000	\$ 400.000	
						TOTAL	\$ 5.222.000	\$ 20.888.000

1.4 Rutas actuales

Para determinar, cuales el tiempo promedio y la distancia, se desarrolló una representación gráfica de las rutas que realiza la empresa en la actualidad de manera compartida, desde la bodega a cada uno de los clientes, adicional al tiempo de desplazamiento que presenta la gráfica se debe contemplar, el tiempo que tarda un cliente en recibir, el pedido que basado en los datos históricos de la empresa es de 60 minutos.

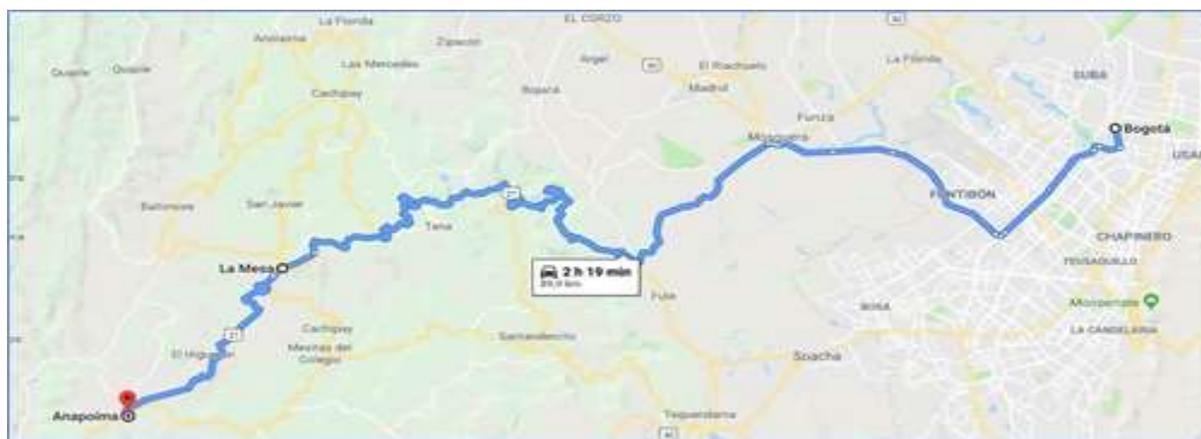


Figura 3 ruta Bogotá - La mesa – Anapoima. Producción propia

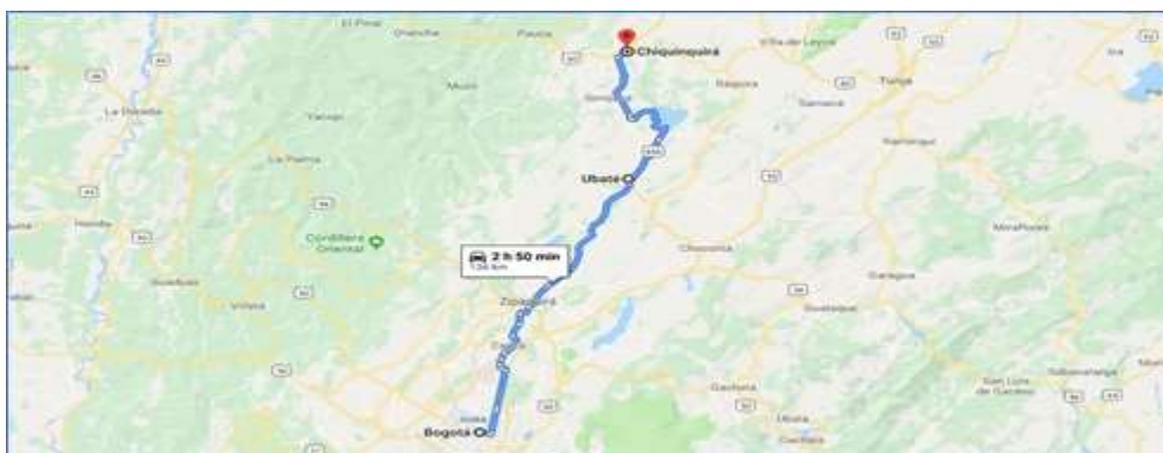


Figura 4 Bogotá - Ubaté – Chiquinquirá. Producción propia

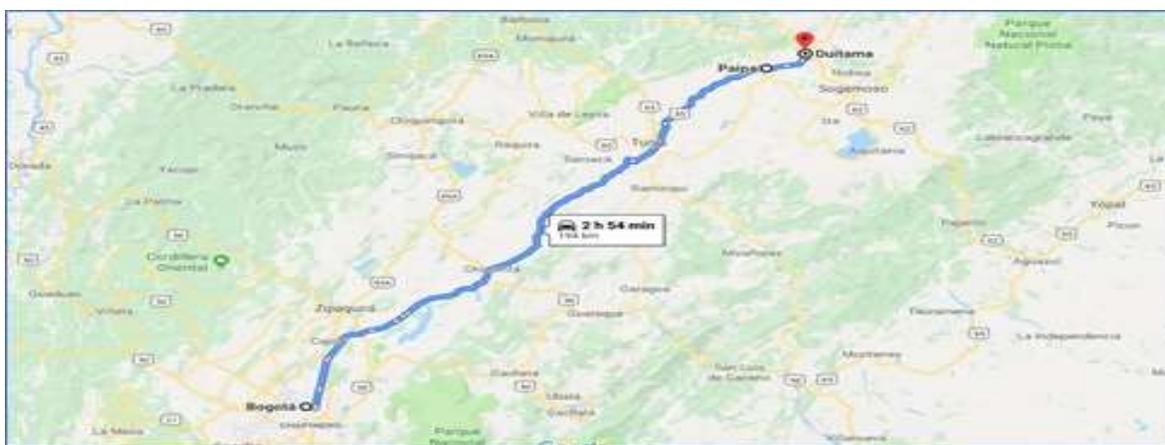


Figura 5 Bogotá - Paipa – Duitama. Producción propia

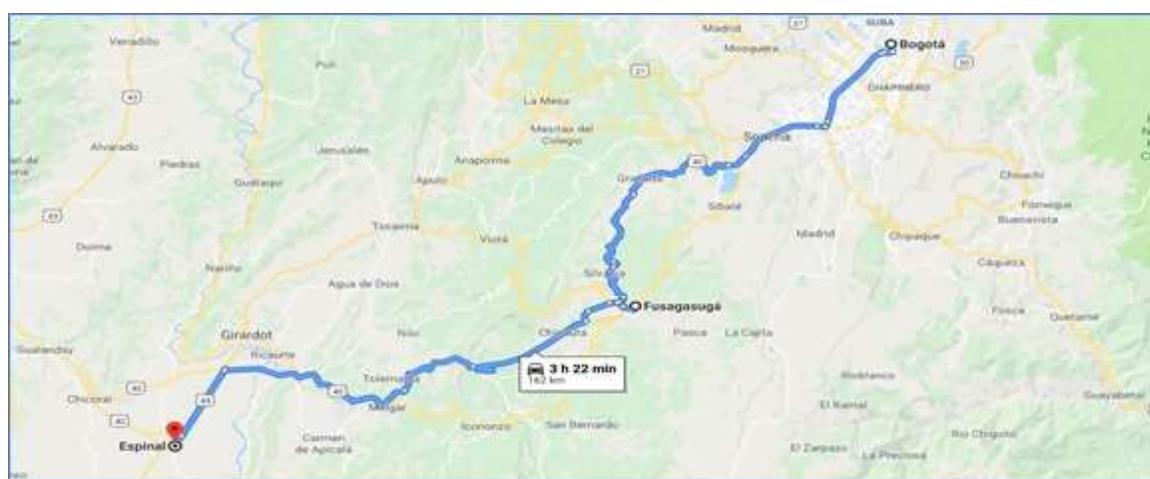


Figura 6 Bogotá - Fusagasugá – Espinal. Producción propia

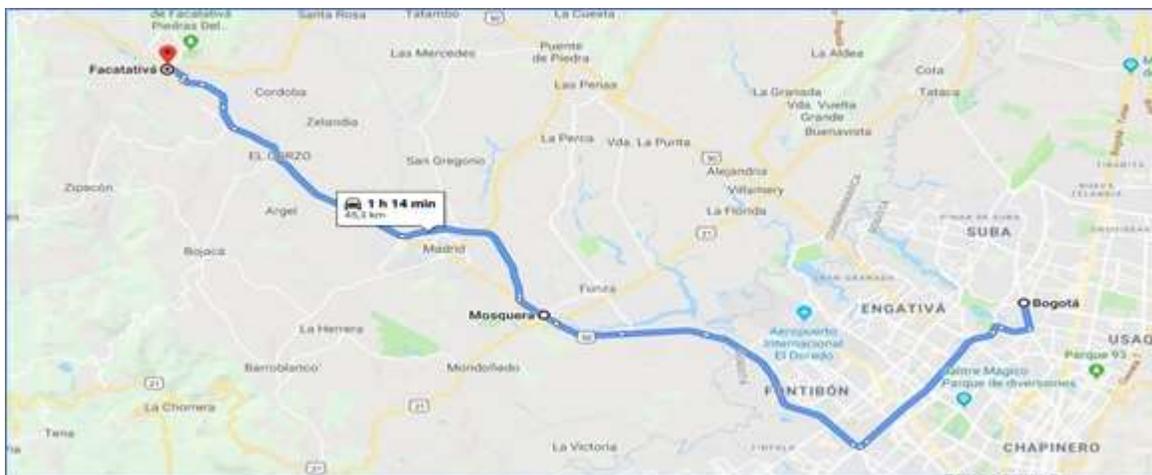


Figura 7 Bogotá - Mosquera – Facatativá. Producción propia

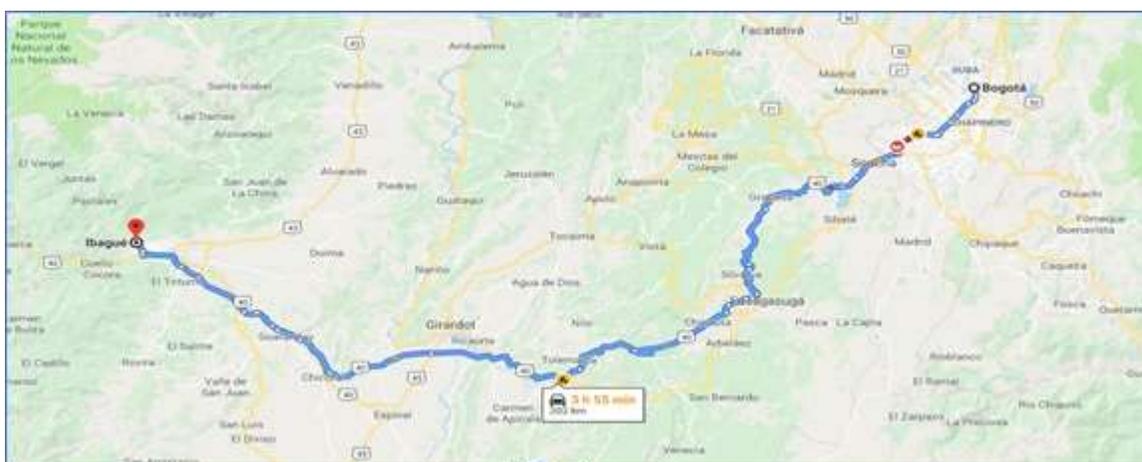


Figura 8 Bogotá – Ibagué. Producción propia

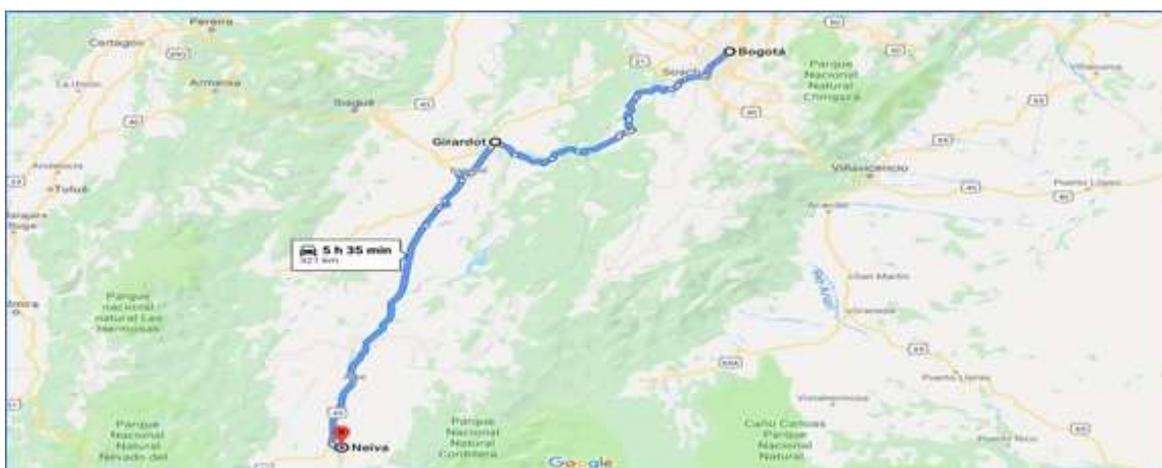


Figura 9 Bogotá - Girardot – Neiva. Producción propia

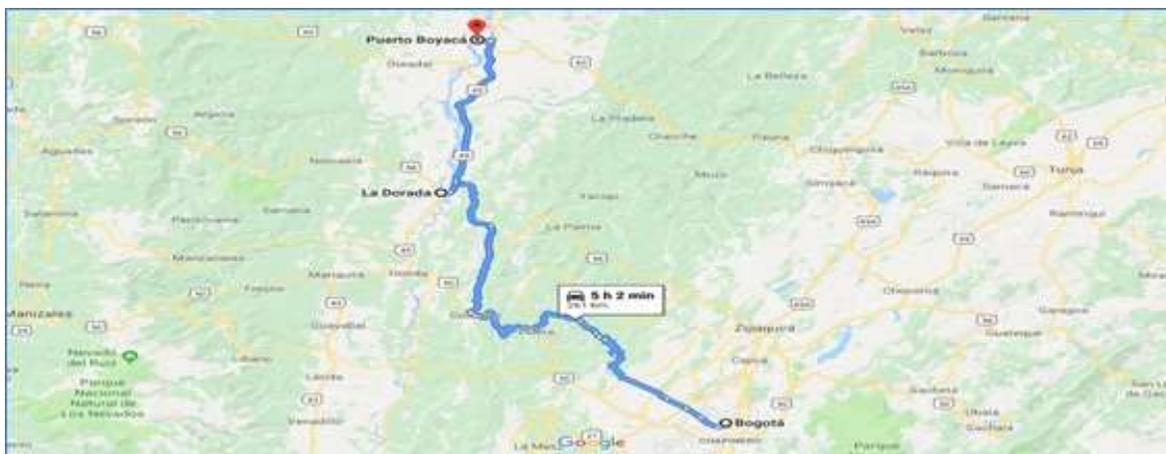


Figura 10 Bogotá - Dorada - Puerto Boyacá. Producción propia

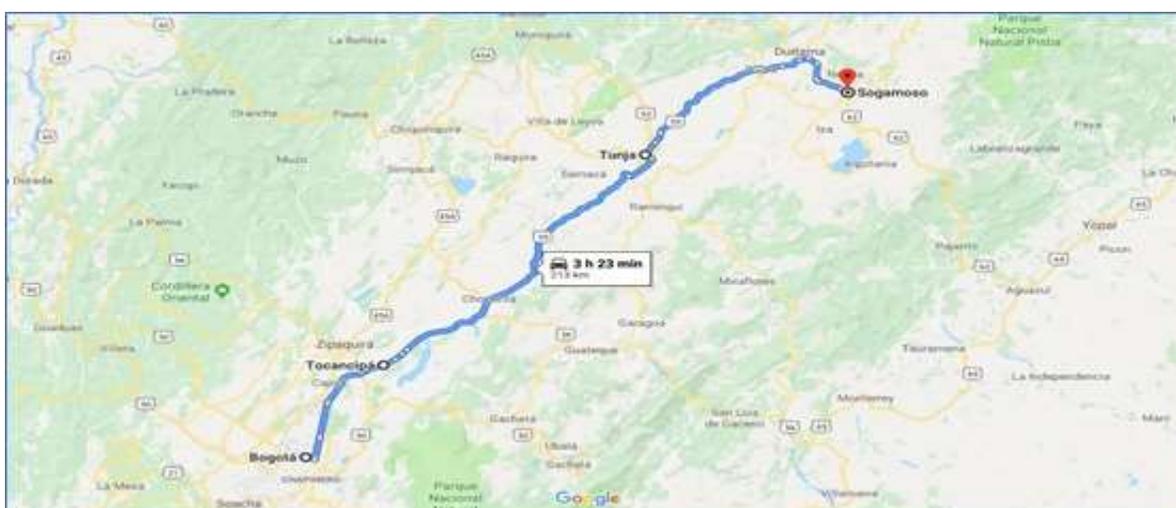


Figura 11 Bogotá - Tocancipá – Sogamoso. Producción propia

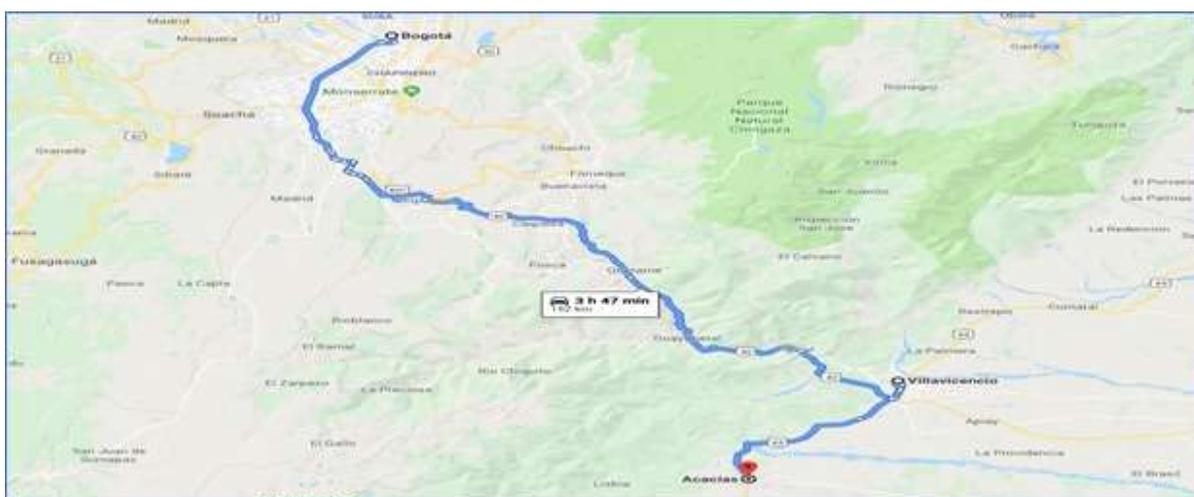


Figura 12 Bogotá - Villavieco – Acacias. Producción propia

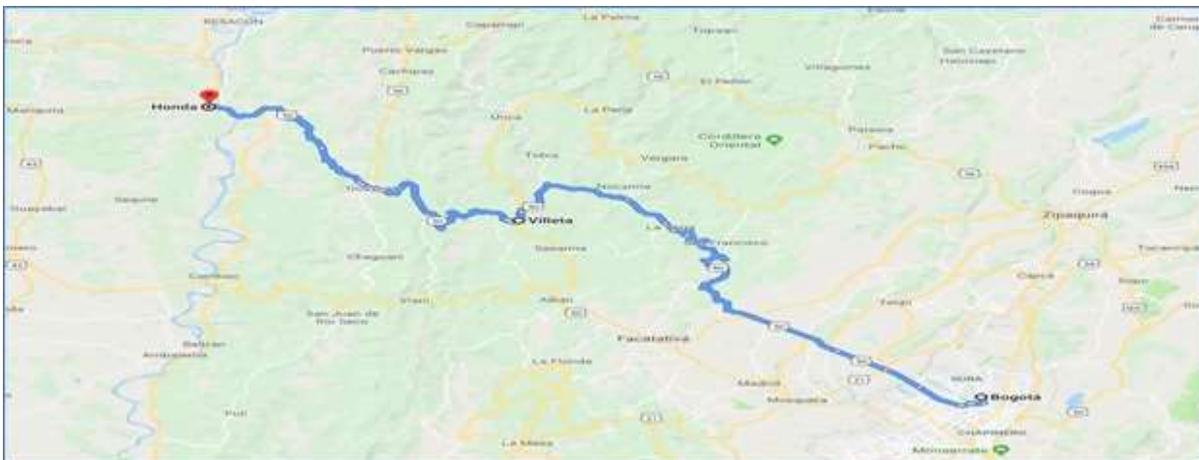


Figura 13 Bogotá - Villeta – Honda. Producción propia

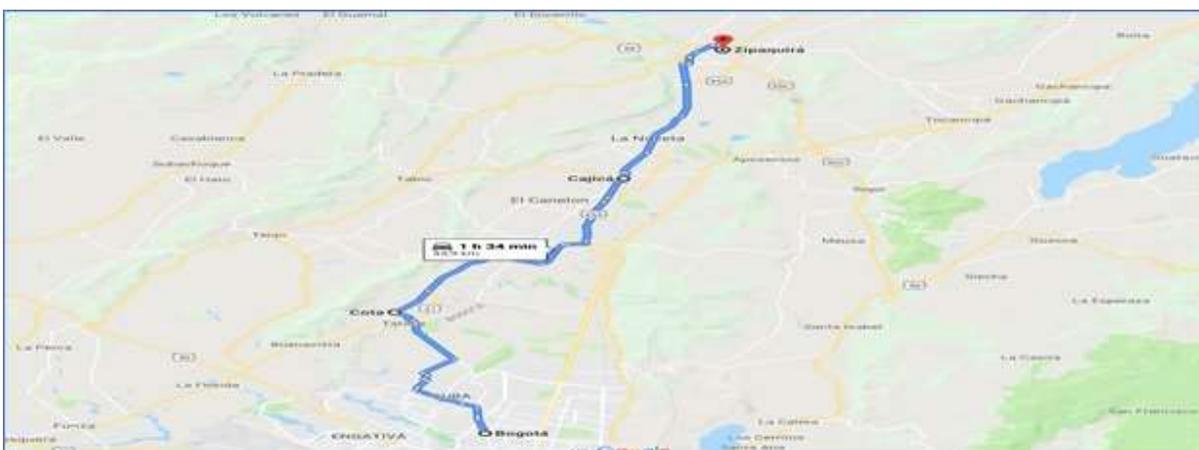


Figura 14 Bogotá - cota - Cajicá – Zipaquirá. Producción propia

Los costos de las rutas presentan una variación según la distancia y la cantidad de peajes, algunas de las rutas tienen unos costos altos con respecto a las otras como lo muestra a grafica presentada



Figura 15 ponderación de los gastos por ruta Producción propia.

Los costos asociados a la distribución, tienen unos valores porcentuales, mediante los cuales se puede evidenciar, que existen costos de entrega, son muy altos con relación a los costos totales de distribución, como se evidencia en la siguiente gráfica, donde podemos observar que los costos que se encuentra en el promedio son de color rojo, y los costos que presentan mayor valor para la empresa son de color verde, a mayor intensidad mayor es el costo.

Tabla 3

Proporción de costos vs kilómetros recorridos. Tomado de la empresa La Emperatriz S.A.S

ORIGEN	DESTINO	GASTOS	KILOMETROS	%COMPOSICIÓN
BOGOTA	ACACIAS	\$290.00	143	6.7%
BOGOTA	ANAPOIMA	\$86.00	79.5	2.0%
BOGOTA	CAJICA	\$50.00	43	1.2%
BOGOTA	CHIQUINQUIRA	\$120.00	138	2.8%
BOGOTA	COTA	\$40.00	20.8	0.9%
BOGOTA	DORADA	\$300.00	193	6.9%

BOGOTA	DUITAMA	\$230.00	206	5.3%
BOGOTA	ESPINAL	\$170.00	149	3.9%
BOGOTA	FACATATIVA	\$60.00	52	1.4%
BOGOTA	FUSAGASUGA	\$80.00	71	1.8%
BOGOTA	GIRARDOT	\$200.00	145	4.6%
BOGOTA	HONDA	\$165.00	159	3.8%
BOGOTA	IBAGUE	\$350.00	204	8.1%
BOGOTA	LA MESA	\$75.00	62	1.7%
BOGOTA	MOSQUERA	\$50.00	15.2	1.2%
BOGOTA	NEIVA	\$350.00	320	8.1%
BOGOTA	PAIPA	\$210.00	193	4.8%
BOGOTA	PUERTO BOYACA	\$380.00	244	8.7%
BOGOTA	SOGAMOSO	\$320.00	221	7.4%
BOGOTA	TOCANCIPA	\$50.00	49	1.2%
BOGOTA	TUNJA	\$160.00	147	3.7%
BOGOTA	UBATE	\$100.00	94	2.3%
BOGOTA	VILLAVICENCIO	\$290.00	117	6.7%
BOGOTA	VILLETA	\$170.00	92	3.9%
BOGOTA	ZIPAQUIRA	\$50.00	52	1.2%
	PROMEDIO	\$173.84	\$128.38	100%

Desarrollando un promedio general se puede analizar que costo promedio de consumo por kilómetro para cualquiera de las rutas es de \$1.35 pesos moneda corriente en Colombia.

1.5 Antecedentes del problema

Durante los años 2016 y 2017 la industria de alimentos y bebidas en Colombia presento una disminución del -3% según cifras del DANE, y para el año 2018 presento una recuperación del 3% siendo uno de los subsectores industriales más dinámicos. Gran parte de este problema de disminución se enfoca en el fenómeno del niño- niña y las afectaciones climáticas que este presenta.

Sin embargo después de este fenómeno climático la encuesta mensual manufacturera del sector de alimentos-bebidas viene realizando un crecimiento real anual del 2.9% según cifras del DANE versus el decreciente ritmo que presento en los años anteriores, lo cual ha hecho que, los inversionistas, miren el sector de alimentos-bebidas como uno de los más atractivos a la hora de realizar una inversión esto a su vez hace que este mercado sea mucho más, competitivo, al ingresar nuevos competidores al mercado. La grafica muestra el crecimiento en producción industrial de

alimentos y bebidas versus el comportamiento estimado de la industria en la gráfica se puede evidenciar que, presento un incremento del 0.4% más de lo que se había estimado.



Figura 16 producción de alimentos Fuente: calculo Anif con base en DANE

El mercado de alimentos cada vez tiene más competencia según los indicadores de la cámara de comercio para el primer semestre del año 2018 se crearon 78.762 nuevas empresas y establecimientos comerciales de los cuales el 62% son empresas con 48.883, y de estas el 9.3% son empresas que desarrollan actividades relacionadas con alimentación (cámara de comercio de Bogotá, registro cerro primer semestre del año 2018).

Por lo tanto, la innovación y costos más bajos, son fundamentales para lograr ser competitivos en el mercado, y lograr cautivar a los clientes con las propuestas que ofrezcan mayores beneficios a menor costo.

1.6 Descripción del problema

La empresa LA EMPERETRIZ S.A.S actualmente tiene unos gastos establecidos para la distribución y logística, adicional a los gastos que conlleva tener, vehículos propios como mantenimientos preventivos, y correctivos como también la documentación de cada vehículo, (seguro obligatorio soat, revisión técnica y de gases) para su funcionamiento. Los vehículos de la compañía realizan entregas en 26 puntos a nivel nacional y realizar esta operación, a la empresa le representa el 6,5% de los costos totales del funcionamiento de la compañía a continuación se presenta el costo detallado de cada área de la empresa.

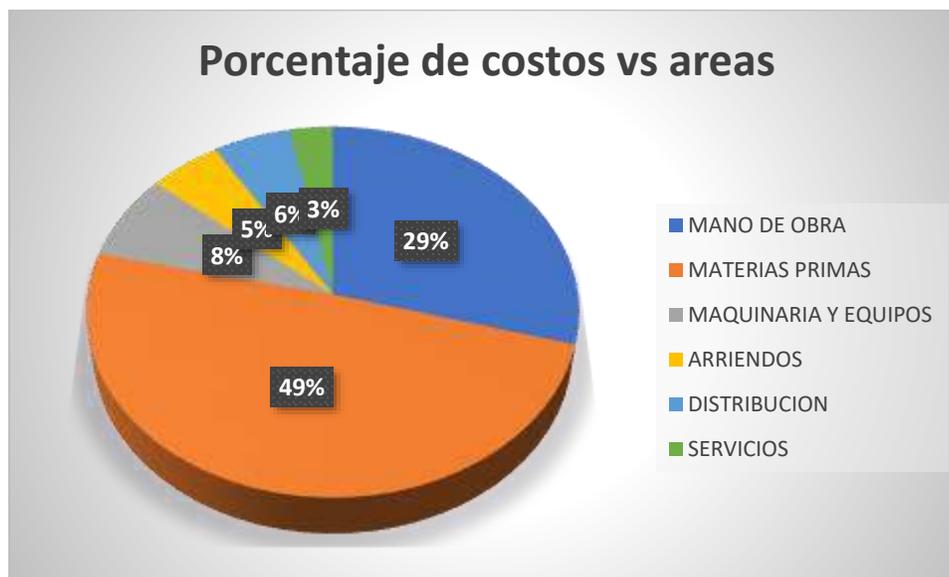


Figura 17 tomada de la empresa La Emperatriz S.A.S

Como se puede observar el costo de transporte es alto con relaciona las demás áreas de la compañía según un informe de FEDESARROLLO presentado en el 2014 los costos de distribución para las compañías dedicas al sector de alimentos, víveres y abarrotes no deben superar el 1.5%, lo cual si comparamos con los resultados actuales de la empresa está muy por encima es por esto que, se quiere buscar una opción para lograr mejorar esta distribución.

Pregunta de investigación

