

PROPUESTA DE UN MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS CONSIDERANDO
VENTANAS DE TIEMPO Y FLOTA HOMOGÉNEA PARA UNA DISTRIBUIDORA
DE FRUTAS DE NORTE DEL VALLE.

CÉSAR EDUARDO LÓPEZ CARDONA
DIEGO FERNANDO DÍAZ CAMACHO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

PROPUESTA DE UN MODELO DE RUTEO DE VEHÍCULOS CONSIDERANDO
VENTANAS DE TIEMPO Y FLOTA HOMOGÉNEA PARA UNA DISTRIBUIDORA
DE FRUTAS DE NORTE DEL VALLE.

CÉSAR EDUARDO LÓPEZ CARDONA
DIEGO FERNANDO DÍAZ CAMACHO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR
Msc. CARLOS ALBERTO ROJAS TREJOS

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Zarzal, Marzo de 2017

DEDICATORIA

Quiero dedicar este Trabajo en primera instancia a mis hermanos, Yeison Andrés López Cardona y Daira Valeria López Cardona, con el ánimo de inculcar en ellos la responsabilidad y esfuerzo que se debe de tener a la hora de cumplir los objetivos que nos tracemos en la vida, y que por más obstáculos que se presenten a lo largo de nuestro caminar, siempre se debe dar mucho más de lo que nosotros esperamos, con el fin de librar esas duras batallas que día a día vamos a enfrentar.

A mis padres Valvanera Cardona Montoya y Julio César López Cardona, que con su ejemplo y cariño lograron formarme como una persona de bien, y en este escrito se ve todo el empeño que pusimos como familia para lograr esa meta que hace 5 años atrás nos propusimos y el día de hoy está llegando a feliz término.

CÉSAR EDUARDO LÓPEZ CARDONA.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado en primer lugar a Dios por permitirme el haber llegado a este momento tan importante de mi vida y formación profesional, a todas las personas que de algunas u otra manera aportaron positivamente al desarrollo y termino de él.

A mi familia por su apoyo incondicional, por sus sabios consejos dados a lo largo de este proceso.

A mis amigos Cesar López, Hugo Franco, Cesar Suarez, Daniela Betancourt y Felipe Marín por el gran equipo que formamos en el transcurso de este pequeño camino.

A mi compañero de trabajo de grado Cesar Eduardo López Cardona, que sin su dedicación, compromiso y esfuerzo no hubiera sido lo mismo, por su apoyo y conocimiento hicieron de esta experiencia una de las más importantes y en especial al profesor Carlos Alberto Rojas Trejos, agradezco por su apoyo, sus horas de dedicación, paciencia y oportunos consejos.

DIEGO FERNANDO DÍAZ CAMACHO

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por darme el tiempo y poder llegar a cumplir esta meta de ser un profesional íntegro, de proveerme de sabiduría y entendimiento y así poder afrontar muchas barreras en mi vida.

Agradecer a mi familia, padres, hermanos, abuelos, tíos y primos, que me ayudaron durante todo este proceso de formación, brindándome siempre ese apoyo y cariño, que me basto para culminar de manera satisfactoria este objetivo a largo plazo.

Al Msc. Carlos Alberto Rojas Trejos, por todo ese acompañamiento que nos brindó desde quinto semestre y más en este último año que nos dedicó su tiempo y compartió conocimiento con el fin de realizar este Trabajo.

A mis compañeros de clase, que durante 5 años fuimos una familia que compartió momentos tanto felices como tristes, pero que al final llegamos a esta etapa juntos y pudiendo decir Lo Logramos.

A mi novia Isabella López, que con su cariño y ayuda, logro contribuir con este proyecto que hoy culmina.

A mis amigos Hugo Franco, Daniela Betancourt, Paola Andrea Galeano, César Suárez y mi compañero de Trabajo de Grado Diego Díaz, les quiero dar las Gracias por todos los momentos que compartimos, porque más allá de ser compañeros de clase formamos una gran amistad; y diciéndoles, que siempre vamos a llevar en nuestros corazones a Felipe Marín, que un día se nos adelantó pero siempre quedará en nuestros pensamientos y recuerdos.

A todos Muchas Gracias.

CÉSAR EDUARDO LÓPEZ CARDONA.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios por cuidarme y proveerme todo lo necesario hasta el día de hoy para cumplir cada uno de mis proyectos y por bendecir mi vida brindándome la posibilidad de formarme como profesional.

En las siguientes líneas quisiera agradecer a una pequeña parte de las personas que han participado en mi vida, y por qué no decirlo, en este recuerdo.

A mi madre Luz Stella Díaz Camacho que durante 22 años ha estado presente en mi vida inculcándome valores sólidos y principios fundamentales que debieran regir la vida de cualquier persona de bien, que ha sido un apoyo fundamental en todo este proceso.

A mis abuelos Fabio Díaz, Gustavo Rizo, Marleny Camacho y María Villada por el apoyo durante todo el proceso y darme la confianza y tranquilidad para emprender el camino a alcanzar mis sueños.

A mis tías Olga Díaz y María Díaz que me han dado su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

A mis hermanos Hernán Díaz y Diana Osorio que con su cariño me dieron a entender que siempre estarán ahí presente para cuando los necesite.

A mi padrino Cesar Ramos por ser ese segundo padre que nunca tuve, por sus consejos y apoyo.

A mi novia Mayra Arenas por brindarme su amor y comprensión incondicional.

A todos los profesores del pregrado de ingeniería industrial, por todos los conocimientos que me han compartido. En especial a mi asesor de tesis, MSC en Ingeniería industrial Carlos Alberto Rojas Trejos por el enorme apoyo, sus sabios consejos y paciencia brindados.

Finalmente agradezco a mis amigos, Cesar López, Hugo Franco, Cesar Suarez, Daniela Betancourt y Felipe Marín, que siempre estuvimos juntos en las buenas y en las malas, por la motivación que siempre me daban cuando ya la había perdido, por sus consejos, apoyo con ellos aprendí el verdadero significado de la palabra amistad, y ellos conmigo conocieron el de la paciencia, muchas gracias por su amistad.

DIEGO FERNANDO DÍAZ CAMACHO.

RESUMEN

El presente trabajo propone un modelo de Ruteo de Vehículos considerando ventanas de tiempos, con el fin de minimizar los costos logísticos de distribución de una empresa distribuidora de frutas del Norte del Valle del Cauca, asignando un total de 22 clientes a unas rutas específicas de entrega, tomando en cuenta una flota homogénea de vehículos y restricciones horarias de entrega de producto.

Se propone el modelo de Cordone Y Wolfler (2001), para dar solución a la problemática actual de distribución, programándose el modelo en el lenguaje de programación AMPL (A Mathematical Programming Language), utilizándose el solver GUROBI bajo la plataforma del NEOS SOLVER OPTIMIZATION. Se realizaron tres corridas para programar las rutas en los días lunes, miércoles y viernes en los cuales se realizan los despachos de producto, evidenciándose una disminución aproximada del 12% del Costo Total de la Ruta por Semana. Este trabajo, pretende demostrar como la optimización de rutas a través de la programación matemática, puede reducir los costos totales de la Logística de Distribución de una empresa.

Palabras Claves: Ruteo de Vehículos, Ventanas de Tiempo, Programación Matemática, Optimización, Logística de Distribución.

ABSTRACT

In the present paper proposes a vehicle routing problem consider time windows (VRPTW), in order to minimize the logistic costs of distribution of a fruit distribution company in the North of Valle del Cauca, assigning a total of 22 clients to specific delivery routes, taking into account a homogeneous fleet of vehicles and time restrictions of product delivery.

The model of Cordone and Wolfler (2001) is proposed, to solve the current problem of distribution, programming the model in the programming language AMPL (A Mathematical Programming Language), using the GUROBI solver under the NEOS SOLVER OPTIMIZATION platform. Three races were carried out to schedule the routes on Mondays, Wednesdays and Fridays, in which the product dispatches were carried out, evidencing a decrease of approximately 12% of the Total Cost of the Route per Week. This paper, intended to demonstrate how optimizing routes through mathematical programming, can reduce the total costs of a company's Distribution Logistics.

Key Words: Vehicle Routing, Time Windows, Mathematical Programming, Optimization, Distribution Logistics.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN -----	19
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA -----	20
2 OBJETIVOS -----	22
2.1 Objetivo General: -----	22
2.2 Objetivos Específicos:-----	22
3 JUSTIFICACIÓN -----	23
4 MARCO DE REFERENCIA-----	24
4.1 MARCO TEÓRICO-----	24
4.1.1 Problema de Ruteo de Vehículos:-----	24
4.1.2 VARIANTES DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS -----	25
4.1.2.1 El Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem – TSP)	25
4.1.2.2 Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (Capacitated – CVRP)	26
4.1.2.3 Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRP with TIME WINDOWS – VRP) -----	27
4.1.2.4 Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos (Multiple Depot – MDVRP)-----	27
4.1.2.5 Problema de Ruteo de Vehículos con Retornos (Backbauls – VRPB)	28
4.1.2.6 Problema de Ruteo de Vehículos Periódico (Periodic – VRP)-----	28
4.1.2.7 Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea (Multiple Types of Vehicles) -----	29
4.1.2.8 Problema de Ruteo de Vehículos Estocástico (Stochastic – VRP)---	29
4.1.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS-----	30
4.1.3.1 Métodos Exactos. -----	30
4.1.3.1.1 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN (Branch and Bound):	30
4.1.3.1.2 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y CORTE (Branch and Cut):-----	30
4.1.3.1.3 LA DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS:-----	30

4.1.3.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS	31
4.1.3.2.1	HEURÍSTICA DE INSERCIÓN:	31
4.1.3.2.2	HEURÍSTICA R:	32
4.1.3.2.3	HEURÍSTICA DE DOS FASES:	32
4.1.3.3	MÉTODOS METAHEURÍSTICOS	33
4.1.3.3.1	ALGORITMOS DE BÚSQUEDA TABÚ:	33
4.1.3.3.2	ALGORITMOS GENÉTICOS:	34
4.1.3.3.3	RECOCIDO SIMULADO:	34
4.1.3.3.4	BÚSQUEDA DISPERSA:	35
4.2	ESTADO DEL ARTE	36
4.3	MARCO CONCEPTUAL	43
4.3.1	Transporte:	43
4.3.2	Cadena de Abastecimiento:	43
4.3.3	Gestión de la Cadena de Abastecimiento:	43
4.3.4	Logística de Transporte:	43
4.3.5	Gestión del Transporte:	44
4.3.6	Costos:	45
4.3.7	Confiabilidad del Medio de Transporte:	45
4.3.8	Selección del Modo de Transporte:	45
4.3.9	Transporte Terrestre:	45
4.3.10	Tipos de Vehículos:	45
4.3.11	Opciones Básicas del Transporte:	50
4.3.12	Costos del Transporte Terrestre:	51
4.3.13	Tipos de Vehículos.	52
5	DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA	53
5.1	Descripción de la Empresa:	53
5.2	Estructura Organizacional:	53
5.3	Logística de Distribución:	55
	Procesos de la Organización:	55
5.3.1	Tipos de Producto:	57
5.3.2	Operación Actual del Sistema de Distribución:	59
5.3.3	Clientes:	60
5.3.4	Distancia:	64
5.3.5	Vehículos:	66