¿Es factible encontrar un diseño de rutas que logre optimizar los recursos actuales de la distribución, por medio de la aplicación de un modelo de ruteo de vehículos CVRP?

Objetivos

2.2 Objetivo general

Aplicar un modelo de ruteo de vehículos que permita la optimización de los costos asociados al proceso de distribución en la empresa LA EMPERATRIZ S.A.S.

2.3 Objetivos específicos

- ✓ Determinar el modelo de ruteo de vehículos adecuado para el proceso de distribución de la empresa.
- ✓ Seleccionar el modelo matemático de ruteo que permita modelar el proceso de distribución.
- ✓ Solucionar el modelo matemático del CVRP
- ✓ Validar los resultados del modelo.

3 Diseño metodológico

Para lograr desarrollar el objetivo planteado se debe identificar y estudiar los diferentes tipos de ruteo de vehículos, y las posibles técnicas para llegar, a encontrar una solución al problema planteado, existen una serie de pasos que se van a desarrollar para obtener la solución del modelo matemático, donde inicialmente se realiza una validación de los modelos planteados en el estado del arte, seguido a esto se desarrollara y se implementara, la metodología de solución, y para terminar se realizara la verificación de los resultados. Para lograr desarrollar este modelo es muy importante determinar el método más acorde para el desarrollo de la investigación, que garantice la solución del modelo.

Para desarrollar este trabajo el método de investigación más factible es el experimental ya que el trabajo es un modelo de ruteo de vehículos el cual está sujeto a unas capacidades de los vehículos, la solución que se quiere lograr, es un modelo que, sea aplicable, no solo para las rutas actuales de la empresa sino que permita, al momento de implementar nuevas rutas, con el simple hecho de ingresar las rutas, las capacidades, y las distancias el modelo replante la solución y genere siempre la solución óptima o las ruta más viables para cada vehículo. Para cumplir con este objetivo se deben generar varias pruebas y validar la solución encontrada, con el fin de identificar si la metodología que se aplico fue la más óptima y presenta resultados, con costos menores a los de la distribución actual.

La metodología planteada se desarrolló en 6 fases las cuales se describen a continuación.

FASE I: Identificación del problema

- Argumento del problema
- Identificación del objetivo

FASE II: Determinación del modelo matemático

- Identificación del modelo matemático aplicable a la solución.
- Definir las variables y los parámetros.
- Plantear la función objetivo.

- Desarrollar y plantear las restricciones.
- Aplicar los algoritmos que lleven a la solución del problema.

FASE III: A partir del modelo determinar la solución factible.

- Validar los resultados del modelo

FASE IV: Prueba del modelo de solución.

- Analizar que cada una de las restricciones se esté cumpliendo
- Probar las restricciones remplazando unas rutas en el modelo
- Realizar las modificaciones en caso de existir algún error

FASE V: Evaluar los resultados obtenidos

- Comparar la solución actual con los resultados del modelo.

4 Marco teórico

4.1 Problema de asignación de rutas

El problema principal para desarrollar un modelo de asignación de rutas comprende un centro de despachos con un número de vehículos, para desarrollar la entrega a los clientes, con una cantidad de demanda específica para cada uno. El objetivo principal es plantear un modelo que minimice la distancia total recorrida de los vehículos (la cual, a su vez, generara una disminución porcentual, en los costos). A continuación, se presenta una descripción detallada de los elementos teóricos que, ayudaran con el desarrollo del problema.

4.2 Modelos

Para implementar un modelo de ruteo de vehículos se debe contar con un punto de inicio, adicional se debe conocer todos los nodos y la ubicación donde se realiza la ruta, es decir el cliente destino, para establecer el punto principal se ubicaban puntos estratégicos logísticos,

4.3 VRP- modelo general

El ruteo de vehículos o problema de enrutamiento (VRP, vehicle routing problem) data del año de 1959 y fue introducido por Dantzig y Ramser (2009), los cuales desarrollaron una aplicación para realizar la entrega de combustible a las estaciones de venta de combustible y plantearon una formulación matemática. Cinco años después, Clarke y Wright propusieron el primer modelo que resultó seguro para resolverlo. Y gracias a esto se logró desarrollar e implementar lo que hoy en día se conoce como modelo de ruteo de vehículos.

El problema se puede interpretar como la relación de dos problemas relacionados con optimización combinatoria. El primero, el del agente viajero (TSP, traveling salesman problem) considerando la capacidad de cada vehículo como infinita Applegate, (2006) y el de empaquetamiento en compartimentos BPP, bin packing problema; Martello y Toth, (1990).

4.4 Tipos de VRP

En la actualidad existen gran cantidad de modelos variantes, que llevan a un VRP diseñando con características y restricciones, que se llaman atributos. Los atributos ayudan a capturar y determinar un numero de detalles, que logran enfocar el problema a una solución más específica con las características planteadas. Como base del sistema como lo son (vehículos disponibles, las bodegas o depósitos), y por otra parte los requerimientos de los clientes (visitas multideposito,

ventanas de tiempo) adicional también las variables de operación de los vehículos (lugar de carga, distancia, tiempo total, restricciones de rutas) y los contextos para la decisión (planeación sobre horizontes de tiempo ampliados, y congestiones vehiculares), (Gendreau, 2012).

En los diferentes atributos y restricciones pueden formar un grupo con los modelos más comunes de los cuales se pueden resaltar los ocho más utilizados y conocidos, los cuales al dar a conocer sus características pueden dar lugar a un sin número de posibles VRP. Una forma gráfica de representarlos es la siguiente planteada por González et al, (2006).

Variantes del VRP González, (2006).

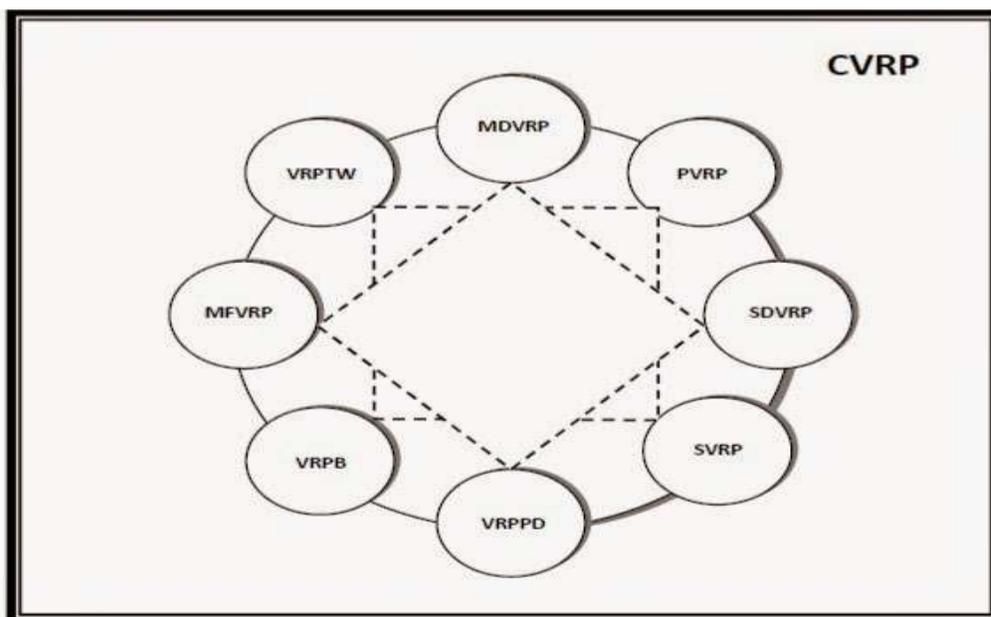


Figura 18 Variantes del VRP González, (2006)

- **CVRP (Capacidad VRP):** es el modelo más general de los VRP y se basa en uno o muchos vehículos los cuales están sujetos a una capacidad específica o limitada que también debe ser constante, encargados de distribuir a los clientes una demanda determinada. La optimización de este problema es de tipo NP-Hard, y se mezcla con herramientas y características de un (BPP) (Bin Packing Problem), con el propósito de distribuir la carga, a los vehículos asignados al problema, el cual a su vez está basado en (TSP) (traveling agent problema), el cual busca generar la mejor ruta para cada uno de los vehículos. (Jansen, 1993; Shaw, 1998; Prins, 2004; Toth y Tramontani, 2008).

- **PVRP (periodic VRP):** Este modelo plantea un horizonte de operaciones de M días, periodo en el cual cada uno de los clientes debe ser visitado una vez, Drummond, L. et al. 2001; Francis, P. et al. 2006; Alonso, F. et al. 2007; Hemmelmayr, V. et al. 2009.
- **MDVRP (múltiples depósitos VRP)** el modelo de múltiples depósitos es un tipo de ruteo de vehículos en el cual existen varios puntos de inicio o depósitos (los cuales cuentan con una flota de vehículos asignada a cada depósito), en este modelo cualquier depósito debe, cubrir la demanda de los clientes (Renalud, 1996; Wu T-H, 2002; Crevier, 2007; Ho, W. 2008).
- **SDVRP (Split Delivery VRP):** también se conoce como el VRP de entradas divididas, en el cual los clientes van a recibir sus entregas en diferentes vehículos, pero basado en una restricción donde la condición sería que el costo de distribución sea menor que recibirlo con uno solo, lo cual es importante si el tamaño de los pedidos supera la capacidad de los vehículos. (Belenhguer, 2000; Hertz, 2006; Chen, 2007; Jin, 2007).
- **VRPPD (VRP Pickup and Delivery):** Este modelo también llamado VRP con recogidas y entregas, en este se plantea la posibilidad de que los clientes, puedan retornar algún material o bien, por tanto, se debe tener presente que el volumen de la devolución no supere la capacidad del vehículo. Esta restricción dificulta el esquema de planeación, ya que puede generar errores en la utilización de las capacidades, en los vehículos, puede incrementar las distancias recorridas, ya que cabe la posibilidad de que deba desplazarse a otro cliente para la recogida, o pueda generar la utilización de un mayor número de vehículos. (Detlhoff, Jhan 2001; Montané, 2006; Bianchessi, 2007; Kachivtichyanukul, 2009).
- **SVRP (Stochastic VRP):** el modelo plantea un VRP en el que uno o varios componentes son aleatorios, pueden ser los clientes, las demandas, tiempos, o capacidades, son las más comunes en este tipo de problemas. (Dron, 1986; Betrismas, 1991; Gendreau, 1996; Laporte, 2002).
- **MFVRP (Mixed Fleet VRP):** Este modelo de VRP plantea un problema en el cual los vehículos tienen distintas capacidades, o capacidades heterogéneas, lo que hace evaluar estas demandas de pesos y volumen en las rutas que seguirá cada uno de los recursos, ya que los vehículos de mayor capacidad, deberán realizar recorridos más largos, o en su defecto pedidos con más alto nivel de demanda. (Gendreau, 1999; Tharantils, 2004; Choi, 2007; Golden, 2007).

- **VRPB** (VRP with Backhauls): tiene gran relación con el VRPPD, solo que en este hay una restricción particular, y es que antes de realizar las recogidas debe realizar, todas las entregas, esta restricción parte del hecho de que en algunos casos los vehículos salen cargados en su totalidad, y al momento de realizar las recogidas, puede no tener el espacio físico para realizarlo por lo cual se plantea una reasignación de ruta donde al finalizar las entregas deba, realizar una ruta solo para cumplir con las recogidas. (Toht y Vigho 1997; Mingozi, 1999; Ozman, 2002; Brandão, 2006).
- **VRPTW** (VRP with Time Windows) también llamado VRP con ventanas de tiempo, en este la restricción, que se plantea es que el cliente solo está dispuesto a recibir los pedidos en un intervalo de tiempo determinado.

4.5 Métodos de solución a problemas de ruteo

Para lograr interpretar mejor las técnicas de solución existentes tanto por aproximación o de forma exacta se utilizarán heurísticas y metaheurísticas, para lo cual se presentan elementos relevantes, basados en la historia de estos problemas, y su complejidad computacional, para finalmente poder encontrar una técnica que permita, dar una respuesta, concreta y eficaz en la solución de VRP.

Según la tesis de (Piqueras, 2002), se indica como Jordán, Minkowsky, Farkas, Erlang y otros en los inicios del siglo XIX usan modelos lineales de investigación de operaciones para mejorar la eficiencia, rendimiento y las operaciones industriales y logísticas, Los primeros modelos de programación lineal matemática se muestran en economía debidos a Quesnay (siglo XVIII) y Walras (siglo XIX), los cuales a su vez también fueron mejorados por autores como (Von Neumann; Kantorovich y Dantzig, 2002). Fundamentando en la construcción de modelos reales, y los ajustes mediante datos experimentales para efectuar cambios y predecir comportamientos posteriores.

Algoritmos de solución exactos

Analizando un planteamiento realizado por Gendreau y Potvin (2008), se puede determinar que los métodos exactos, para problemas de ruteo de vehículos son eficientes, para problemas con pocos clientes, en el artículo mencionado anteriormente se utiliza un VRP con ventanas de tiempo, dado el tamaño del problema, donde el principal problema es el retraso de las entregas a los diferentes clientes, para lo cual afirma en sus conclusiones, que los métodos clásicos de

programación lineal entera, puede solucionar el forma espontánea casos hasta con 25 clientes, y con un máximo de 50 clientes, debido a las restricciones, del tiempo computacional.

Este tipo de algoritmos generan una solución óptima con un tiempo computacional muy alto, el cual se puede dividir en tres partes: programación dinámica, búsqueda directa de árbol, programación lineal y entera, entre los más destacados están los algoritmos de ramificación y acotación “Branch & Bound”, del plano de corte o las técnicas de programación dinámica.

Algoritmos de solución aproximados

En los modelos donde la cantidad de combinaciones de un problema genera muchas variables es decir son demasiado altas las posibles combinaciones problema es demasiado alta, el tiempo de proceso de un ordenador es demasiado alto, por ejemplo si tenemos el problema del agente viajero que debe visitar 25 puntos, entonces se define así $25!/2$ combinaciones lo que da como resultado un número de 7.76×10^{22} que es un valor grande de posibilidades para una serie relativamente pequeño de puntos a visitar, además que el crecimiento de las combinaciones es de tipo exponencial, por esto en varios de los problemas reales se convierte, imposible usar métodos exactos para encontrar la solución óptima incluso para los procesadores de alto rendimiento. Un ejemplo de la clasificación de este tipo de problemas combinatoria les y de solución no polinómica se muestra en la página 7 del libro “Técnicas metaheurísticas de optimización (Gallego A, 2015).

Sin embargo, se debe solucionar un problema sin importar el nivel de dificultad,

5 Definición del modelo de ruteo para la empresa

Como se mencionó en el marco teórico, existen varios tipos de modelos para la optimización de rutas de transporte. En la primera tabla; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se realizó un análisis comparativo entre el modelo CVRP y las características del proceso de distribución de la empresa. Finalmente, el CVRP es la propuesta más acertada para este tipo de problema que posee la empresa La Emperatriz.

Evaluando todas las características del modelo y comparándolas.

Tabla 4

Cuadro comparativo características del CVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO CVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	Todos los pedidos que programan los clientes son conocidos con anterioridad.
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	Los vehículos salen del depósito en Bogotá hacia los clientes y vuelven a la bodega en Bogotá.
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	Todos los carros que salen hacia los clientes entregan la carga una sola vez.
La capacidad es limitada e igual para todos	La flota de vehículos tiene la misma capacidad
Existe un solo deposito	La compañía posee un solo almacén donde se carga la mercancía en la ciudad de Bogotá.
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	Posee un listado de clientes en diferentes zonas geográficas.
La demanda de los clientes no debe sobrepasar la capacidad de los móviles	Los pedidos de los clientes son limitados y no sobre pasan la carga máxima de los vehículos.
Problema de optimización Np- Hard, que cuenta con uno o varios vehículos	La empresa cuenta con ocho (8) vehículos para el transporte de la mercancía.
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	El objetivo es optimizar los costos de las rutas propuestas.

La suma de las demandas en la ruta no puede ser mayor a la capacidad de los vehículos	Las demandas de esos clientes no sobrepasan la capacidad de la ruta.
El modelo asigna las cargas a los vehículos con la mayoría de clientes posibles sin violar las restricciones de capacidad	Por políticas de la empresa ningún vehículo puede transitar con cargas excesivas a su capacidad

En la tabla 5 se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 5

Nivel de cumplimiento CVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO CVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	1
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existe un solo deposito	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
La demanda de los clientes no debe sobrepasar la capacidad de los móviles	1
Problema de optimización Np- Hard, que cuenta con uno o varios vehículos	1
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
La suma de las demandas en la ruta no puede ser mayor a la capacidad de los vehículos	1
El modelo asigna las cargas a los vehículos con la mayoría de clientes posibles sin violar las restricciones de capacidad	1
TOTAL	11
% DE CUMPLIMIENTO	100%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 6

Nivel de cumplimiento FSMVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO FSMVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	1
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad no es limitada, libre al cliente	0
Existe un solo deposito	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
Ahorro en términos de costos fijos (Ahorro combinado)	0
La demanda de los clientes no debe superar la capacidad de los móviles	1
Capacidad libre del vehículo (Ahorro de oportunidad optimista)	
El objetivo es minimizar los costos fijos asignados a una ruta	0
La suma de las demandas en la ruta puede superar la capacidad del vehículo y se recalcula el vehículo a usar	0
El modelo requiere un vehículo con mayor capacidad (Ahorro de oportunidad realista)	0
TOTAL	6
% DE CUMPLIMIENTO	54,5%

En la se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 7

Nivel de cumplimiento VRPTW. Fuente de elaboración propia

MODELO VRPTW	LA EMPRESA
Se calculan las distancias y los tiempos para saber el cliente más cercano	0
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Se escoge la ruta según distancias y tiempos de arribos	0
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	1
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existe un solo deposito	1
Los clientes poseen tiempos de servicio	0
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
Se tiene en cuenta el tiempo que se tardaría la ruta si se inserta un cliente lejano	0
La demanda de los clientes no debe sobrepasar la capacidad de los móviles	1
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
Se escoge el cliente más cercano dependiendo del tiempo de servicio	0
TOTAL	8
% DE CUMPLIMIENTO	61,5%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 8

Nivel de cumplimiento MDVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO MDVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser independientes	0
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el depósito correspondiente	0
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existen varios depósitos donde se sirven los vehículos	0
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
Se tiene en cuenta el tiempo que se tardaría la ruta si se inserta un cliente lejano	0
La demanda de los clientes es cambiante en el transcurso del tiempo	0
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
Se escoge el cliente más cercano dependiendo del lugar del depósito	0
TOTAL	4
% DE CUMPLIMIENTO	40,0%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 9

Nivel de cumplimiento PVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO PVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el depósito correspondiente	0
Se contempla un horizonte de M días para visitar los clientes	0
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1

La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existe un depósito donde se sirven los vehículos	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
La demanda de los clientes es cambiante en el transcurso del tiempo	0
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
Se escogen las rutas de los clientes dependiendo del día de visita	0
TOTAL	6
% DE CUMPLIMIENTO	60,0%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 10

Nivel de cumplimiento SDVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO SDVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el depósito central	1
La entrega de la mercancía es dividida por varios vehículos	0
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existe un depósito donde se sirven los vehículos	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
La demanda de los clientes es cambiante en el transcurso del tiempo	0
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
Pueden ser usados varios vehículos en el mismo cliente	0
TOTAL	7
% DE CUMPLIMIENTO	70,0%

En la siguiente tabla se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 11
Nivel de cumplimiento SVRP

MODELO SVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el depósito central	1
Los clientes se escogen en forma aleatoria	0
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada e igual para todos	1
Existe un deposito donde se sirven los vehículos	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
La demanda de los clientes es estocástica	0
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
El tiempo de entrega de la carga es estocástica	0
TOTAL	7
% DE CUMPLIMIENTO	70,0%

En la tabla 12 se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 12
Nivel de cumplimiento VRPPD

MODELO VRPPD	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	1
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada según la devolución de carga	0
Existe un solo deposito	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1

Si las devoluciones son muchas se utilizan más recursos de transporte	0
La demanda de los clientes no debe sobrepasar la capacidad de los móviles	1
Problema de optimización Np- Hard, que cuenta con uno o varios vehículos	1
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
La suma de las demandas en la ruta no puede ser mayor a la capacidad de los vehículos	1
Los clientes tienen la posibilidad de hacer devoluciones	0
TOTAL	9
% DE CUMPLIMIENTO	75%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 13
Nivel de cumplimiento VRPB

MODELO VRPB	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el deposito	1
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es limitada según la devolución de carga	0
Existe un solo deposito	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
Si las devoluciones son muchas se utilizan más recursos de transporte	0
La demanda de los clientes no debe sobrepasar la capacidad de los móviles	1
Se culminan las entregas antes de comenzar las recogidas	0
Problema de optimización Np- Hard, que cuenta con uno o varios vehículos	1
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
La suma de las demandas en la ruta no puede ser mayor a la capacidad de los vehículos	1

Los clientes tienen la posibilidad de hacer devoluciones	0
TOTAL	9
% DE CUMPLIMIENTO	69,2%

Se analiza el cumplimiento de este tipo de modelo.

Tabla 14

Nivel de cumplimiento MFVRP. Fuente de elaboración propia

MODELO MFVRP	LA EMPRESA
Las demandas de los clientes deben ser conocidas	1
Todos los recorridos deben iniciar y finalizar en el depósito central	1
La entrega de la mercancía es dividida por varios vehículos	0
Los clientes son visitados comúnmente una sola vez	1
La capacidad es diferente para todos los vehículos	0
Existe un depósito donde se sirven los vehículos	1
Tener una lista de clientes para satisfacer una demanda	1
La demanda puede concentrarse en un solo vehículo	0
El objetivo es minimizar los costos asignados a una ruta	1
Existen vehículos más grandes y cubrir rutas más largas	0
TOTAL	6
% DE CUMPLIMIENTO	60,0%

Tabla resumen de los niveles de cumplimiento para cada modelo

Tabla 15

Resumen de los niveles de cumplimiento. Fuente de elaboración propia

TIPO DE MODELO	% TOTAL
CVRP	100%
FSMVRP	54,50%
VRPTW	61,50%
PVRP	60%
SVRP	70%
VRPPD	75%
VRPB	69,20%
MFVRP	60%

En la tabla 15 se resumen los niveles de cumplimiento para cada modelo, evidenciando que el modelo CVRP es la mejor opción para resolver el algoritmo de ruteo, es la propuesta más acertada y que cumple con el 100% de las características de la compañía y se acopla a sus objetivos.

6 Estado del arte: solución del CVRP

Al analizar algunas de las investigaciones ya desarrolladas por varios autores que denotan sobre la investigación de operaciones, buscando minimizar los costos de las rutas ya establecidas en la empresa La Emperatriz S.A.S, se soportan varias teorías para ayudar a la problemática, analizando la mejor solución para crear la más óptima decisión.

Según Glover y Laguna (1997), la utilización del método de búsqueda Tabú, que busca crear memorias que ayuda a la flexibilidad de dar resultados basados en bloques ya guardados sin tener que procesar de nuevo la información, y colabora con el resultado al instante sin tener que retomar datos que ya fueron evaluados analizando los niveles de satisfacción del modelo y el tiempo de toma de decisiones se reduce ya que trabaja con desarrollos más rápidos y acertados.

De acuerdo a los autores Toth y Vigo (2000), el CVRP corresponde a entregas y demandas determinísticas ya establecidas, las demandas no se pueden repartir ni hacer grupos de entregas, los vehículos son iguales con un solo depósito, los viajes tienen un límite de capacidad, no podrán exceder la capacidad del vehículo y tendrán que atender al cliente y retornar a su sitio origen, en este caso al depósito.

Para encontrar la mejor decisión al momento de crear la distribución de las rutas se requiere de una gran herramienta informática para hacer las tantas combinaciones y escoger las más óptimas rutas con las mejores distancias en búsqueda de reducir los costos totales, se generan caminos cortos y otros más distantes pero siempre manteniendo la restricción de capacidad para los vehículos y cumpliendo con la demanda del cliente, estos trayectos son diseñados para reducir todo a su mínima expresión.

El modelo más simple del agente viaje de Oliveira (2004), es muy sencillo, un solo vehículo, no cuenta con restricciones de capacidad y ni de tiempo de entregas, la explicación del TSP ayuda en gran parte al desarrollo de este proyecto, sus características, sus fórmulas matemáticas y la explicación adecuada de montar todas las variables, los parámetros de funcionalidad apoyan en la implementación del modelo para este trabajo.

La empresa LA EMPERATRIZ S.A.S, muestra sus ya implementadas rutas de una forma muy sencilla y asignadas de manera manual, distribuidas solo con la experiencia del operador, se queda corto en el cálculo de mejorar la distribución para reducir al máximo las distancias que deben tomar los diferentes vehículos, Patterson (2007), utiliza una metodología sencilla para resolver estos casos

de estudio, a veces estas herramientas no son capaces de ir más allá de la solución óptima, los recursos informáticos de estos complementos que muestra este tipo de programas, se limitan a la cantidad de datos que podrían trabajar una compañía grande, para esta organización que maneja sus artículos a todo el territorio nacional es de gran utilidad para resolver la problemática que surgen al momento de querer reducir sus costos totales en la movilización de su flota.

Villegas (2008), presenta en su tesis de maestría, una heurística de GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures), problemas de rutas con restricciones de capacidad, híbridos de solución y en la construcción de los datos aleatorios, la utilización del método de ahorro (Clarke and Wright), buscando la mejoría de la distribución con resultados más cercanos posibles al objetivo de mejorarlo.

Cuando se trabaja con datos reales de una compañía que está constituida legalmente y tiene todos sus respaldos nacionales, en este caso los autores Restrepo & Medina (2008), abren poco a poco un modelo con características que dan explicación para que cada paso que se da en la investigación de operaciones se entienda la importancia de lograr esta meta y se muestran todas las ventajas que conlleva un tipo de modelo de estos, gracias a este artículo se visualizan todas las características detalladas del modelo.