5.3.6	Demanda:	68
5.3.7	Costos Operacionales de Transporte.	69
6	DEFINICIÓN DEL MODELO	74
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
7.1	Resultados de la Solución del Modelo.	79
7.1.1	Día lunes.	79
7.1.2	Día miércoles.	89
7.1.3	Día Viernes.	97
7.2	Comparación con el Sistema Actual de Distribución.	106
7.2.1	Desempeño del Modelo.	110
7.2.2	Análisis de Sensibilidad.	111
7.2.2.1	Escenario 1:	111
7.2.2.2	Escenario 2:	117
7.2.2.3	Escenario 3:	122
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	139
	BIBLIOGRAFÍA.	141
	ANEXOS	145

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. MODELO VRP. -----	24
FIGURA 2. GRAFO DEL PROBLEMA DEL AGENTE. -----	26
FIGURA 3. ORGANIGRAMA. -----	54
FIGURA 4. PROCESO ORGANIZACIONAL. -----	56
FIGURA 5. LOGÍSTICA DE DESPACHO. -----	60
FIGURA 6. UBICACIÓN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN REAL. -----	62
FIGURA 7. RUTA PRIMARIA A LA CIUDAD DE CALI. -----	63
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE CLIENTES. -----	64
FIGURA 9. HINO 300 DUTRO MAX. -----	67
FIGURA 10. RUTA ÓPTIMA DE DISTRIBUCIÓN – DÍA LUNES. -----	79
FIGURA 11. VENTANAS DE TIEMPO - DÍA LUNES. -----	82
FIGURA 12. RUTA ÓPTIMA 1 – DÍA LUNES. -----	84
FIGURA 13. RUTA ÓPTIMA 2 – DÍA LUNES. -----	85
FIGURA 14. RUTA ÓPTIMA DE DISTRIBUCIÓN – DÍA MIÉRCOLES. -----	89
FIGURA 15. VENTANAS DE TIEMPO - DÍA MIÉRCOLES. -----	91
FIGURA 16. RUTA ÓPTIMA 1 – DÍA MIÉRCOLES. -----	92
FIGURA 17. RUTA ÓPTIMA 2 – DÍA MIÉRCOLES. -----	93
FIGURA 18. RUTA ÓPTIMA DE DISTRIBUCIÓN – DÍA VIERNES. -----	97
FIGURA 19. VENTANAS DE TIEMPO - DÍA VIERNES. -----	99
FIGURA 20. RUTA ÓPTIMA 1 – DÍA VIERNES. -----	101
FIGURA 21. RUTA ÓPTIMA 2 – DÍA VIERNES. -----	102
FIGURA 22. RUTA ÓPTIMA – ESCENARIO 1. -----	111
FIGURA 23. VENTANAS DE TIEMPO – ESCENARIO 1. -----	114
FIGURA 24. RUTA ÓPTIMA 1 – ESCENARIO 1. -----	115
FIGURA 25. RUTA ÓPTIMA 2 – ESCENARIO 1. -----	115
FIGURA 26. RUTA ÓPTIMA 3 – ESCENARIO 1. -----	116
FIGURA 27. RUTA ÓPTIMA – ESCENARIO 2. -----	117
FIGURA 28. VENTANAS DE TIEMPO – ESCENARIO 2. -----	120
FIGURA 29. RUTA ÓPTIMA 1 – ESCENARIO 2. -----	120
FIGURA 30. RUTA ÓPTIMA 2 – ESCENARIO 2. -----	121
FIGURA 31. VENTANAS DE TIEMPO – INCREMENTO 10%. -----	124
FIGURA 32. VENTANAS DE TIEMPO – INCREMENTO 20%. -----	125
FIGURA 33. VENTANAS DE TIEMPO – INCREMENTO 30%. -----	125
FIGURA 34. VENTANAS DE TIEMPO – INCREMENTO 40%. -----	126
FIGURA 35. VENTANAS DE TIEMPO – INCREMENTO 30%. -----	126
FIGURA 36. RUTA ÓPTIMA 1 – INCREMENTO 10%. -----	127

FIGURA 37. RUTA ÓPTIMA 2 – INCREMENTO 10%.	128
FIGURA 38. RUTA ÓPTIMA 3 – INCREMENTO 10%.	129
FIGURA 39. RUTA ÓPTIMA 1 – INCREMENTO 20%.	129
FIGURA 40. RUTA ÓPTIMA 2 – INCREMENTO 20%.	130
FIGURA 41. RUTA ÓPTIMA 3 – INCREMENTO 20%.	131
FIGURA 42. RUTA ÓPTIMA 1 – INCREMENTO 30%.	131
FIGURA 43. RUTA ÓPTIMA 2 – INCREMENTO 30%.	132
FIGURA 44. RUTA ÓPTIMA 3 – INCREMENTO 30%.	133
FIGURA 45. RUTA ÓPTIMA 1 – INCREMENTO 40%.	133
FIGURA 46. RUTA ÓPTIMA 2 – INCREMENTO 40%.	134
FIGURA 47. RUTA ÓPTIMA 3 – INCREMENTO 40%.	134
FIGURA 48. VENTANAS DE TIEMPO – DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA. ---	136
FIGURA 49. RUTA ÓPTIMA 1 – DISMINUCIÓN EN LA DEMANDA. ---	137
FIGURA 50. RUTA ÓPTIMA 2 – DISMINUCIÓN EN LA DEMANDA. ---	137
FIGURA 51. RUTA ÓPTIMA 2 – DISMINUCIÓN EN LA DEMANDA (CONTINUACIÓN).	138