En publicaciones de la revista de la escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA), presentada en el año 2009, sobre la “resolución del problema de vehículos con limitaciones de capacidad (CVRP) utilizando un procedimiento meta heurístico de dos fases”, es el resultado de tres ingenieros que presentan en su primera fase, agrupamiento con la ayuda de la heurística de barrido sobre la capacidad de cada vehículo, para la segunda fase, se utilizó (scheduling), para minimizar los costos totales asignados a todos los nodos que debe visitar cada móvil, los resultados no fueron publicas si no la forma de la implementación del modelo y sus grandes beneficios.

Muchos trabajos sobre este tema de optimización de rutas se han expuesto, la tesis presentada por Ortiz (2010), sobre programación matemática de modelos y algoritmos, para ser utilizados en procesos de distribución de aparatos electrónicos que ya no se utilizan, los campos de recolección sobre estos artículos que deben ser procesados de manera segura, el método utilizado para el diseño de redes de recolección y el tipo de método que se empleó como solución de ahorro, todos los vehículos mantenían una capacidad ya establecida y heterogenia, contando con el tiempo de entrega de dicho paquete con los artículos a ser destruidos.

Ya que para el VRP todo el espacio se define como todas las posibles soluciones acompañadas de las posibles variantes que puede tomar el método, cuando se realiza la exploración con la brusquedad Tabu esta a su vez diseña conjuntos de vecindades comunes para establecer Gendreau & Potvin (2010), la mejor compañía entre rutas, todos los puntos son analizados con detalle y el método de búsqueda refleja el resultado donde los puntos más cercanos se llamarían vecindades y acopamientos éxitos o los más óptimos.

El autor Russell (2011), explican paso a paso varios métodos para el desarrollo de este tipo de modelo, la combinación de soluciones viables y todas las nuevas formas de implementarlo a la vida real es de gran ayuda a la posible búsqueda de la solución más mejorada para este tipo de proyecto, con el análisis más profundo de esta investigación se toma de referencia para armar y contextualizar las variables más útiles que se puedan captar para darle más peso a la investigación.

En el año 2012 se publicó un artículo de investigación científica y tecnológica que se llamó “optimización aplicada a un problema de recolección de residuos industriales”, donde se utilizó el modelo de M-TSP (Multiple Traveling Salesman Problem), el autor Osorio (2012), gracias a sus capacidades de investigación, aclaro en su escrito la problemática de un modelo con restricciones de capacidad para el transporte de residuos generados por la compañía Cerromatoso ubicada en monte Líbano, Córdoba, Colombia, con la implementación de heurística constructiva, algoritmo de barrido como el vecino más cercano, buscando minimizar las distancias que deben recorrer los camiones con residuos en una amplia zona geográfica en este departamento.

No importa la cantidad de mercancía a transportar, lo realmente importante en este caso es la forma como se evalúan las posibles soluciones para mover en forma óptima todos los artículos y que lleguen a su destino, los autores Shen y Zifeng (2016), explican detalladamente los modelos que conforman precisas de aciertos más viables, la forma de implementar modelos matemáticos y la versatilidad de aplicarlos es la forma como los autores nos muestran a grandes rasgos, no es posible afirmar que las técnicas heurísticas y meta heurísticas solo son de grandes compañías que tiene al hombro mover inmensidades de cargas a muchos lugares, existen empresas que a pesar que no mueven grandes cantidades de mercancía son de vital importancia para reducir sus costos a la mínima expresión, es el caso de esta organización que evalúa la posibilidad de mover sus cinco vehículos de transporte de desechos orgánicos, reduciendo las distancias que permitan recolectar todo el material de industrias y hospitales, en su segundo estudio, se analizan las mejores rutas para la distribución de mercancía de una empresa pequeña de mensajería y ayuda aclarar dudas sobre el

transporte de este tipo de artículos, los casos de estudio que se mencionaron anteriormente colaboran en la visualización de corregir pequeños errores en el modelo, la justificación teórica del modelo es útil en el desarrollo del proyecto y fundamenta problemas de entregas que se comparan con el proyecto en curso.

Para las empresas de mensajería que deben implementar todo tipo de modelo para optimizar sus rutas, la toma de decisión es vital para que sea efectiva su respuesta en miras de alcanzar su objetivo propuesto, Xiao y Liu (2018), en su artículo exponen sobre la literatura que permite aclarar el VRP y todos sus modelos de optimización para este tipo de organización que se acoplan a variables que en la vida real son de gran importancia para resolver dichos problemas, el grupo de clientes que se quieren atender y la forma como se distribuyen en el mapa, son datos que se deben repasar una y otra vez, los autores hacen uso de las variantes del VRP, el VRPPD (Vehicle Routing Problem Pick-up and Delivering), el CVRP (Capacity Vehicle Routing Problem), el MP-VRP (Multi Period Vehicle Routing Problem), y el más famoso VRPTW (Vehicle Routing Problem Time Window), son de gran utilidad para el proyecto, el análisis que se realiza a estas variantes que dan como resultado el mejor modelo y que se utiliza en muchos proyectos en la industria nacional.

7. Modelo matemático del CVRP

7.1 Definición de las variables y parámetros del modelo CVRP

Las variables y parámetros que se utilizarán en el modelo matemático se basaron en el modelo descrito en el libro de los autores Toth y Vigo (2002).

$G = (V, A)$ Representa el grafo completo de la red de transporte donde.

$V = \{0, \dots, n\}$ Es el conjunto de vértices.

$A \times (i, j)$ Es el conjunto de arcos, donde $i \neq j$ y un grafo posee aristas de todos a todos los nodos.

$I = 1 \dots, n$ Corresponde a los clientes.

0 o $n+1$ Corresponden al depósito, Aunque corresponden a un mismo punto, presentan una variación ya que las restricciones asociadas a cada uno, cambian basados en los patrones de las distancias y los costos.

$[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$ E y L Representan el inicio o salida de la bodega más temprana posible y la llegada a más tarde posible respectivamente.

Todas las rutas posibles se representan como un camino $G = (V, A)$ el cual inicia en el nodo 0 y termina en el nodo $n + 1$ estos dos nodos no tienen tiempos determinados de entrega, pero sí una demanda clara.

K : Representa al vehículo k con una capacidad máxima de 5000 kg según especificaciones del fabricante y la resolución 332 del ministerio de transportes que reglamenta la capacidad máxima de carga en carretera. El número de vehículos no se considera una restricción del problema ya que los vehículos utilizados están acordes a la demanda de mercancía generada por la empresa.

- Para cada arco $A \times (i, j)$, Se define:

c_{ij} : Costo de viajar por cada arco $A \times (i, j)$ es decir el valor ponderado de viajar del nodo i al nodo j

t_{ij} : Representa el tiempo de viaje para cada arco $A \times (i, j)$ equivalente a una unidad de costo

X_{ijk} : Si el vehículo k viaja del nodo i al nodo j o viceversa. Es una variable de naturaleza binaria.

$X_{ijk} = 1$ Si en la solución, el vehículo k viaja de i a j

$X_{ijk} = 0$ Si en la solución, el vehículo k NO viaja de i a j

- Para cada nodo $V = \{0, \dots, n\}$ se define:

s_i : capacidad de carga en el nodo i o en cada cliente

d_i : Demanda del nodo i

7.2 Formulación programación lineal del CVRP

De igual manera se usaron las variables descritas por Jansen (1993); Shaw (1998); Prins (2004); Toth, y Tramontani (2008), el modelo de programación lineal se basó en los mismos autores.

Función objetivo.

Pretende optimizar los recorridos, donde t_{ij} es el tiempo de recorrido entre dos clientes i e j . El valor de la función objetivo es la capacidad total utilizada para visitar todos los clientes.

Para minimizar los costos

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} x_{i,jk}$$

(1)

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta+(i)} x_{ijk} = 1; \forall i \in N$$

(2)

Dado $N = V/\{0, n + 1\}$ representa en número total de clientes, sin tener en cuenta el depósito; la restricción (2) asigna a cada vehículo una ruta de clientes $j \in \Delta + (i)$. Es el conjunto de grafos completos que parten de i y llegan a j .

$$\sum_{j \in \Delta+(0)} x_{0jk} \leq 1; \forall k \in K$$

(3)

$$\sum_{i \in \Delta - (n+1)} x_{i+1} \leq 1 ; \forall k \in K$$

Las restricciones (3) y (4) determina que cada vehículo debe llevar solo una ruta, y definen el flujo que debe seguir la flota. La numero 3 hace referencia al número de veces que un vehículo sale del depósito y la segunda, el número de veces que llega. $j \in \Delta + (0)$, es el conjunto de grafos completos que parten del depósito a todos los clientes y $i \in \Delta - (n + 1)$ es el conjunto de grafos que parten de todos los clientes hacia el depósito.

$$\sum_{i \in \Delta - (j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta + (j)} x_{ijk} = 0 ; \forall k \in K, j \in N \quad (4)$$

La restricción (5) garantiza que cada cliente sea atendido por un solo vehículo y posteriormente siga su recorrido. Esta restricción permite que en el modelo no se formen ciclos. Al activarse el nodo x , este se elimina del conjunto de clientes no visitados para evitar repeticiones en la asignación de rutas.

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ij} ; \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (6)$$

La restricción (6) asegura que el vehículo k no pueda comenzar el servicio, si la suma de las capacidades i a j , la duración del servicio en i y el tiempo total acumulado al inicio del servicio en i (w_{ik}) es mayor que la capacidad de j o del cliente siguiente.

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta + (i)} x_{ijk} \leq Q ; \forall k \in K \quad (7)$$

La restricción (7) indica que la suma de las demandas de los clientes de una ruta no debe exceder la Capacidad del vehículo k .

$$w_{ik} \geq 0 ; \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (8)$$

La restricción (8) impone condiciones de no negatividad a las variables del modelo

$$x_{ijk} \in \{0,1\} ; \forall k \in K, (i, j) \in A$$

(9)

La restricción (9) indica la naturaleza binaria de las variables.

En resumen, el CVRP se formula formalmente así:

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{i,jk}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{i,jk} = 1; \forall i \in N$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0,jk} \leq 1; \forall k \in K$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(n+1)} x_{i+1,k} \leq 1; \forall k \in K$$

$$\sum_{i \in \Delta^-(j)} x_{i,jk} - \sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{i,jk} = 0; \forall k \in K, j \in N$$

$$w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk} \leq (1 - x_{i,jk}) M_{ij}; \forall k \in K, (i,j) \in A$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{i,jk} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{i,jk}; \forall k \in K, i \in N$$

$$E_i \leq w \leq L; \forall k \in K, i \in \{0, n+1\}_{ik}$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{i,jk} \leq Q; \forall k \in K$$

$$w_{ik} \geq 0; \forall k \in K, (i,j) \in A$$

$$x_{i,jk} \in \{0,1\}; \forall k \in K, (i,j) \in A$$

8. Métodos de solución

8.1 Método de ahorro basado en Matching

En algunos casos las rutas con los máximos ahorros nunca es la mejor opción, cuando se quiere elegir la mejor ruta se evalúan muchas alternativas de solución, en el algoritmo de Matching se decide una ruta de ahorro y todos los destinos son tomados como nodos, creando un mapa de recorridos posibles, cuyos nodos son p y q y el peso del ahorro correspondiente.

Un matching que tenga un peso económico sobre la ruta será siempre la mejor opción de ruteo.

Algoritmo de Ahorros Basado en Matching

Pasó a paso del ahorro

Paso 1. El cliente i con la ruta $(0, i, 0)$, (inicialización).

Paso 2. Combinar las rutas p y q que pueda ser combinadas manteniendo la factibilidad. Cuando no se puedan combinar más, terminar, (cálculo de los ahorros).

Paso 3. (matching). Resolver un problema de matching de peso máximo donde las rutas p y q son las más factibles.

Paso 4. El matching de peso máximo, hacer las uniones correspondientes si no ir al paso 2 y repetirlo, (uniones).

8.2. Inserción Secuencial de Mole & Jameson

El método de inserción es factible para introducir un cliente lejano dentro de una ruta ya establecida, el cálculo que se realiza para hacer más óptima la decisión es escoger el cliente más lejano y de esa forma calcular su posición geográfica y ponerlo en el espacio con menos recorridos, este cálculo se realiza con respecto a la distancia del depósito.

Paso a paso Mole & Jameson

Pasó 1. Cuando los clientes pertenecen a la misma ruta, terminar. Si no, escoger un cliente que no se ha visitado w y crear la ruta $r = (0, w, 0)$, (creación).

Paso 2. Si se cumple $r = (v_0, v_1, \dots, v_t, v_{t+1})$ donde $v_0 = v_{t+1} = 0$. Para cada cliente no visitado w , calcular $i(w) = \arg \min_{i=0 \dots t} c_1(v_i, w)$. Los recorridos no son válidos, ir al paso 1, (inserción). Calcular $w^* = \arg \max_w c_2(v_i(w), w)$. Insertar w^* luego de $v_i(w^*)$ en r .

Paso 3. Aplicar el 52 método sobre r . Ir al paso 2, (optimización).

8.3 Heurística de Barrido o Sweep

En la heurística de barrido como su nombre lo indica barre los clientes que se encuentre en una semirrecta que se curva para poder generar rutas que parten desde el depósito y sin sobrepasar la restricción de capacidad.

La heurística se resuelve en un mapa plano donde los clientes se encuentran repartidos geográficamente teniendo en cuenta sus distancias con respecto al depósito.

Heurística de barrido

Paso 1. Escoger todos los nodos y ordenarlos de forma creciente. Cuando los clientes compartan el mismo valor, ordenar según p . clasificar un cliente w para comenzar y hacer $k := 1$ y $C_k := \{w\}$, (inicialización).

Paso 2. Si todos los clientes pertenecen a algún clúster, ir a 3. Si no, seleccionar el siguiente cliente w_i . Si w_i puede ser agregado C_k sin violar las restricciones de capacidad, hacer $C_k := C_k \cup \{w_i\}$. Si no, hacer $k := k + 1$ y crear un nuevo clúster $C_k := \{w_i\}$. Ir a 2, (selección).

Paso 3. Para cada par de rutas C_k para $t = 1, \dots, k$, desarrollar el TSP con sus clientes, (optimización).

9 Algoritmo de solución para el CVRP

9.1 algoritmo de Clarke & Wright

En la actualidad existen muchos métodos de ahorro, uno de los más utilizados para resolver problemas de ruteo es de Clarke y Wright, el análisis que realiza el método es la exploración de todos los trayectos existentes en el mapa ya establecido por la empresa, el algoritmo parte de dos rutas $(0, \dots, j, \dots, 0)$ y $(0, \dots, i, \dots, 0)$, los trayectos se mezclan generando una única ruta, $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$, a continuación, se visualiza la combinación de rutas:

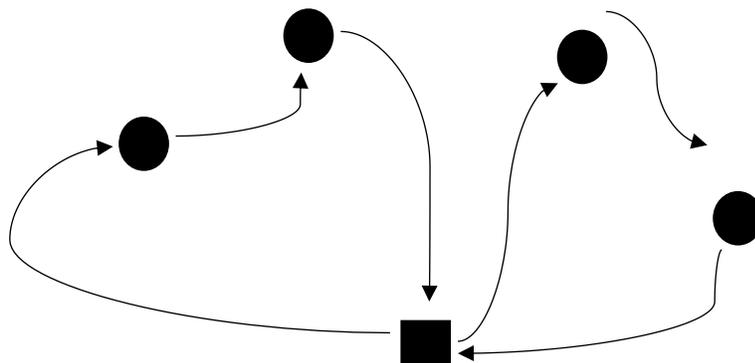


Figura 19 Rutas antes de ser combinadas Fuente: Olivera, Alfredo. ruteo de vehículos.

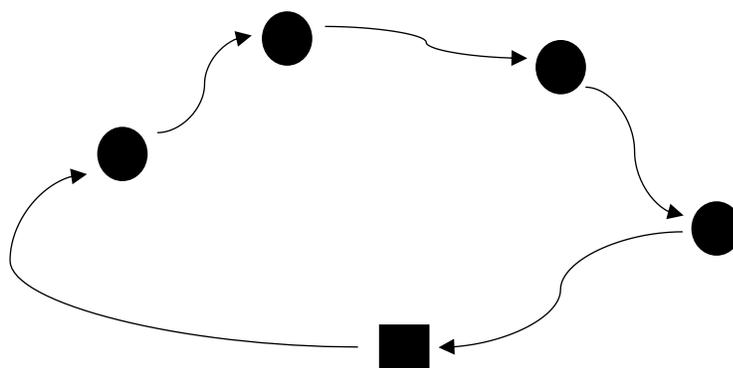


Figura 20 Rutas después de ser combinadas Fuente: Olivera, Alfredo. problemas de ruteo de vehículos

Se presenta la ecuación del ahorro:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$$

Cuando se combinan las rutas los arcos $(i,0)$ y $(0,j)$, estos arcos desaparecen y se asigna un nuevo arco (i,j) , cuando se ejecuta el algoritmo este analiza todas las trayectorias que generen más ahorro y cumpla todas las restricciones programadas en el modelo, por otra parte, se deben conocer las distancias que existen entre nodos, que es el mismo costo que pertenece a ese trayecto.

El algoritmo se fragmenta en dos partes, una de ella es paralela, es decir, abarca todos los nodos para diseñar todas las rutas posibles y por otro lado secuenciales, es decir, se construyen las rutas una por una.

Ahorro versión paralela

A continuación, se muestran los pasos para el diseño de la solución en versión paralela.

Paso 1. Para el cliente i diseñar la ruta $(1, i, 1)$.

Paso 2. Calcular S_{ij} para los grupos de clientes i y j .

Paso 3. Donde $S_{i^*j^*} = \text{Max } S_{ij}$ entre estos se toma el más máximo, se considera r_{i^*} y r_{j^*} los recorridos que conllevan a los clientes i^* y j^* respectivamente, cuando i^* sea el último cliente de r_{i^*} y i^* y primer cliente r_{j^*} y la mezcla del grupo r_{i^*} y r_{j^*} es viable se deben combinar.

Paso 4. Borrar $S_{i^*j^*}$ de posibles análisis, si sobran ahorros por desarrollar ir al paso 3 y si no terminar.

Ahorro versión secuencial

A continuación, se muestran los pasos para el diseño de la solución en versión secuencial.

Paso 1. Para el cliente i diseñar la ruta $(1, i, 1)$.

Paso 2. Calcular S_{ij} para los grupos de clientes i y j .

Paso 3. Introducir la trayectoria (i,j) , que no se tuvo en cuenta y que cumpla con la programación de restricciones cuando se visualicen los clientes en los extremos de las trayectorias.

Paso 4. Cuando la ruta $(0, i, \dots, j, 0)$, es la actual, si existen ahorros en i o en j retomar el paso 3 y repetir el paso cuantas veces se pueda, hasta introducir los arcos con más ahorro, generando un barrido de ahorros.

Paso 5. Repetir los pasos 3 y 4 hasta lograr capturar más arcos a la ruta.

Se han analizados muchas ecuaciones y estudiado la ecuación real y se llega a la conclusión que se generan rutas circulares, gracias a Golden y Magnanti (1977) y Gaskell (1967); Yellow (1970), se llegó a definir una única ecuación para eliminar las rutas circulares:

$$S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - \lambda C_{ij}$$

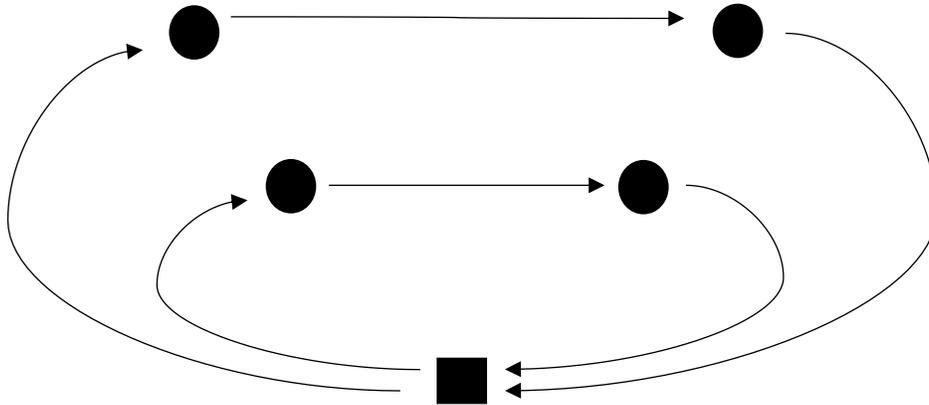


Figura 21 Rutas circulares sin ser combinadas Fuente: Corona León, José Alejandro. a través de programación genética para la resolución de problemas de vehículos. 2005

El símbolo λ sirve de penalización para que no existan rutas con clientes lejanos, puede también servir para crear grupos de soluciones que cumplan con las restricciones programadas.

9.1 Flujo grama del algoritmo de CLAKE & WRIGHT

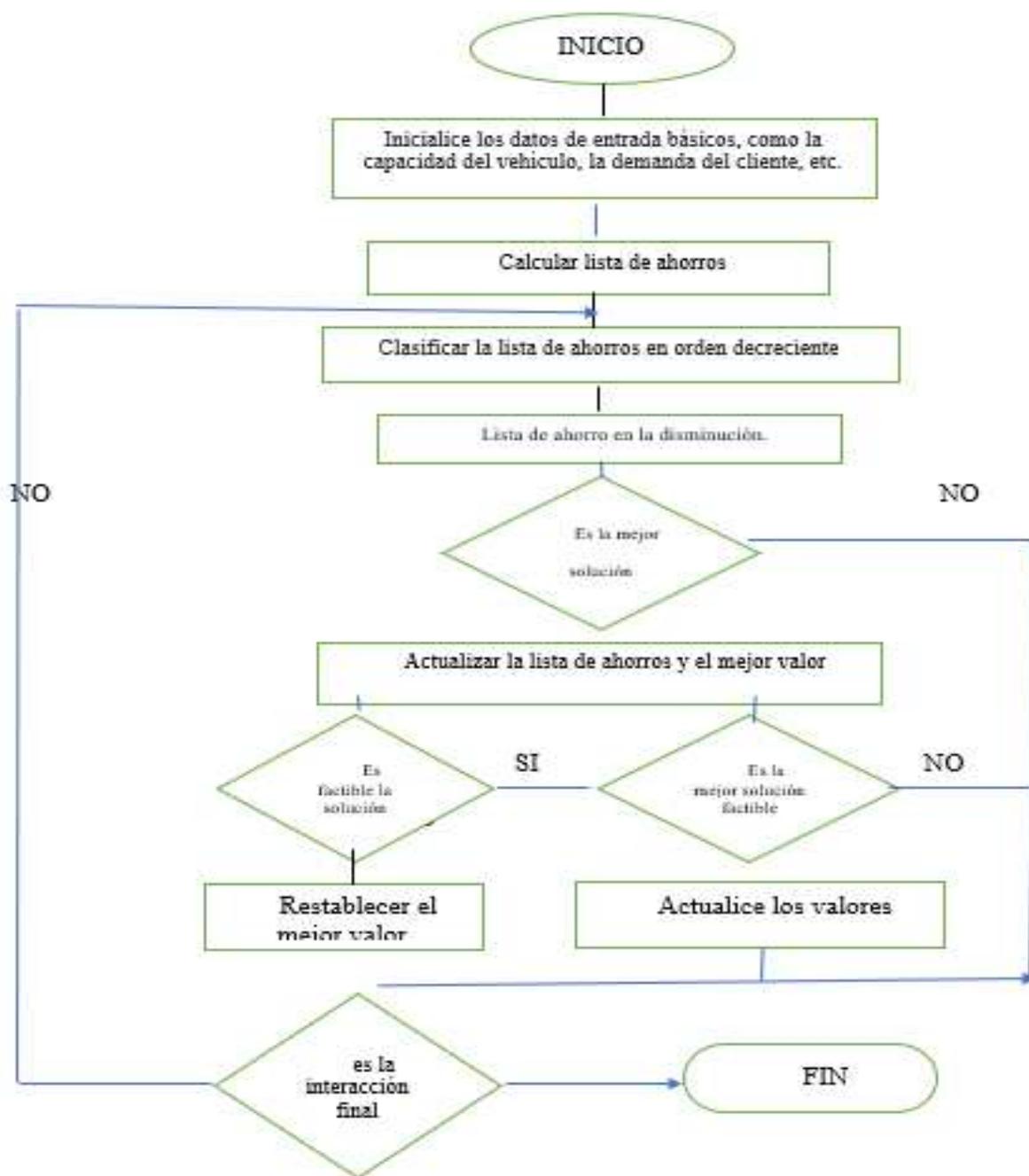


Figura 22 Flujo grama Clarke & Wright. Elaboración propia.

Descripción método de solución

Para lograr desarrollar el problema se realizó una implementación utilizando un trabajo de maestría realizado en la universidad de Sevilla por Medran (2017), en el cual realiza una programación

utilizando MATLAB PROGRAMACION el cual tiene acceso al código de programación, que posteriormente tomamos para adaptarlo a Microsoft Excel, mediante la herramienta de visual Basic Excel (2013) y poderlo desarrollar.

Consideraciones importantes

Antes de desarrollar el algoritmo es importante tener en cuenta lo siguiente.

- La cantidad de clientes del problema (numCustomer): este dato es indispensable para determinar el problema a resolver.
- Capacidades de carga de los vehículos, este dato es igual de importante ya que la cantidad de cliente y el valor debe ser, igual a la cantidad clientes ya que si existe un cliente se debe realizar una entrega.
- Distancias: es importante tener las distancias entre las distintas posiciones, con base en esto poder calcular los tiempos de desplazamiento.
- Orígenes y destinos: se conoce como origen la última tarea de cada ruta intermedia (rutas que se van formando según se desarrolla el algoritmo) y como destino a la primera tarea de dichas rutas intermedias. Esto se presenta de este modo durante el desarrollo del algoritmo se produce la unión de rutas intermedias, de tal forma que los clientes que se encuentren en la última posición (orígenes) solo pueden buscar una tarea sucesora, ya que la predecesora la tienen fijada. Para el caso de la primera posición (destinos) ocurre lo contrario, solo pueden ser precedidos por otra tarea porque la sucesora ya se encuentra definida.
- Factibilidad de las uniones: son viables de unir aquellas rutas cullas características cumplen con las restricciones del problema y por tanto se pueden llevar a cabo. Para lograrlo las uniones posibles deben contar con unas características específicas.
 - 1- No se deben unir clientes con diferentes localizaciones.
 - 2- El instante de tiempo resultante de la suma del instante más temprano de finalización de la ruta más el tiempo de desplazamiento entre la última tarea de la ruta intermedia actual y la primera tarea de la ruta intermedia que se está considerando tiene que ser menor o igual que el instante de inicio más tardío de la ruta intermedia que se está considerando. En otras palabras, se han de cumplir las restricciones de las ventanas temporales, los clientes tienen que ser servidos dentro de su ventana temporal.
- Una vez realizadas las dos rutas intermedias, se dirige nuevamente a la finalización.

Paso a paso para utilizar el Aplicativo en Excel

- 1- Generar una matriz de distancias entre cada uno de los puntos clientes
- 2- Se numeran ordinalmente los destinos, tanto en las filas como columnas

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
	221	027	044	003	227	247	098	002	011	000	072	228	299	06	24	331	077	306	298	79	007	024	079	039	76	
BOGOTÁ	ACACIAS	ARAPOMA	CAJICA	ENVIGADO	COTA	PORBANDA	PUERTO	ESPIRAL	ACATÁ	SAGAS	GIRARDOT	IBARRÉ	IRAGUÉ	LA NECA	MOSQUERA	NEIVA	PAIPA	TOTO	PUERTO	LAGUNA	TOCANCIPÁ	TURBAMÉ	IBATÉ	LAGUNA	VALLETA	ZIPACÓN
221	0	241	254	205	254	451	206	355	257	241	244	420	240	245	077	413	271	401	405	251	345	240	54	230	254	
027		0	064	204	024	201	241	012	020	242	40	011	025	24	050	245	275	241	242	071	224	200	270	245	074	
044			0	020	054	201	012	240	240	247	205	250	211	024	055	401	201	204	010	025	010	40	240	021	40	
003				0	055	201	017	250	245	250	205	250	270	224	054	404	055	245	075	017	05	70	230	021	022	
227					0	240	245	011	02	020	012	21	241	045	21	220	010	245	241	42	055	010	230	045	72	
247						0	204	02	021	010	051	40	010	020	020	024	204	70	25	210	071	240	240	015	227	
098							0	202	242	250	245	074	270	020	042	450	24	402	25	210	071	240	240	015	227	
002								0	02	04	25	010	40	015	044	011	227	242	251	210	071	240	240	015	227	
011									0	010	044	071	221	41	21	245	242	227	224	010	071	240	240	015	227	
072										0	70	010	042	020	40	221	227	271	241	24	227	240	240	015	227	
228											0	010	77	42	054	010	217	244	247	244	240	227	240	015	227	
299												0	010	010	042	240	244	010	274	224	240	254	240	015	227	
06													0	051	010	045	242	240	241	227	210	240	210	220	227	
24														0	40	224	224	254	271	020	242	077	244	017	020	
26															0	245	042	245	244	71	010	024	025	015	010	
331																0	444	240	074	271	402	275	244	257	240	
077																	0	245	21	015	40	017	245	245	040	
306																		0	401	251	270	210	401	072	241	
298																			0	010	071	017	210	241	024	
79																				0	010	40	244	021	24	
007																					0	021	257	244	021	
024																						0	240	017	41	
079																							0	240	244	
039																								0	011	
76																									0	

Figura 23 matriz de distancias

- 3- Se genera la Matriz de Ahorro. A cada celda ij se calcula el ahorro mediante la fórmula establecida por el método.

82	S _{0i}	221	027	044	003	227	247	098	002	011	000	072	228	299	06	24	331	077	306	298						
83																										
84	i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
85	j	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
86	h	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	
87	S _{ij}	340	254	305	254	450	206	355	257	230	244	420	240	245	077	403	271	400	405	251	345	240	54	230	254	
88																										
89	A _{ij}	0	21	10	-6	0	32	40	25	41	49	19	50	22	70	69	27	37	25	33	20	25	33	20	33	

Figura 24 cálculo de ahorros

- 4- Presentación de datos en forma lineal, para mejor visualización y manejo.
 - 4-1 Fila "A": Distancia de Origen a cada destino S_{0i}
 - 4-2 Fila "B": Todos los posibles pares de destinos. ij

4-3 Fila "C": Distancias entre cada para de destinos S_{ij}

4-4 Fila "D": Ahorro de cada par de destinos $A_{ij}=S_{oi}+S_{oj}-S_{ij}$

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	S_{oi}	2062	1853	1361	801	474	120	87	257	519	677	913	1018
	i	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	j	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3
B	S_{ij}	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,10	1,11	1,12	2,3
C	S_{ij}	316	701	614	1536	2020	2149	2319	2581	2739	2975	3078	492
D	A_{ij}	3599	2722	2249	938	162	0	0	0	0	0	2	2722
													2244
													940
													162

Figura 25 datos del cálculo fuente de elaboración propia

5- Se organizan los datos según ahorro decreciente

A_{ij}	i_j	i	j				
3599	1,2	1	2	1	2	12	6
2722	1,3	1	3	1	3	7	12
2722	2,3	2	3	-	3	8	12
2249	1,4	1	4	-	4	9	12
2244	2,4	2	4	1	4	10	12
1949	3,4	3	4	-	4	11	12
1822	11,12	11	12	2	12	7	12
1356	10,12	10	12	2	12	8	12
1354	10,11	10	11	-	11	9	12
942	4,5	4	5	1	5	10	12
940	2,5	2	5	-	5	11	12
938	1,5	1	5	-	5	7	12
935	3,5	3	5	-	5	8	12
911	3,12	3	12	-	12	9	12
909	3,10	3	10	2	10	10	12
909	3,11	3	11	-	11	11	12
516	8,12	8	12	-	12	3	12
514	8,9	8	9	2	9	7	12
514	8,10	8	10	-	10	7	12
514	8,11	8	11	-	11	8	12
176	7,12	7	12	-	12	9	12
174	7,8	7	8	2	8	10	12
174	7,9	7	9	-	9	11	12
174	7,10	7	10	-	10	7	12
174	7,11	7	11	-	11	8	12
162	1,6	1	6	-	6	9	12
162	2,6	2	6	-	6	10	12
162	3,6	3	6	1	6	11	12

Figura 26 organización de ahorros de mayor a menor fuente de elaboración propia

6- Se toman todos los destinos y se les asigna un valor inicial de enlaces posibles y número de ruta inicial

6.1-Enlaces posibles se refiere a los destinos que pueden unírseles

2 cuando no tiene ruta (enlace sólo con depósito)

1 cuando está en ruta con otro destino

0 cuando está en ruta con otros 2 destinos

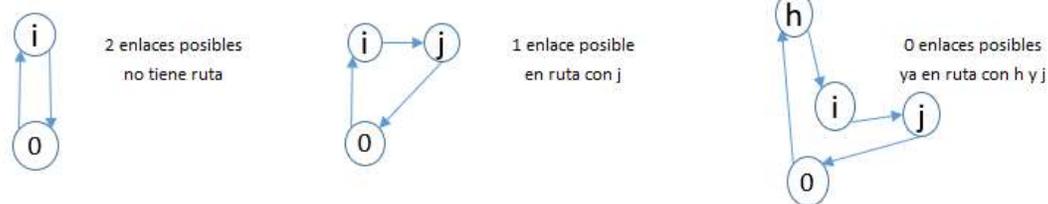


Figura 27 posibles enlaces fuente de elaboración propia

6.2-Número inicial de ruta. Asumiendo inicialmente que cada destino tiene ruta independiente

Se asigna un número suficientemente alto, para que no coincida con alguna ruta que se determine

Tabla 16
Cálculo de números según el paso 6

Ruta	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000
Destinos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
enlaces	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

7- Se determinan las rutas a las que pertenece cada par S_{ij} . O si no pertenece a ninguna

7.1-Par a Par, según orden decreciente de ahorro, se evalúa según los criterios establecidos

El ahorro debe ser mayor a cero ($A_{ij} > 0$)

Los enlaces disponibles para i para j deben ser mayores a cero

Las rutas a las que pertenecen i y j deben ser diferentes

8- Se organizan los pares de cada ruta en un sentido coherente

8.1-Para cada ruta identificada (columna G, filas 68 a 95) se organizan los pares en un sentido coherente

Cada destino sólo puede ser punto de partida y llegada una sola vez

9- Determinación de los puntos de partida y retorno de cada ruta

9.1-Cada destino sirve de partida y llegada entre otros dos puntos. Pero, los destinos de inicio y fin de una ruta sólo sirven de partida o de llegada.