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COSTOS ACTUALES DE DISTRIBUCIÓN. -----	21
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS DE CARGA. -----	47
TABLA 3. FRUTAS. -----	57
TABLA 4. VERDURAS. -----	58
TABLA 5. OTROS PRODUCTOS. -----	58
TABLA 6. LISTADO DE CLIENTES. -----	61
TABLA 7. MATRIZ DE DISTANCIAS (KM). -----	65
TABLA 8. MATRIZ DE TIEMPOS (MIN). -----	65
TABLA 9. ESPECIFICACIONES DE LOS VEHÍCULOS. -----	66
TABLA 10. DEMANDA DE CLIENTES (KG). -----	68
TABLA 11. COSTOS VARIABLES. -----	69
TABLA 12. COSTOS FIJOS. -----	70
TABLA 13. MATRIZ DE COSTOS VARIABLES (\$/KM): -----	71
TABLA 14. MATRIZ DE VENTANAS DE TIEMPO. -----	72
TABLA 15. TIEMPOS DE SERVICIO (MIN). -----	73
TABLA 16. RESUMEN DE RESULTADOS. -----	74
TABLA 17. TIEMPOS RUTA 1 - DÍA LUNES. -----	82
TABLA 18. TIEMPOS RUTA 2 - DÍA LUNES. -----	83
TABLA 19. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 1 - DÍA LUNES. -----	86
TABLA 20. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 2 - DÍA LUNES. -----	86
TABLA 21. CARGA DEL VEHÍCULO 1 - DÍA LUNES. -----	87
TABLA 22. CARGA DEL VEHÍCULO 2 - DÍA LUNES. -----	87
TABLA 23. ESTRUCTURA DE COSTOS RUTA - DÍA LUNES. -----	88
TABLA 24. TIEMPOS RUTA 1 - DÍA MIÉRCOLES. -----	91
TABLA 25. TIEMPOS RUTA 2 - MIÉRCOLES. -----	92
TABLA 26. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 1 - DÍA MIÉRCOLES. -----	94
TABLA 27. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 2 - DÍA MIÉRCOLES. -----	94
TABLA 28. CARGA DEL VEHÍCULO 1 - DÍA MIÉRCOLES. -----	95
TABLA 29. CARGA DEL VEHÍCULO 2 - DÍA MIÉRCOLES. -----	95
TABLA 30. ESTRUCTURA DE COSTOS RUTA - DÍA MIÉRCOLES. -----	96
TABLA 31. TIEMPOS RUTA 1 - DÍA VIERNES. -----	100
TABLA 32. TIEMPOS RUTA 2 - DÍA MIÉRCOLES. -----	100
TABLA 33. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 1 - DÍA VIERNES. -----	102
TABLA 34. DISTANCIA TOTAL VEHÍCULO 2 - DÍA MIÉRCOLES. -----	103
TABLA 35. CARGA DEL VEHÍCULO 1 - DÍA VIERNES. -----	103
TABLA 36. CARGA DEL VEHÍCULO 1 - DÍA VIERNES. -----	104

TABLA 37.	ESTRUCTURA DE COSTOS RUTA - DÍA MIÉRCOLES.	-----105
TABLA 38.	COSTOS DISTRIBUCIÓN ACTUAL - DÍA LUNES.	-----106
TABLA 39.	COSTOS DISTRIBUCIÓN ACTUAL - DÍA MIÉRCOLES.	-----107
TABLA 40.	COSTOS DISTRIBUCIÓN ACTUAL - DÍA VIERNES.	-----108
TABLA 41.	COMPARACIÓN DE COSTOS.	-----109
TABLA 42.	DESEMPEÑO COMPUTACIONAL DEL MODELO.	-----110
TABLA 43.	ESCENARIO 1.	-----111
TABLA 44.	ESCENARIO 2.	-----117
TABLA 45.	VEHÍCULOS - ESCENARIO 3.	-----123
TABLA 46.	AUMENTO EN LA DEMANDA -ESCENARIO 3.	-----123
TABLA 47.	RESUMEN ESCENARIO 3 - INCREMENTO EN LA DEMANDA.	----124
TABLA 48.	DISMINUCIÓN EN LA DEMANDA - ESCENARIO 3.	-----135

INTRODUCCIÓN

En la actualidad a nivel nacional se entrega una enorme cantidad de productos en diferentes puntos de una ciudad, teniendo como base una salida que es el centro de distribución, es allí donde la logística de distribución juega un papel importante ya que se debe determinar el número de vehículos que se requieren para la entrega de los bienes a los clientes y las diferentes rutas a seguir, con el fin de minimizar el costo de transporte.

El diseño de rutas es una de las operaciones más importantes para la planeación y ejecución de la distribución de materia prima, insumos y producto terminado, ya que permite a las organizaciones entregar sus productos en el lugar y momento requerido por los clientes.

Una adecuada logística de distribución aumenta el nivel de servicio de los clientes, llevando directamente a un incremento en las ventas, un mayor porcentaje de participación en el mercado y contribuye en la disminución de costos.

El modelo VRPTW, Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo por sus siglas en inglés, es una variante del problema original VRP (Vehicle Routing Problem), donde clientes ubicados en una zona geográfica, deben ser servidos en un tiempo determinado por una flota de vehículos con capacidad limitada, que parten de un depósito central, hacen un recorrido específico y regresan nuevamente al depósito, teniendo en cuenta que cada uno de los clientes impone una restricción temporal o también llamada ventana de tiempo, donde se permite el servicio de entrega o despacho.

Para ello, en el presente trabajo se desarrollará el planteamiento del problema, el diagnóstico de la empresa de la empresa caso de estudio, la propuesta del modelo matemático, los resultados y el análisis de sensibilización de las variables críticas del proceso de distribución.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El transporte de materia prima, insumos y producto terminado representa la actividad más importante en términos de costo logístico dentro de la cadena de suministro; se ha observado que el movimiento de carga representa entre uno y dos tercios de los costos totales logísticos de una empresa (Ballou, 2004). Los costos asociados con el transporte están involucrados directamente con la relación que se tiene con los proveedores, centros de distribución y clientes.

El sistema de transporte debe integrar las principales zonas de producción y de consumo del país, y por lo tanto, la demanda y los costos de transporte tienen un papel importante en la determinación del precio final del producto. (Acosta de Valencia, 2004)

En Colombia, el transporte de carga es un pilar fundamental, que permite que un producto llegue al consumidor final, genere la circulación de bienes y dinamice la economía. El transporte, almacenamiento y comunicaciones son elementos clave de la cadena logística nacional, ha tenido durante los últimos años una contribución al PIB sostenida en el rango del 7% - 8%. (Recuperado de www.dane.gov)

El Valle del Cauca basa su economía principalmente en los sectores de prestación de servicios, industria y sector agropecuario, donde la logística de transporte toma un lugar importante en estos dos últimos sectores, ya que se tienen que tomar decisiones óptimas como asignación de vehículos a cada ruta al momento de despachar un pedido hacia los clientes, minimizando así tiempos y distancias de recorrido, criterios que serán reflejados en los costos de transporte de las empresas. En el 2010 la participación del subsector transporte en el Valle del Cauca tuvo una participación en el PIB del 8.5%. (Recuperado de www.dane.gov)

La empresa caso estudio ubicada en el Norte del Valle del Cauca, se dedica a la comercialización y distribución de frutas al interior del departamento; la empresa cuenta con una flota propia de vehículos con capacidad limitada, también posee una cantidad de clientes dispersos geográficamente, cada uno con una demanda conocida que se debe satisfacer dentro de un lapso de tiempo u horario de recibo determinado, esta restricción se conoce como Ventanas de Tiempo.

Actualmente, el sistema de transporte de la empresa caso de estudio presenta una serie de problemas, debido a que la asignación de rutas se genera de manera empírica con base al criterio y experiencia de la persona que programa las diferentes rutas que deben cumplir los vehículos y el conductor, lo cual genera un

costo representativo en la distribución de los productos desde el centro de distribución a cada detallista, además puede generar un impacto en el nivel de servicio ya que muchas veces se incurre en el incumplimiento de los lapsos de tiempo pactados de antemano con el cliente, llevando a que en algunas ocasiones los clientes rechacen la carga y no establezcan relaciones comerciales con la empresa caso de estudio.

Actualmente, los costos de distribución total de la empresa, en un periodo comprendido de una semana es la siguiente.

Tabla 1. Costos Actuales de Distribución.

COSTOS TOTALES DEL SISTEMA ACTUAL DE DISTRIBUCIÓN		
COSTOS VARIABLES		
COMPONENTE DE COSTOS	ruta 1	ruta 2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	\$ 684,294.12	\$ 687,353.16
CONSUMO DE LLANTAS	\$ 194,966.86	\$ 195,606.62
CONSUMO DE LUBRICANTES	\$ 48,357.73	\$ 48,516.41
CONSUMO DE FILTROS	\$ 13,360.24	\$ 13,404.08
MENTENIMIENTO Y REPARACIONES	\$ 280,650.37	\$ 281,571.29
LAVADO Y ENGRASE	\$ 34,107.62	\$ 34,219.04
IMPUESTOS	\$ 42,860.04	\$ 43,000.68
TOTAL	\$ 1,298,596.98	\$ 1,303,671.28
COSTOS FIJOS		
SEGUROS	\$ 210,385.50	\$ 210,385.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 314,093.07	\$ 314,093.07
PEAJES	\$ 114,000.00	\$ 114,000.00
TOTAL	\$ 638,478.57	\$ 638,478.57
COSTO TOTAL DE LA RUTA	\$	3,879,225.40

Fuente: Los Autores.

Con base en lo anterior, se ve necesaria la Propuesta de un modelo de optimización que busque minimizar el costo Total de distribución de la empresa caso de estudio.

En el capítulo siguiente, se establece el Objetivo General y Específicos para este proyecto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

Proponer un modelo de ruteo de vehículos que contribuya a minimizar los costos totales de distribución de una empresa distribuidora de frutas del Norte del Valle del Cauca considerando Ventanas de Tiempo y una flota homogénea.