Se identifican fácilmente dentro de los grupos anteriores; es el par de destinos que no se repite

10- Definición de recorridos de rutas

10.1-Comenzando en uno de los puntos determinados en el paso anterior, comenzamos a hacer los enlaces de cada par

11-Se presenta el resultado final

Recorridos tomados para determinar los tiempos desde el nodo inicio a cada uno de los clientes

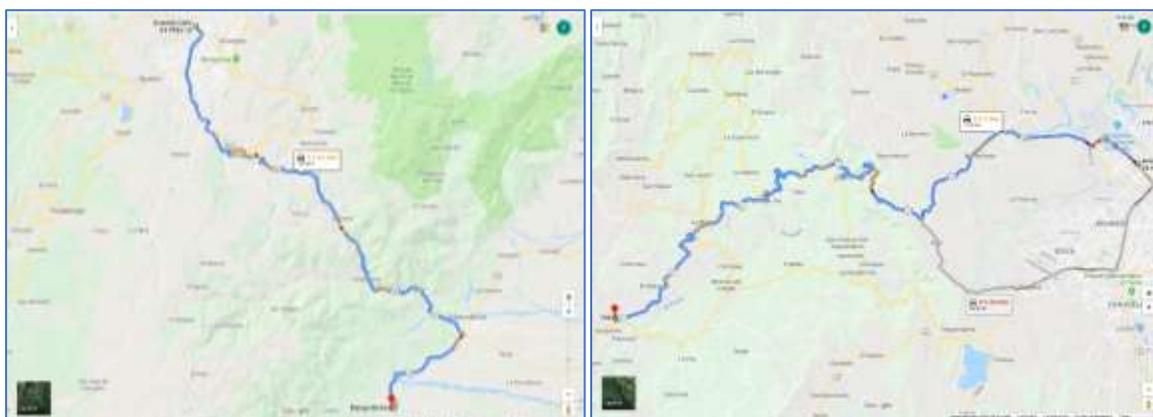


Figura 28 Bogotá – Acacias. Producción propia. Figura 29 Bogotá - Anapoima Producción propia

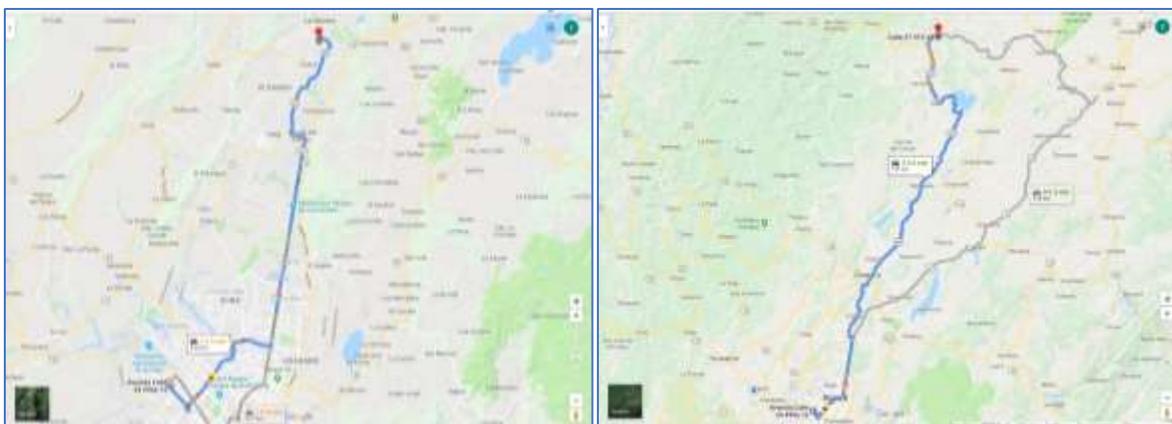


Figura 30 Bogotá – Cajicá. Producción propia Figura 31 Bogotá – Chiquinquirá. Producción propia

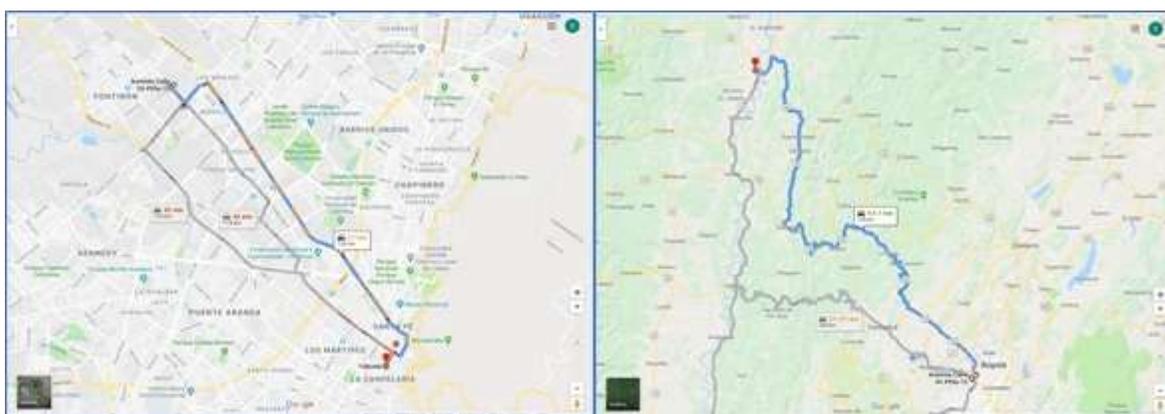


Figura 32 Bogotá – Cota. Producción propia Figura 33 Bogotá – Dorada. Producción propia

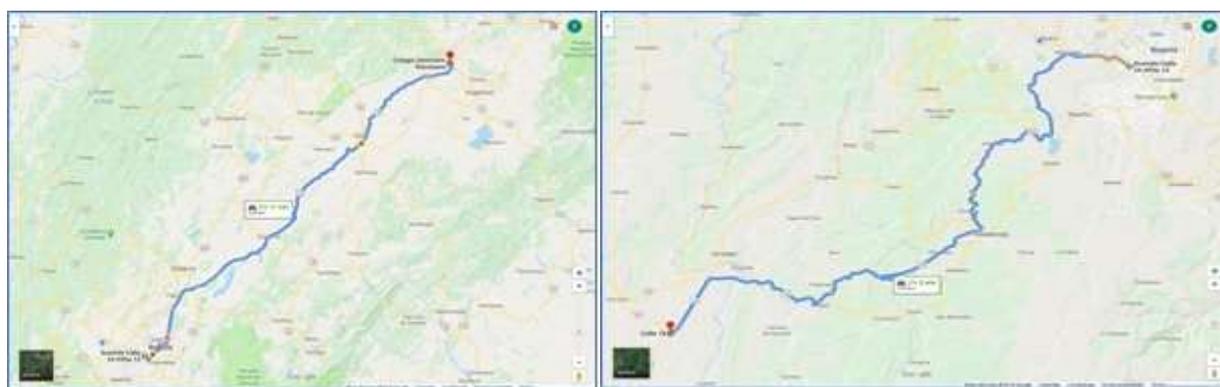


Figura 34 Bogotá – Duitama. Producción propia

Figura 35 Bogotá – Espinal. Producción propia



Figura 36 Bogotá – Girardot. Producción propia

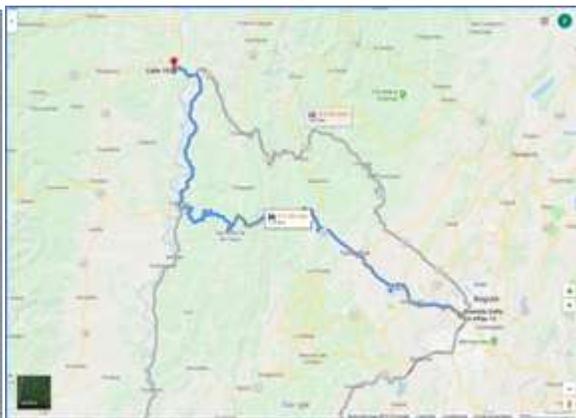


Figura37Bogotá–Honda Producción propia

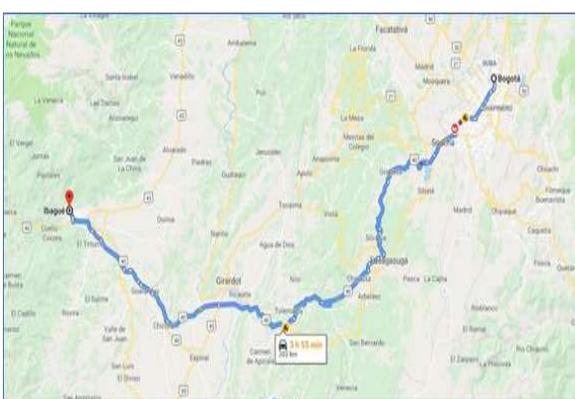


Figura 38 Bogotá – Ibagué. Producción propia

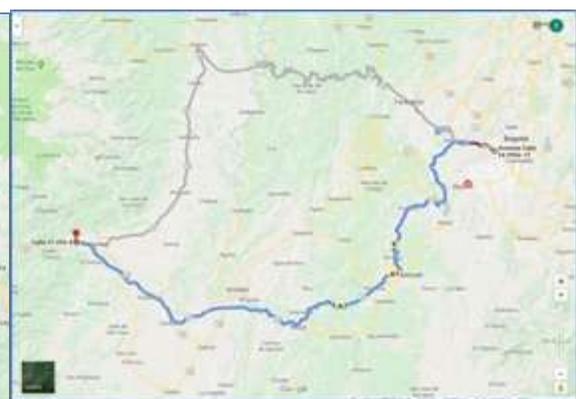


Figura 39 Bogotá – Ibagué. Producción propia

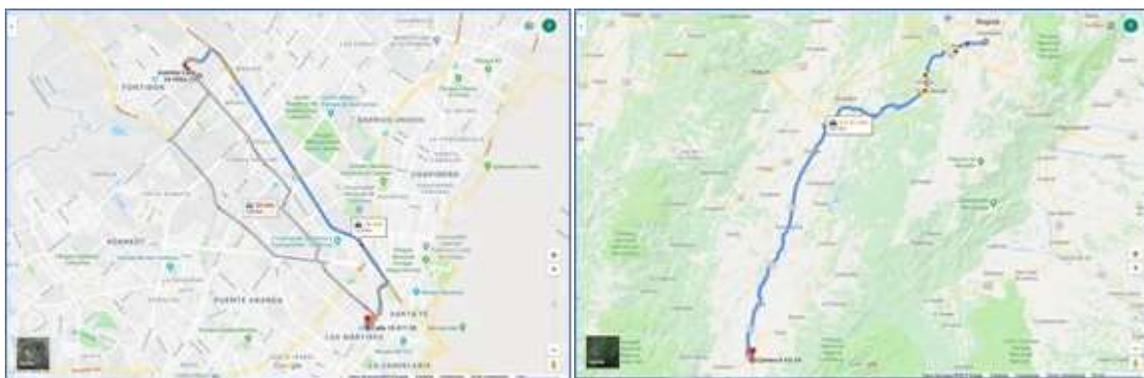


Figura 40 Bogotá – Mosquera. Producción propia Figura 41 Bogotá – Neiva. Producción propia

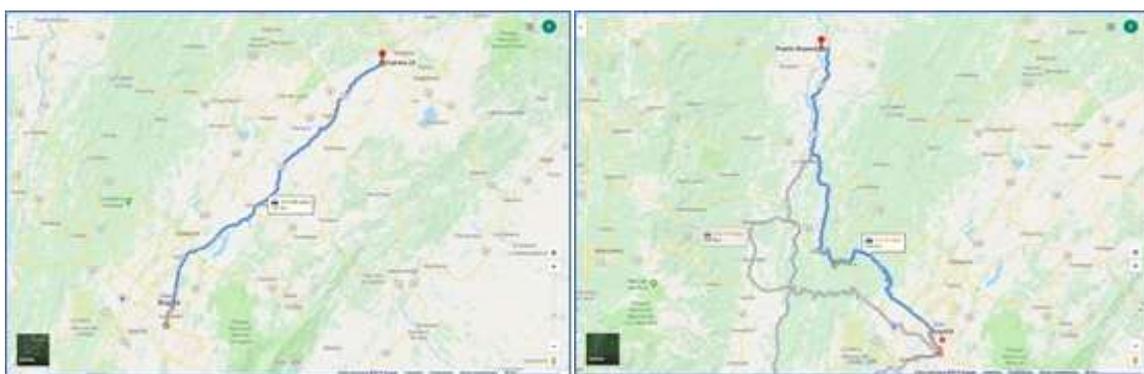


Figura 42 Bogotá – Paipa. Producción propia Figura 43 Bogotá - Puerto Boyacá. Producción propia

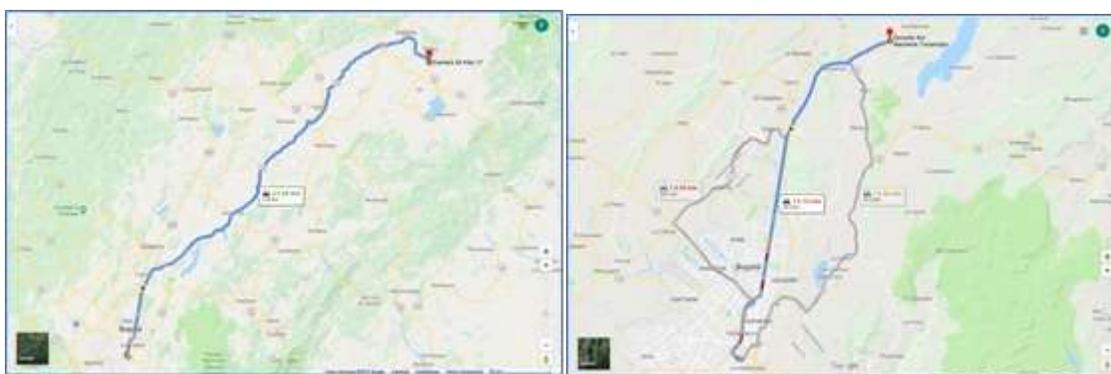


Figura 44 Bogotá – Sogamoso. Producción propia Figura 45. Bogotá – Tocancipá Producción propia.

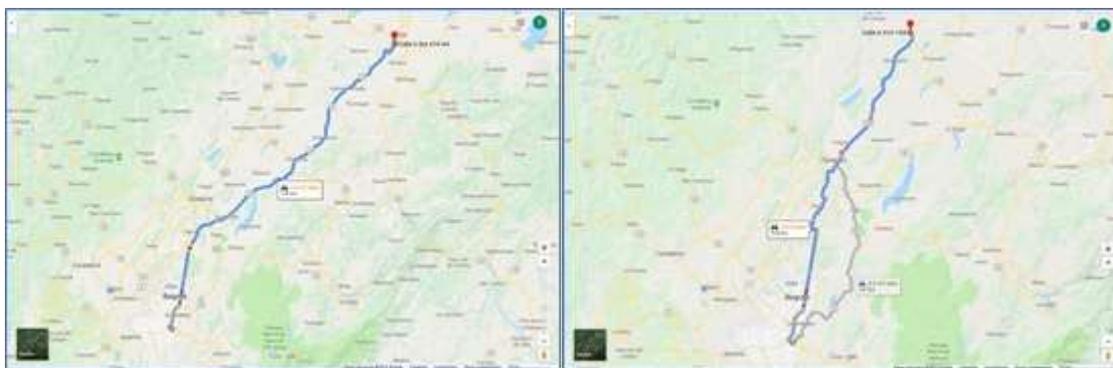


Figura 46 Bogotá – Tunja Producción propia. Figura 47 Bogotá – Ubaté. Producción propia.

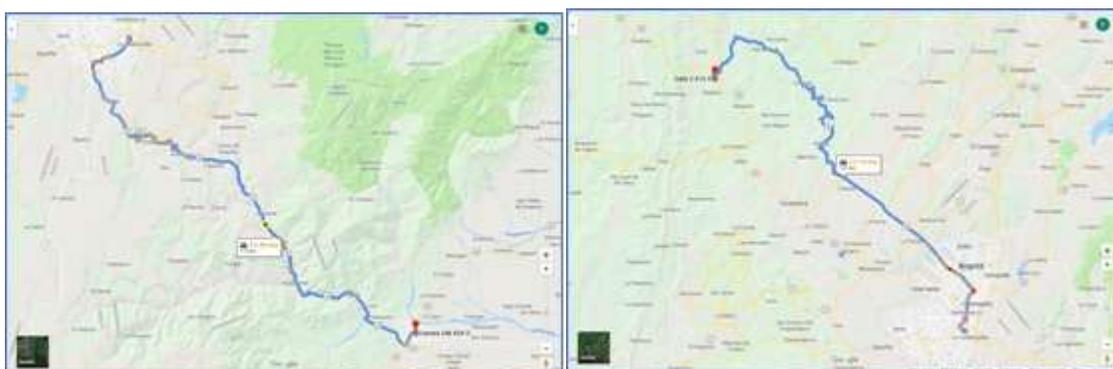


Figura 48 Bogotá – Villavicencio. Producción propia. Figura 49 Bogotá – Villeta. Producción propia.

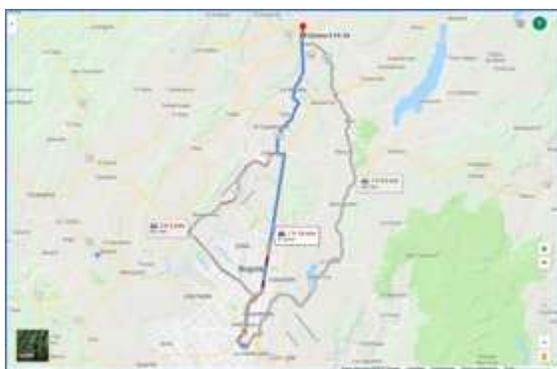


Figura 50 Bogotá – Zipaquirá. Producción propia

Mapa consolidado de localización de clientes

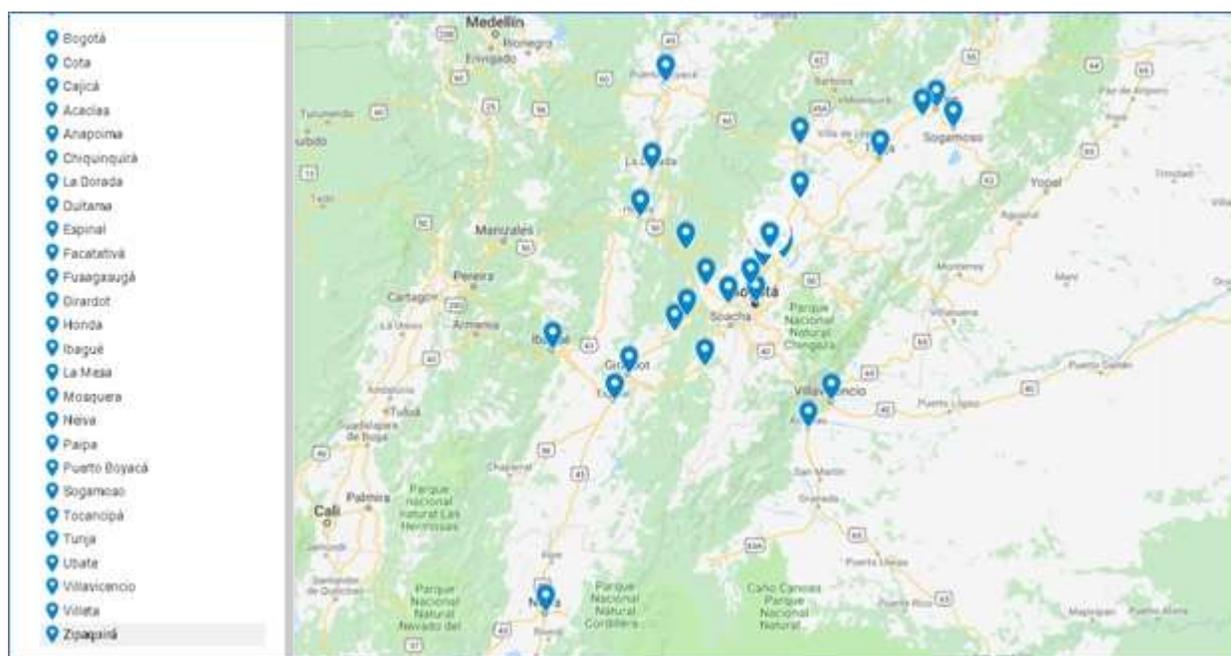


Figura 51 Mapa general de todos los nodos. Producción propia

Mapa de vías utilizadas para la distribución

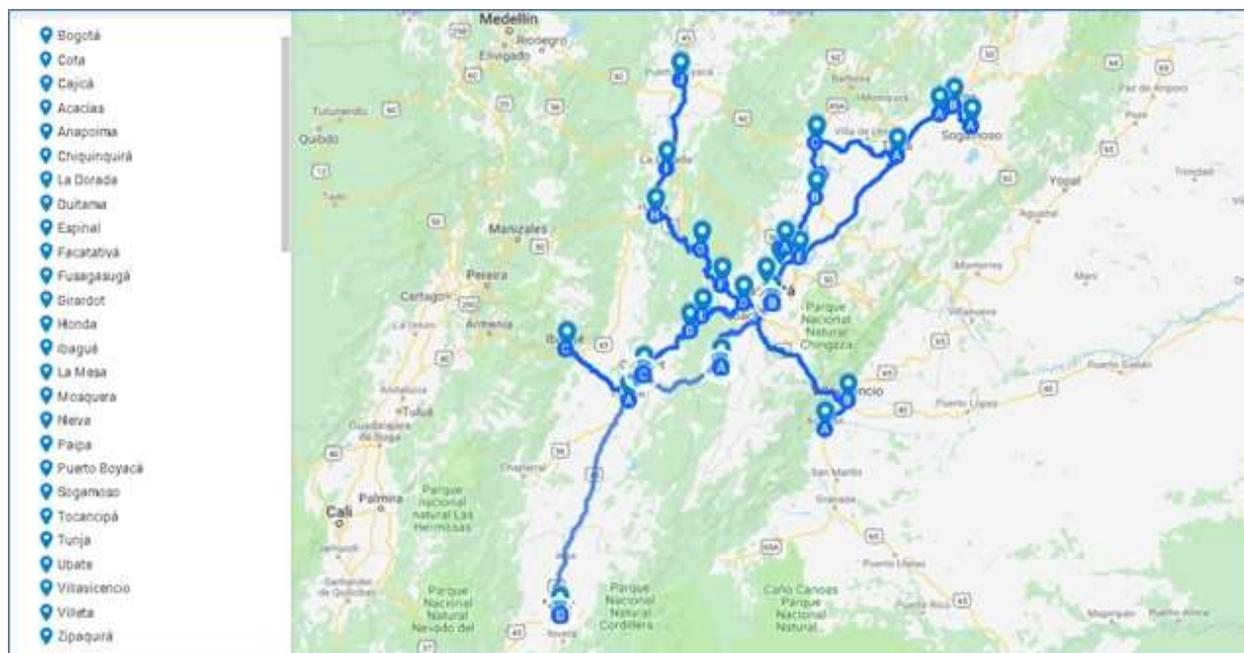


Figura 52 Unión de los nodos. Producción propia

9.3 datos de entrada

Para lograr llegar a la función objetivo se tomaron los mapas presentados anteriormente para desarrollar una matriz de distancias y una matriz de tiempos con el fin de generar los ahorros de desplazamientos entre todas las rutas.