2.2 Objetivos Específicos:

- ✓ Realizar un diagnóstico del sistema actual de distribución de la empresa caso de estudio.
- ✓ Definir un modelo matemático de distribución de productos que considere restricciones de capacidad, número de vehículos, horarios de recibo y demanda de puntos de venta.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos del modelo frente a los costos logísticos relacionados con el sistema actual de distribución de la empresa objeto de estudio.
- ✓ Realizar un análisis de sensibilidad del modelo frente a la variación de la demanda en puntos de venta y cantidad de vehículos.

3 JUSTIFICACIÓN

El transporte dentro de la cadena de suministro juega un papel importante ya que es el responsable de mover la materia prima y producto terminado entre cada eslabón (Proveedores, Fábricas, Centros de Distribución y Consumidor final), agregando valor a los productos transportados cuando estos son entregados a tiempo y en buen estado.

Actualmente, la logística de transporte dentro de una empresa tiene un fuerte impacto dentro de su economía, ya que éste representa entre uno a dos tercios de los costos logísticos de la empresa, convirtiéndose en un factor muy importante a la hora de determinar el precio de los diferentes productos que se comercializan (Ballou, 2004).

Por ésta razón, aquellas empresas que sean más eficientes en la gestión del transporte, tendrá como resultado una ventaja competitiva ya que está en capacidad de entregar productos a tiempo, al precio correcto y con la calidad adecuada, generando un nivel de servicio aceptable.

Una buena estrategia de distribución implica el conocimiento de los diferentes medios de transporte que se van a utilizar, el análisis de la demanda de cada cliente y asociarla a un modo de transporte específico, la planificación de las rutas y el seguimiento del impacto ambiental, minimizando tiempos y costos de entrega de un producto.

Mediante una adecuada logística de transporte, se tiene un aumento en la competitividad y reducción del precio de los productos, por ello las empresas deben entregar el producto en el menor tiempo posible a sus clientes, minimizando los inventarios en la cadena de suministro y reduciendo los costos operacionales.

Teniendo en cuenta lo anterior y dado que la planificación de rutas juega un papel importante dentro de la administración del transporte, el presente proyecto busca proponer un modelo de ruteo de vehículos que contribuya a minimizar los costos totales de distribución de una empresa distribuidora de frutas ubicada en el norte del Valle del Cauca considerando Ventanas de Tiempo y una flota homogénea de vehículos.

Una vez planteada la justificación del proyecto, se realiza el estudio de la literatura expuesta acerca del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.

4 MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se plasma los diferentes elementos que compone el Marco Teórico como lo son las variantes del VRP, los diferentes métodos de soluciones y los diferentes conceptos que se van a enmarcar en el Marco Conceptual; además de esto, se va describe las diferentes investigaciones que se han realizado en torno al tema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.

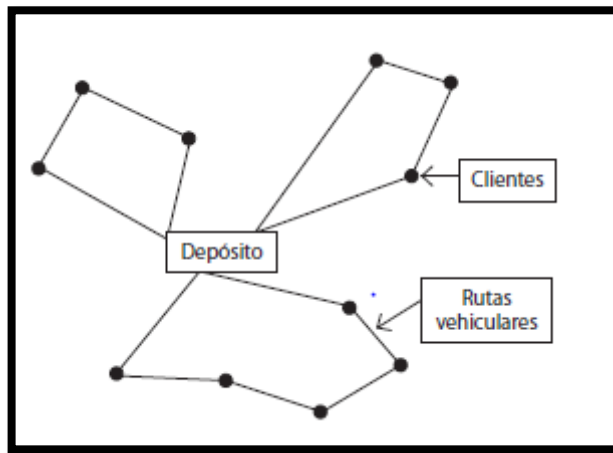
4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Problema de Ruteo de Vehículos:

El Problema de Ruteo de Vehículos (Por sus siglas en inglés VRP) es uno de los principales temas de la Investigación de Operaciones y es catalogado como un problema complejo de optimización combinatorial.

El VRP consiste en un conjunto de clientes que se encuentran ubicados geográficamente, un depósito central y una flota de vehículos, se diseñen rutas óptimas, de tal forma que éstos salgan del depósito, visiten una vez a cada cliente y regresen al punto de inicio, minimizando los costos totales del recorrido (Rocha et al, 2011).

Figura 1. Modelo VRP.



Fuente: Benavente y Bustos (2005).

Como se observa en la figura anterior, el VRP en su forma más simple puede ser representado por un grafo dirigido $G(A, N)$, donde $N = \{0, 1, \dots, n\}$ representa el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos que conectan a cada uno de los nodos. El depósito es el nodo $j = 0$ y los clientes los nodos $j = 1, 2, \dots, n$ cada uno con demanda $d_j > 0$. El conjunto de arcos representa el desplazamiento de un nodo i a un nodo j , donde a cada arco está asociado un costo de recorrido $C_{ij} > 0$ si $C_{ij} = C_{ji}$ o una distancia de recorrido $D_{ij} > 0$ si $D_{ij} = D_{ji}$.

El primer problema planteado del VRP fue el del Agente Viajero o TSP (Travelling Salesman Problem) introducido por Flood en 1959. (Rocha et al. 2011). Este problema se describe como un agente vendedor que quiere visitar una cierta cantidad de clientes, partiendo desde un punto de origen, visite cada cliente una sola vez y regrese de nuevo, minimizando la distancia total recorrida.

De este problema, se desprende el TSP generalizado en 1959, (Dantzing y Ramser, 1959), donde diseñan un modelo para el despacho de combustible con una flota de vehículos a diferentes estaciones de servicio. Tiempo después, (Clarke y Wright, 1964) propusieron el primer algoritmo heurístico para darle solución a este problema.