La matriz de tiempos muestra las distancias entre cada uno de los clientes con relación a los otros y las distancias que existen desde el depósito hasta cada uno de los clientes de igual forma contempla los tiempos de desplazamiento desde los clientes hasta la bodega de inicio y los tiempos que le tomaría regresar desde un cliente a otro.

La matriz de distancias calcula la distancia desde la bodega a cada uno de los clientes y la distancia que existe entre cada cliente tanto de ida como de regreso.

Tabla 17
Matriz de tiempos en minutos. Elaboración propia

ORIGEN/DESTINO	BOGOTÁ	ACACIAS	ANAPAIMA	CAJICA	CHINGUINQUIRA	COTA	DORADA	DUTAMA	ESPIÑAL	FACATATIVA	FUSAGASUGA	GIRARDOT	HONDA	IBAGUÉ	LA MESA	MOGUERA	NEIVA	PAIPA	PUERTO BOYACÁ	SOGAMOSO	TOCANCIPÁ
BOGOTÁ	0	221	127	64	183	27	247	198	182	61	198	172	228	219	96	26	331	177	306	209	70
ACACIAS	219	0	348	254	365	254	450	386	355	257	238	344	430	390	295	177	483	371	490	405	258
ANAPAIMA	135	356	0	156	266	124	201	231	103	120	202	60	161	135	36	158	245	275	261	302	171
CAJICA	63	301	161	0	133	156	370	182	340	210	267	325	350	381	124	195	468	208	360	180	135
CHINGUINQUIRA	202	401	271	131	0	155	387	167	331	205	258	325	350	370	234	184	460	155	365	175	167
COTA	24	267	126	165	165	0	210	205	198	52	120	182	38	241	105	38	320	180	245	201	62
DORADA	123	465	190	276	330	214	0	384	93	123	190	159	40	100	128	128	139	366	70	35	213
DUTAMA	201	388	238	179	167	211	381	0	333	213	258	315	174	373	150	192	458	24	413	35	213
ESPIÑAL	198	381	93	345	341	206	90	330	0	93	94	35	140	69	115	164	141	327	243	358	213
FACATATIVA	65	261	123	202	201	151	120	210	90	0	110	164	171	221	91	31	305	202	227	224	90
FUSAGASUGA	127	302	198	270	260	143	187	255	91	107	0	79	190	193	123	93	221	273	271	301	216
GIRARDOT	176	351	67	320	317	181	156	312	32	161	76	0	196	77	83	154	186	317	214	347	204
HONDA	221	441	153	345	354	41	48	171	137	168	187	113	0	149	180	192	248	344	114	374	224
IBAGUÉ	223	410	141	373	376	230	97	370	66	218	190	74	146	0	158	199	195	362	249	391	227
LA MESA	93	305	30	131	223	111	125	127	112	88	120	80	177	155	0	68	226	239	259	271	130
MOGUERA	28	182	161	183	191	41	125	189	161	28	90	151	189	196	65	0	285	182	265	209	71
NEIVA	329	492	255	460	456	323	136	435	138	302	218	183	245	192	223	282	0	444	310	474	331
PAIPA	172	385	281	205	165	176	363	21	324	199	270	314	341	359	236	179	441	0	395	38	115
PUERTO BOYACÁ	279	493	255	371	355	256	67	410	240	224	268	211	111	246	256	262	307	392	0	431	251
SOGAMOSO	212	411	315	175	181	194	388	32	355	221	238	344	371	388	268	206	471	35	428	0	150
TOCANCIPÁ	66	248	165	142	155	71	244	130	210	87	213	201	221	224	127	68	328	112	248	147	0
TUNJA	197	351	231	105	101	145	330	60	294	170	224	288	311	329	210	190	410	43	373	74	83
UBATE	129	308	210	69	70	111	290	180	258	135	198	224	256	288	174	121	372	164	328	194	66
VILLAVICENCIO	183	49	274	330	332	221	365	322	291	210	224	288	345	327	241	132	381	302	398	330	201
VILLETÁ	131	341	195	131	127	96	131	261	227	82	187	244	192	227	164	112	354	243	169	258	129
ZIPAQUIRÁ	76	261	181	40	131	78	248	157	220	95	155	205	224	234	133	110	337	143	288	171	26

Nota: la matriz completa se encuentra en los anexos del trabajo

Tabla 18
matriz de distancias en kilómetros

ORIGEN/DES	BOGOT	ACACI	ANAPQ	CAJICA	CHIQUI	COTA	DORADA	DUITAM	ESPINAL	FACATATI	FUSAGA	GIRARDOT	HONDA	IBAGUE	LA MESA
BOGOTA	0	143	77	43	138	21,8	191	206	165	59	81	136	176	204	64
ACACIAS	143	0	220	186	281	164,8	334	349	308	202	224	279	319	347	207
ANAPOIMA	79,5	223	0	122,5	217,5	101,3	270,5	285,5	244,5	138,5	160,5	215,5	255,5	283,5	143,5
CAJICA	43	186	120	0	324	207,8	377	392	351	245	267	322	362	390	250
CHINQUINQU	138	281	215	181	0	159,8	329	344	303	197	219	274	314	342	202
COTA	20,8	164	97,8	63,8	158,8	0	211,8	226,8	185,8	79,8	101,8	156,8	196,8	224,8	84,8
DORADA	193	336	270	236	331	214,8	0	399	358	252	274	329	369	397	257
DUITAMA	206	349	283	249	344	227,8	397	0	371	265	287	342	382	410	270
ESPINAL	149	292	226	192	287	170,8	340	355	0	208	230	285	325	353	213
FACATATIVA	52	195	129	95	190	73,8	243	258	217	0	133	188	228	256	116
FUSAGASUG	71	214	148	114	209	92,8	262	277	236	130	0	207	247	275	135
GIRARDOT	145	288	222	188	283	166,8	336	351	310	204	226	0	321	349	209
HONDA	159	302	236	202	297	180,8	350	365	324	218	240	295	0	363	223
IBAGUE	204	347	281	247	342	225,8	395	410	369	263	285	340	380	0	268
LA MESA	62	205	139	105	200	83,8	253	268	227	121	143	198	238	266	0
MOSQUERA	15,2	158	92,2	58,2	153,2	37	206,2	221,2	180,2	74,2	96,2	151,2	191,2	219,2	79,2
NEIVA	320	463	397	363	458	341,8	511	526	485	379	401	456	496	524	384
PAIPA	193	336	270	236	331	214,8	384	399	358	252	274	329	369	397	257
PUERTO BOY	244	387	321	287	382	265,8	435	450	409	303	325	380	420	448	308
SOGAMOSO	221	364	298	264	359	242,8	412	427	386	280	302	357	397	425	285
TOCANCIPA	49	192	126	92	187	70,8	240	255	214	108	130	185	225	253	113
TUNJA	147	290	224	190	285	168,8	338	353	312	206	228	283	323	351	211
UBATE	94	237	171	137	232	115,8	285	300	259	153	175	230	270	298	158
VILLAVICENC	117	260	194	160	255	138,8	308	323	282	176	198	253	293	321	181
VILLET	92	235	169	135	230	113,8	283	298	257	151	173	228	268	296	156
ZIPAQUIRA	52	195	129	95	190	73,8	243	258	217	111	133	188	228	256	116

Nota: la matriz completa se encuentra en los anexos del trabajo

10 Resultados del modelo de solución

Al desarrollar el modelo se obtuvieron los siguientes resultados mostrando una solución, que cumple con las características de la distribución de la empresa las cuales son:

- Que los vehículos no excedan la capacidad de carga establecida por el fabricante la cual es de 5000 kilos.
- Las entregas deben realizarse a todos los clientes el mismo día que el vehículo sale de la bodega.
- Los vehículos deben retornar el mismo día a la bodega, es decir, que ningún vehículo está autorizado para permanecer por fuera de las instalaciones de la empresa.

10.1 Rutas del modelo

Cálculo de ahorros mediante algoritmo de Clarke & Wright

Tabla 19
matriz de ahorros. Elaboración propia

		221	127	64	183	27	247	188	182	61	118	#1	228	218	96	26	331
	BOGOTA	Acacias	apocima	Cajica	Chiquinquirá	Cota	Dorada	Duitama	Espinal	Facatativa	Fusagasuga	Girardot	Honda	Ibague	La Mesa	Mosquera	Neiva
221	Acacias	-	0	31	39	-6	18	33	48	25	41	49	19	50	22	70	69
127	Anapocima	-	-	35	44	30	173	34	206	68	43	239	194	211	187	-5	213
64	Cajica	-	-	-	114	-65	-59	80	-94	-85	-85	-89	-58	-98	36	-105	-73
183	Chiquinquirá	-	-	-	-	55	43	214	34	39	43	30	61	32	45	25	54
27	Cota	-	-	-	-	-	64	20	11	36	25	17	217	5	18	15	38
247	Dorada	-	-	-	-	-	-	61	336	185	175	260	435	366	215	145	439
188	Duitama	-	-	-	-	-	-	-	47	46	58	55	252	44	184	32	71
182	Espinal	-	-	-	-	-	-	-	-	150	206	319	270	332	183	44	372
61	Facatativa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69	69	118	59	66	56	87
118	Fusagasuga	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	211	156	144	91	51	228
172	Girardot	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	284	314	185	44	317
228	Honda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	298	144	62	311
218	Ibague	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157	46	355
96	La Mesa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54	201
26	Mosquera	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72
331	Neiva	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
177	Paipa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
306	Puerto Boyacá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
268	Sogamoso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	Tocancipa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
147	Tunja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
124	Ubaté	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
178	Vilavieja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
138	Villeta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	Zipaquirá	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: la matriz completa se encuentra en los anexos

Tabla 20
nuevas rutas propuestas por el modelo

Código punto	Nodo inicio	Nodo destino	Peso en kilos para cada destino	Total, entregas en kilos
14	Bogotá	La mesa	1.400	4.200
2	Bogotá	Anapoima	1.400	
13	Bogotá	Ibagué	1.400	
3	Bogotá	Cajicá	1.460	4.710
4	Bogotá	Chiquinquirá	1.300	
22	Bogotá	Ubaté	1.950	
7	Bogotá	Duitama	2.370	4.740
19	Bogotá	Sogamoso	2.370	
8	Bogotá	Espinal	1.925	4.575
10	Bogotá	Fusagasugá	1.350	
16	Bogotá	Neiva	1.300	
17	Bogotá	Paipa	2.100	4.200
5	Bogotá	Cota	2.100	
11	Bogotá	Girardot	1.950	4.025
18	Bogotá	puerto Boyacá	2.075	
15	Bogotá	Mosquera	3.600	5.000
24	Bogotá	Villeta	1.400	
20	Bogotá	Tocancipá	1.925	4.675
21	Bogotá	Tunja	1.350	
25	Bogotá	Zipaquirá	1.400	
1	Bogotá	Acacias	1730	3380
23	Bogotá	Villavicencio	1.650	
6	Bogotá	Dorada	2.075	4.490
9	Bogotá	Facatativá	765	
12	Bogotá	Honda	1.650	

11- validación del modelo

11.1 Comparación rutas actuales Vs rutas propuestas

*Tabla 21
comparativo de rutas actuales vs propuestas*

Ruta	Origen	Rutas actuales	Nuevas rutas
1	Bogotá	Anapoima, La mesa	la mesa Anapoima Ibagué
2	Bogotá	Chiquinquirá Ubaté	Cajicá Ubaté Chiquinquirá
3	Bogotá	Duitama paipa	Duitama Sogamoso
4	Bogotá	Espinal Fusagasugá	Fusagasugá Espinal Neiva
5	Bogotá	Facatativá Mosquera	Paipa Cota
6	Bogotá	Ibagué	Girardot puerto Boyacá
7	Bogotá	Neiva Girardot	Mosquera Villeta
8	Bogotá	Puerto Boyacá Dorada	Tocancipá Zipaquirá Tunja
9	Bogotá	Sogamoso Tunja Tocancipá	Villavicencio acacias
10	Bogotá	Villavicencio Acacias	Facatativá Honda Dorada
11	Bogotá	Honda Villeta	-
12	Bogotá	Zipaquirá Cajicá Cota	-

En la tabla 18 podemos observar, que las rutas propuestas por el algoritmo son 10 y las actuales de la empresa son 12 es decir que a simple vista se podría decir que la empresa necesitaría realizar dos rutas menos a las que se están desarrollando en la actualidad.

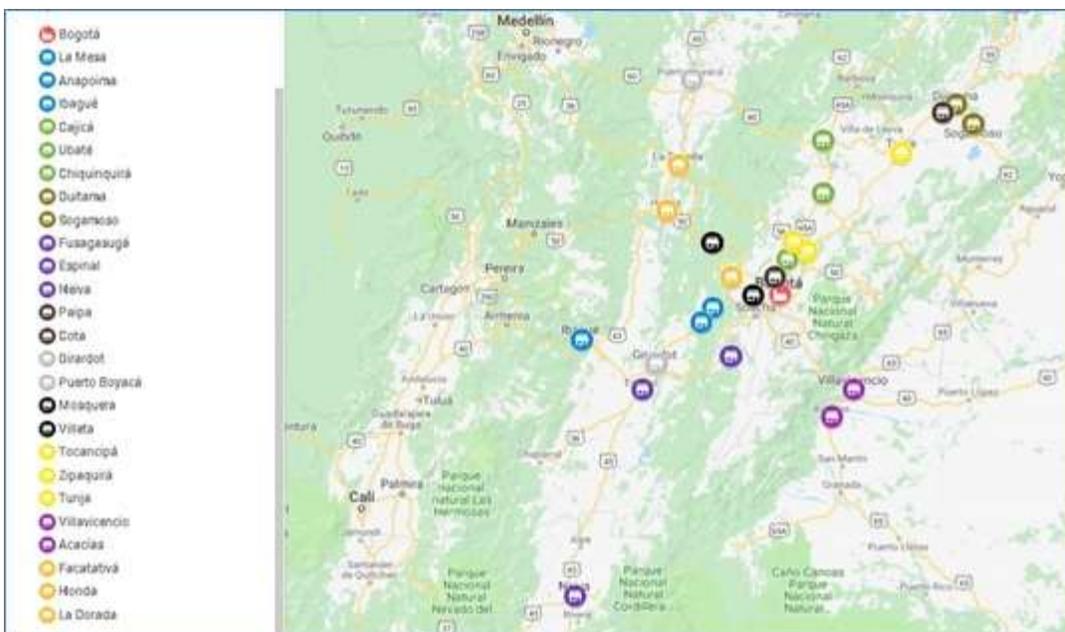


Figura 53 Unión de los nodos, nuevas rutas. Producción propia

11.2 Comparación de costos nuevas rutas



Figura 54 costos por ruta elaboración propia.

Basados en el nuevo modelo se generó un presupuesto promedio basado en la distribución actual de la empresa arrojando un resultado menor, generando una reducción de costos, comparado con el modelo de distribución actual, ya que se van a utilizar dos recursos menos para desarrollar la distribución la traba presentada a continuación evidencia la optimización en temas de costos que se presentaría al implementar este modelo en la empresa LA EMPERATRIZ S.A.S.