El problema de Ruteo de Vehículos ha tenido una serie de variaciones debido a que cada vez más se han considerado diferentes restricciones como son las capacidades de los vehículos, el emparejamiento de las rutas, la reglamentación de los vehículos, las ventanas de tiempo de los clientes y de los proveedores, entre otras (Olivera, 2004).

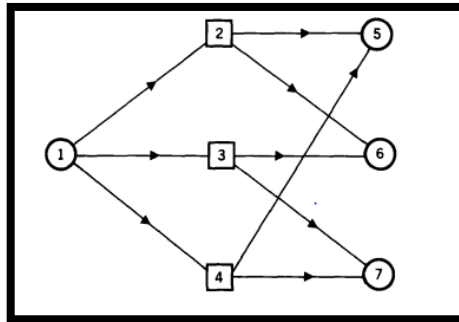
4.1.2 VARIANTES DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

4.1.2.1 El Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem – TSP)

Es uno de los problemas más complejos de las ciencias computacionales y es uno de los primeros en ser estudiados en el campo de la combinación combinatoria y es denominado como un problema NP – HARD, debido a que no se puede resolver en tiempo polinomial en función de los nodos presentes en el problema.

El TSP consiste en que un agente viajero tiene que visitar n ciudades, visitando una sola vez a cada cliente, terminando en la ciudad inicial, haciendo que el recorrido represente el mínimo costo.

Figura 2. Grafo del Problema del Agente.



Fuente: Martello et al. 1997

El problema del Agente Viajero se puede modelar mediante un grafo completo dirigido (Como se muestra en la Figura 2.), donde los vértices del grafo son las ciudades y los arcos son los caminos, dichos arcos deben tener un peso, y este representa la distancia que hay entre dos vértices que están conectado por dicho arco.

4.1.2.2 Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (Capacitated – CVRP)

Este problema consiste en la obtención de un conjunto de rutas a un mínimo costo, donde cada una comienza y termina en un punto inicial o depósito y atiende a todos los clientes. Cada cliente con una demanda determinada, debe ser atendido por un vehículo y esta demanda no puede exceder la capacidad del mismo (Martínez 2010).

El CVRP se puede expresar a través de un grafo completo dirigido y ponderado $G = (V, A, d)$ donde $V = \{V_0, V_1, \dots, V_n\}$ es un conjunto de vértices y $A = \{(V_{ij} / i \neq j)\}$ un conjunto de arcos. El vértice V_0 representa el depósito, es decir el punto de inicio y partida de las rutas recorrida por los vehículos. Los demás vértices representan clientes o ciudades y los pesos d_{ij} son las distancias entre los vértices. Para los clientes o ciudades existe una demanda, excepto en el depósito que la demanda es nula. La meta es encontrar la distancia mínima total de las rutas recorridos por los vehículos tal que:

- Toda Cliente o Ciudad es visitada exactamente una vez por un vehículo.
- Todas las rutas comienzan y terminan en el depósito (Vértice V_0).
- Todas las rutas no exceden la capacidad individual del vehículo Q .

4.1.2.3 Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRP with TIME WINDOWS – VRP)

El problema de Ruteo de Vehículos consiste en diseñar un conjunto posible de rutas para una flota de vehículos de igual capacidad, que salen y llegan a un depósito, de modo que se visiten todos los destinos de una sola vez con el mínimo costo, satisfaciendo restricciones horarias y de capacidad (Pullen y Webb, 1967).

Las ventanas de tiempo pueden ser flexibles o suaves, o no flexibles o duras. Para el problema de ruteo con ventanas de tiempo suaves, se permiten violar la restricción de inicio de servicio dentro de las ventanas de los clientes, sin embargo, este hecho implica una penalización económica por incumplimiento que afecta negativamente al costo. Por otro lado, las ventanas de tiempo duras no admiten el inicio del servicio después del tiempo más lejano en el que algún cliente puede ser atendido.

El VRPTW se puede representar mediante el grafo completo $G = (V, A)$ donde $V = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de vértices y $A \subseteq (i, j)$ es el conjunto de Arcos, con $i \neq j$.

Los vértices $i = 1, 2, \dots, n$ corresponden a los clientes y los vértices cero o $n + 1$ corresponden al depósito.

La ventana de tiempo general asociada a los nodos de partida y de llegada se representan como $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, donde E y L representan la salida del depósito más temprana posible y la llegada al depósito más tardía posible respectivamente.

4.1.2.4 Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos (Multiple Depot – MDVRP)

Este problema de Ruteo de vehículos con múltiples depósitos es una variante del VRP clásico que incorpora varios depósitos con una localización conocida. Cada uno de los depósitos posee una flota de vehículos limitada con capacidad fija, que deben suplir la cantidad demandada de los clientes visitándolos sólo una vez (Olivera, 2004).

La complejidad de este problema crece exponencialmente a medida que lo hace la cantidad de clientes, dificultando el desarrollo de métodos de solución que lo resuelva de manera óptima en un tiempo computacional razonable.

El objetivo de este problema es reducir la distancia recorrida y minimizar la asignación de vehículos de cada depósito.

4.1.2.5 Problema de Ruteo de Vehículos con Retornos (Backbauls – VRPB)

Esta variación consiste en encontrar una cantidad de rutas simples con un mínimo costo, de tal forma que cada recorrido visite el centro de distribución, cada centro de consumo es visitado solamente por una sola ruta y la suma de demanda de los clientes no puede exceder la capacidad de los vehículos (Toth y Vigo, 2002).