Tabla 22
costos nuevas rutas

Código punto	Nodo inicio	Nodo destino	Capacidad kls	\$ entrega	costo semanal	costo mensual
14	Bogotá	La mesa	\$ 75.000			
2	Bogotá	Anapoima	\$ 12.000			
13	Bogotá	Ibagué	\$ 200.000	\$ 287.000	\$ 574.000	\$ 2.296.000
3	Bogotá	Cajicá	\$ 50.000			
4	Bogotá	Chiquinquirá	\$ 20.000			
22	Bogotá	Ubaté	\$ 30.000	\$ 100.000	\$ 200.000	\$ 800.000
7	Bogotá	Duitama	\$ 290.000			
19	Bogotá	Sogamoso	\$ 30.000	\$ 320.000	\$ 640.000	\$ 2.560.000
8	Bogotá	Espinal	\$ 90.000			
10	Bogotá	Fusagasugá	\$ 80.000			
16	Bogotá	Neiva	\$ 140.000	\$ 310.000	\$ 620.000	\$ 2.480.000
17	Bogotá	Paipa	\$ 150.000			
5	Bogotá	Cota	\$ 40.000	\$ 190.000	\$ 380.000	\$ 1.520.000
11	Bogotá	Girardot	\$ 100.000			
18	Bogotá	puerto Boyacá	\$ 280.000	\$ 380.000	\$ 760.000	\$ 3.040.000
15	Bogotá	Mosquera	\$ 50.000			
24	Bogotá	Villeta	\$ 70.000	\$ 120.000	\$ 240.000	\$ 960.000
20	Bogotá	Tocancipá	\$ 50.000			
21	Bogotá	Tunja	\$ 110.000			
25	Bogotá	Zipacquirá	\$ 10.000	\$ 170.000	\$ 340.000	\$ 1.360.000
1	Bogotá	Acacias	\$ 270.000			
23	Bogotá	Villavicencio	\$ 30.000	\$ 300.000	\$ 600.000	\$ 2.400.000
6	Bogotá	Dorada	\$ 210.000			
9	Bogotá	Facatativá	\$ 60.000			
12	Bogotá	Honda	\$ 30.000	\$ 300.000	\$ 600.000	\$ 2.400.000
				TOTAL	\$ 4.954.000	\$ 19.816.000

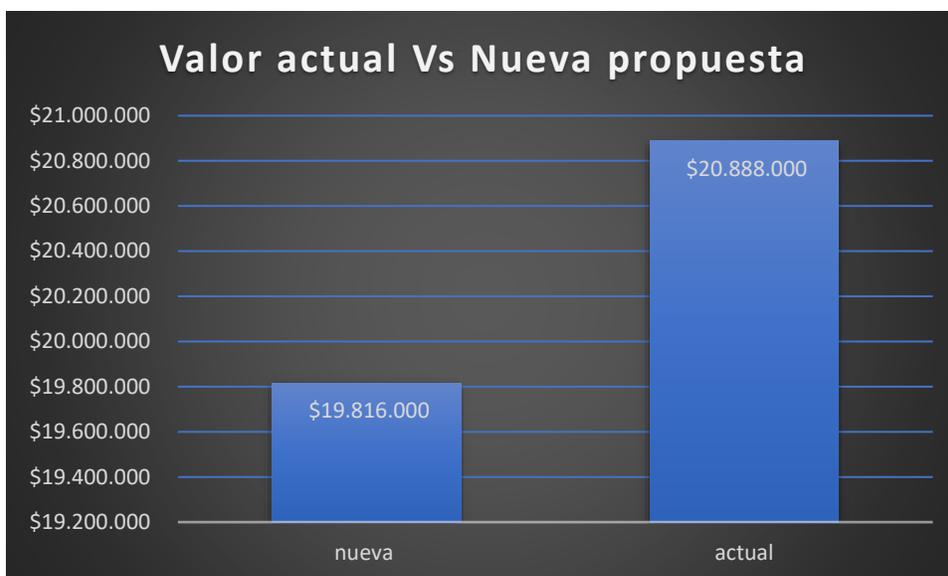


Figura 55 Comparativo de costos nuevas rutas vs actuales de la empresa

comparativo de costos actuales Vs nuevos. Fuente de elaboración propia

Analizando los resultados obtenidos podemos evidenciar que se presenta una reducción de costos del 5% con relación a los costos actuales de la empresa, lo cual demuestra que el modelo si presenta una mejoría con relación a los costos actuales, lo cual en el año generaría un ahorro promedio de \$12.864.000



Figura 56 representación porcentual del ahorro en el año. Fuente de elaboración propia.

Conclusiones

La aplicación del modelo matemático CVRP como una estrategia de mejora del proceso de distribución de las rutas dentro de la empresa La Emperatriz S.A.S., obtuvo una reducción de los recursos, que garantizan una distribución a un menor costo, logrando reducir la cantidad de vehículos utilizados.

Después de analizar las características de los diferentes algoritmos de solución para los modelos de CVRP, se determinó el método de ahorro de Clarke and Wright como uno de los más factibles para mejorar el esquema de entregas que deben seguir los vehículos dentro de su plan de distribución, ya que es un modelo que genera resultados en tiempos de procesamiento corto.

Con la utilización de programación de macros en Excel y el código del método de Clarke and Wright, fue posible encontrar una solución que garantiza una reducción de costos significativa para la empresa, al realizar una comparación entre los cuadros de distancia que existen entre diferentes nodos, arrojó como resultado una matriz de solución mejorada en los trayectos para cada vehículo según su posición geográfica.

La satisfacción de los clientes al momento de disminuir los recorridos, cumpliendo las restricciones programadas, afirma que el modelo CVRP fue una buena propuesta para determinar la distribución de su flota y el método de ahorro de Clarke and Wright, garantizo que se obtuvieran, costos menores en el desarrollo de la distribución, ya que se logran reducir las rutas, de 12 a 10 rutas, lo cual no solo genero un menor costo si no que adicional, se obtuvo una reducción de los recursos físicos y humanos que se requieren, para el desarrollo de la distribución.

Desarrollar un modelo de CVRP facilita la asignación de rutas, y garantiza que las capacidades de los vehículos estén acordes, a la cantidad de mercancía, en peso, y evita que se deba desarrollar un esquema de rutas de una manera, manual que pueda, generar costas más altos y desplazamientos que no sean necesarios.

Referencias

- Angel j; soler; hervas, (2002). The capacitated general routing problem on mixed graphs .Revista investigación operacional, volume 22, pages 31-42
- Baker; Ayechev, (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. Computers & Operational Research 30.
- Bianchessi (2007). Heuristics algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. Computers & Operations Research. Volumen 34, pages 112-124.
- Boctor, F; Renaud. (2000). The column-circular, subsets-selection problem: complexity and solutions. Computers & Operations Research 27.
- Bullnheimer, B., Hartl, R., Strauss, C. (1997). Applying the ant system to the vehicle routing problem. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Metaheuristics.
- Christofides, n., eilon, S., (1969). An Algorithm for the Vehicle Dispatching Problem.Operational Research Quarterly. Volume 20, pages 315-329.
- Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1979). The Vehicle Routing Problem. In: Combinatorial Optimization. Wiley, Chichester.
- Clarke, G; Wright, W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research 12.
- Cordeau, F; Desaulniers, G. (1999). Desrosiers, J., Solomon, M., Soumis, F.: The VRP with time windows. Technical Report Cahiers du GERAD G-99-13, ' Ecole des Hautes ' Etudes Commerciales de Montr' eal.
- Daza, j; Montoya, j; Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. Revista EIA, No. 12. pages 78 – 91.
- Duarte, Abraham. (2007). Metaheurísticas. Librería-Editorial Dykinson. Volumen 21 de Ciencias Experimentales y Tecnología.
- Dullaert, W; Janssens, G; Sorensen, K; Vernimmen, B. (2002). New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. Journal of the Operational Research Society 53.

Gallego, Ramón; Escobar, Antonio; Toro, Eliana. (2008). Técnicas metaheurísticas de optimización. Universidad Tecnológica de Pereira. Textos Universitarios, ISBN: 978-958-722-007-0.

Gambardella, L; Dorigo, M; Ant-Q: (1995). A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem. In: International Conference on Machine Learning.

Garey, M; Johnson, D. (1979). Computers and intractability: a guide to the theory of NP completeness. W. H. Freeman and Company.

Gendreau, M; Hertz, A; Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. Management Science 40.

Gendreau, M; Hertz, A; Laporte, G. (1992). New insertion and post optimization procedures for the traveling salesman problem. Operations Research 40.

Gendreau, m; Laporte, g; Musaraganyi, c; Taillard, e. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. Computers & Operations Research. Volume 26. pages 133-156.

Golden, B; LI, F; Wasil, E. (2007). A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem. Computers & Operations Research. Volume 33, issue 9, pages 2730-2751.

Hertz, A; Archetti, C; Speranza, M. (2006). A tabu search algorithm for the Split-delivery vehicle routing problem. Transportation Science: A journal of the institute for operations research and the management sciences. Volume 40, issue 1, pages 64-73.

Johnson, D; McGeoch, L. (1997). The Traveling Salesman Problem: a case study in local optimization. In: Local Search in Combinatorial Optimization. John Wiley and Sons.

Laporte, G; Louveaux, F; Hamme, L. (2002). An integer L-Shaped algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demand. Operations Research: A journal of the institute for operations research and the management sciences. Volumen 50, issue 3, pages 410-431.

Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. European Journal of Operational Research 59.

Lin, S; Kernighan, B. (1973). An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. Operations Research.

Rocha, Linda. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. Bogotá.

Lüer, Armin; Benavente, Magdalena; Bustos, Jaime; Venegas, Bárbara. (2009). El problema de rutas de vehículos: extensiones y métodos de resolución, estado del arte. En: Workshop Internacional EIG. (Universidad de la Frontera, Chile). Diciembre.

Mole, R.H; Jameson, S.R. (1976). A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion. *Operational Research Quarterly* 27.

Monroy, Néstor; Ahumada, Claudia. (2006). “Logística Reversa: Retos para la Ingeniería Industrial”. En: *Revista de ingeniería facultad de ingeniería Universidad de los Andes*. Noviembre.

Olivera, Alfredo. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. Montevideo, Uruguay. Universidad de la Republica. Facultad de ingeniería. Instituto de Computación. Page 63.

Ortega Mier, Miguel Ángel. (2008). Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Ralphs, T.K; Kopman, L; Pulleyblank, W.R; Trotter, L.E. (2001). On the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Mathematical Programming Series.B* 94, 343.

Rego, C; Roucariol, C. (1996). A parallel tabu search algorithm using ejection chains for the vehicle routing problem. In: *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers.

Toth, Paolo; Vigo, Daniele. (2002). Algoritmos y con destino a Rama para el VRP capacitado. *El problema de ruteo de vehículos*, vol. 9, pages. 26-56.

Volgenat, T; Jonker, R (1983). The symmetric traveling salesman problem and edge exchanges in minimal 1-tree. *European Journal of Operational Research*.

Anexo

Tabla 23
matriz de tiempos completa. Elaboración propia

ORIGEN/DESTINO	BOGOTÁ	ACACIAS	ANAPAIMA	CAJICA	CHINGUINGUIRA	COTA	DORADA	QUITAMA	ESPIRAL	FACATATIVA	FUSAGASUGA	GIRARDOT	HONDA	IBAGUÉ	LA MESA	MOGUERA	NEIVA	PAIPA	PUERTO BOYACÁ	SOGAMOSO	TOCANCIPÁ	TUNJA	UBATE	VILLAVICENCIO	VILLETÁ	ZIPAGUIRA
BOGOTÁ	0	221	127	64	183	27	247	198	182	61	118	172	228	219	96	26	331	177	306	209	70	147	124	179	139	76
ACACIAS	219	0	348	254	365	254	450	386	355	257	238	344	430	390	295	177	483	371	490	405	258	345	310	56	330	254
ANAPAIMA	135	356	0	156	266	124	201	291	103	120	202	60	161	135	36	158	245	275	261	302	171	224	200	271	305	179
CAJICA	69	301	161	0	133	156	370	182	340	210	267	325	350	381	124	195	458	208	360	180	135	108	68	341	128	40
CHINGUINGUIRA	202	401	271	131	0	155	387	167	331	205	258	325	350	370	234	184	450	155	365	175	167	95	71	330	131	122
COTA	24	267	126	165	165	0	210	205	198	52	120	182	38	241	105	38	320	180	245	201	62	155	118	210	105	72
DORADA	123	465	190	276	330	214	0	384	93	123	130	159	40	100	128	128	139	366	70	35	213	173	201	291	115	237
QUITAMA	201	388	238	179	167	211	381	0	333	213	258	315	174	373	130	192	458	24	413	35	213	173	201	291	115	237
ESPIRAL	198	351	93	345	341	206	90	330	0	93	94	35	140	69	115	164	141	327	243	358	213	173	201	291	115	237
FACATATIVA	65	261	123	202	201	131	120	210	90	0	110	164	171	221	31	31	305	202	227	224	90	173	201	291	115	237
FUSAGASUGA	127	302	198	270	260	143	187	255	91	107	0	79	130	193	123	93	221	273	271	301	216	227	201	291	115	237
GIRARDOT	176	351	67	320	317	181	156	312	32	161	76	0	116	77	83	154	186	317	214	347	204	291	227	291	115	237
HONDA	221	441	153	345	354	41	48	171	137	168	187	113	0	149	180	192	248	344	114	374	224	314	259	348	115	237
IBAGUÉ	223	430	141	373	376	230	97	370	66	218	130	74	146	0	158	199	195	362	249	331	227	332	291	330	230	237
LA MESA	99	305	90	131	223	111	125	127	112	88	120	80	117	155	0	68	226	239	259	271	130	213	177	244	167	136
MOGUERA	28	182	161	183	131	41	125	189	161	28	90	151	189	196	65	0	285	182	265	209	71	193	124	135	115	113
NEIVA	329	432	235	460	456	323	136	435	138	302	218	183	245	192	223	282	0	444	310	474	331	413	375	384	357	340
PAIPA	172	385	281	205	165	176	363	21	324	199	230	314	341	359	236	179	441	0	395	38	115	46	167	305	246	146
PUERTO BOYACÁ	279	433	253	371	355	256	67	410	240	224	268	211	111	246	256	262	307	392	0	431	251	376	331	401	172	291
SOGAMOSO	212	411	315	175	181	194	388	32	355	221	238	344	371	388	268	206	471	35	428	0	150	77	197	333	261	174
TOCANCIPÁ	66	248	163	142	155	71	244	130	210	87	213	201	221	224	127	68	328	112	249	147	0	86	69	204	132	29
TUNJA	197	351	231	105	101	145	330	60	234	110	224	288	311	329	210	190	430	43	373	74	83	0	133	257	214	132
UBATE	129	308	210	69	70	111	290	180	258	135	138	224	256	288	174	121	372	164	328	194	66	130	0	249	187	61
VILLAVICENCIO	183	49	274	330	332	221	385	322	231	210	224	288	345	327	241	132	391	302	338	330	201	254	246	0	260	214
VILLETÁ	131	341	195	131	127	96	131	261	227	82	187	244	112	227	164	112	354	243	169	258	129	211	184	257	0	191
ZIPAGUIRA	76	261	181	40	131	78	248	157	220	95	155	205	224	234	133	110	337	143	288	171	26	108	58	211	188	0

Tabla 24
matriz de distancias. Elaboración propia

ORIGEN/DES	BOGOT	ACACI	ANAP	CAJICA	CHIQUN	COTA	DORADA	DUITAM	ESPINAL	FACATAT	FUSAGA	GIRARDOT	HONDA	IBAGUE	LA MESA	MOSQUERA	NEIVA	PAIPA	PUERTO BOY	SOGAMOSO	TOCANCIPA	TUNJA	UBATE	VILLAVICENCIO	VILLET	ZIQAQUIRA
BOGOTA	0	143	77	43	138	21,8	191	206	165	59	81	136	176	204	64	12,7	309	192	241	220	51	147	94,5	116	90	51
ACACIAS	143	0	220	186	281	164,8	334	349	308	202	224	279	319	347	207	155,7	452	335	384	363	194	290	237,5	259	233	194
ANAPOIMA	79,5	223	0	122,5	217,5	101,3	270,5	285,5	244,5	138,5	160,5	215,5	255,5	283,5	143,5	92,2	388,5	271,5	320,5	299,5	130,5	227	174	195,5	169,5	130,5
CAJICA	43	186	120	0	324	207,8	377	392	351	245	267	322	362	390	250	198,7	495	378	427	406	237	333	280,5	302	276	237
CHINQUINQUE	138	281	215	181	0	159,8	329	344	303	197	219	274	314	342	202	150,7	447	330	379	358	189	285	232,5	254	228	189
COTA	20,8	164	97,8	63,8	158,8	0	211,8	226,8	185,8	79,8	101,8	156,8	196,8	224,8	84,8	33,5	329,8	212,8	261,8	240,8	71,8	168	115,3	136,8	110,8	71,8
DORADA	193	336	270	236	331	214,8	0	399	358	252	274	329	369	397	257	205,7	502	385	434	413	244	340	287,5	309	283	244
DUITAMA	206	349	283	249	344	227,8	397	0	371	265	287	342	382	410	270	218,7	515	398	447	426	257	353	300,5	322	296	257
ESPINAL	149	292	226	192	287	170,8	340	355	0	208	230	285	325	353	213	161,7	458	341	390	369	200	296	243,5	265	239	200
FACATATIVA	52	195	129	95	190	73,8	243	258	217	0	133	188	228	256	116	64,7	361	244	293	272	103	199	146,5	168	142	103
FUSAGASUGO	71	214	148	114	209	92,8	262	277	236	130	0	207	247	275	135	83,7	380	263	312	291	122	218	165,5	187	161	122
GIRARDOT	145	288	222	188	283	166,8	336	351	310	204	226	0	321	349	209	157,7	454	337	386	365	196	292	239,5	261	235	196
HONDA	159	302	236	202	297	180,8	350	365	324	218	240	295	0	363	223	171,7	468	351	400	379	210	306	253,5	275	249	210
IBAGUE	204	347	281	247	342	225,8	395	410	369	263	285	340	380	0	268	216,7	513	396	445	424	255	351	298,5	320	294	255
LA MESA	62	205	139	105	200	83,8	253	268	227	121	143	198	238	266	0	74,7	371	254	303	282	113	209	156,5	178	152	113
MOSQUERA	15,2	158	92,2	58,2	153,2	37	206,2	221,2	180,2	74,2	96,2	151,2	191,2	219,2	79,2	0	324,2	207,2	256,2	235,2	66,2	162	109,7	131,2	105,2	66,2
NEIVA	320	463	397	363	458	341,8	511	526	485	379	401	456	496	524	384	332,7	0	512	561	540	371	467	414,5	436	410	371
PAIPA	193	336	270	236	331	214,8	384	399	358	252	274	329	369	397	257	205,7	502	0	434	413	244	340	287,5	309	283	244
PUERTO BOYACÁ	244	387	321	287	382	265,8	435	450	409	303	325	380	420	448	308	256,7	553	436	0	464	295	391	338,5	360	334	295
SOGAMOSO	221	364	298	264	359	242,8	412	427	386	280	302	357	397	425	285	233,7	530	413	462	0	272	368	315,5	337	311	272
TOCANCIPA	49	192	126	92	187	70,8	240	255	214	108	130	185	225	253	113	61,7	358	241	290	269	0	196	143,5	165	139	100
TUNJA	147	290	224	190	285	168,8	338	353	312	206	228	283	323	351	211	159,7	456	339	388	367	198	0	241,5	263	237	198
UBATE	94	237	171	137	232	115,8	285	300	259	153	175	230	270	298	158	106,7	403	286	335	314	145	241	0	210	184	145
VILLAVICENCIO	117	260	194	160	255	138,8	308	323	282	176	198	253	293	321	181	129,7	426	309	358	337	168	264	211,5	0	207	168
VILLET	92	235	169	135	230	113,8	283	298	257	151	173	228	268	296	156	104,7	401	284	333	312	143	239	186,5	208	0	143
ZIQAQUIRA	52	195	129	95	190	73,8	243	258	217	111	133	188	228	256	116	64,7	361	244	293	272	103	199	146,5	168	142	0