En el VRPB los clientes pueden demandar o devolver mercancías. El supuesto más crítico de las entregas, es que éstas pueden ser realizadas en cada ruta antes de que alguna recogida pueda ser iniciada. Esto debido a que los vehículos son cargados en la parte trasera y las cargas reacomodadas en los camiones y que los puntos de entrega son considerados económicamente factibles. Las cantidades a ser recogidas y distribuidas son conocidas con anticipación.

En este tipo de problemas el conjunto de clientes a ser visitados se divide en dos: El primero contiene n centros de consumo con línea de recorrido (Lineabauls), que requieren que una cantidad dada de productos sea entregada y el segundo contiene m centros de consumo con recorrido de vuelta o retornos (Backbauls), donde se requiere que una cantidad dada de productos deba ser recogida.

En esta variación del VRP hay una restricción importante entre Lineabauls y Backbauls, cuando una ruta pueda servir a ambos tipos de clientes, todos los centros de consumo con Lineabauls deben ser atendidos antes que algún centro de consumo con Backbauls si existen.

4.1.2.6 Problema de Ruteo de Vehículos Periódico (Periodic – VRP)

Este tipo de problemas contempla un horizonte de operación de M días, periodo durante el cual cada cliente debe ser visitado una sola vez (Russell y Gribbin, 1991).

El PVRP básico consiste en seleccionar K (j) días distintos de visitas para el nodo j y resolver los n problemas de VRP que resultan, de manera que se minimice el costo total de recorrido; esto lo convierte en un problema tipo NP – HARD.

En esta variación del VRP se consideran restricciones como que un cliente deba ser visitado mínimo una vez dentro de un periodo de tiempo establecido, cada vehículo tiene una capacidad de carga limitada y lo que se requiere es satisfacer la demanda de cada cliente.

4.1.2.7 Problema de Ruteo de Vehículos con Flota Heterogénea (Multiple Types of Vehicles)

Esta variación consiste que los diferentes vehículos que conforman la Flota difieren en equipamiento, capacidad, antigüedad, estructura de costos y nivel de emisiones, deben establecer un conjunto de rutas cada uno iniciando y terminando en el centro de distribución visitando una sola vez a cada cliente, haciendo que la demanda total de la ruta no sobrepase la capacidad del vehículo y se minimice los costos asociados a la distribución (Gendreau et al, 1999).

El HVRP es una variante del VRP que puede ser definido mediante un grafo $G = (V, A)$ un grafo dirigido donde $V = \{V_0, V_1, \dots, V_n\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(V_i, V_j): V_i, V_j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. El vértice V_0 representa un depósito en el cual se encuentra una flota de vehículos mientras los otros vértices representan los clientes. Cada cliente V_i tiene asociada una demanda q_i . Con cada arco (V_i, V_j) viene asociada una matriz de distancia.

4.1.2.8 Problema de Ruteo de Vehículos Estocástico (Stochastic – VRP)

Se trata de un problema de ruteo donde uno o varios componentes de la formulación son aleatorios; cuando la demanda del cliente es una variable aleatoria, cuando los tiempos de servicio y tiempos son aleatorios o cuando el cliente tiene la probabilidad p de presentarse y $(1 - p)$ de no hacerlo (Stewart y Golden, 1983).

En los problemas Estocásticos existen dos etapas para llegar a una solución óptima. La primera solución es determinada antes de conocer la relación de las variables aleatorias y la segunda, un recurso puede tomarse cuando se conocen los valores de las variables aleatorias.

Debido a la aleatoriedad de algunos datos, no se puede esperar que todas las restricciones se satisfagan para todas las realizaciones de las variables aleatorias. Así que la decisión puede partir en el cumplimiento de ciertas restricciones con una probabilidad dada o incorporar en el modelo penalizaciones por incurrir en la violación de una restricción.

4.1.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS

4.1.3.1 Métodos Exactos.

Los métodos exactos de solución son aquellos que alcanzan obtener la solución óptima de un problema. Los métodos exactos solo pueden ser aplicados a para problemas pequeños hallando soluciones óptimas en un tiempo computacional razonable. Dada la complejidad de algunos problemas, solo las instancias con clientes hasta aproximadamente 50 pueden ser resueltas consistentemente por métodos exactos (Azi et al, 2010).

En este tipo de metodologías, se pueden resolver mediante alguna relajación del problema y utilizar un esquema de ramificación y Acotamiento al estilo del método BRANCH and BOUND.

4.1.3.1.1 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN (Branch and Bound):

Este método resuelve un problema de programación lineal entero resolviendo una secuencia ordenada de problemas lineales que se obtienen relajando las restricciones de integralidad y añadiendo restricciones adicionales. Estas restricciones permiten separar la región factible en subregiones complementarias (Toth y Vigo, 2002).

4.1.3.1.2 MÉTODO DE RAMIFICACIÓN Y CORTE (Branch and Cut):

El método de Ramificación y Corte es una técnica de ramificación y acotamiento para resolver problemas de programación lineal con variables enteras (Toth y Vigo, 2002).

Estos algoritmos en la enumeración de problemas y la inserción de cortes producen beneficios: por un lado la cota producida en cada una cada nodo del árbol de ramificación es, en general, mejor que en un algoritmo de ramificación y acotación, porque se pueden añadir nuevas desigualdades a la relajación del problema, siendo muy útil en problemas de optimización combinatoria.

4.1.3.1.3 LA DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS:

La descomposición de Benders y la descomposición de Dantzing – Wolfe son dos técnicas que permiten una transformación de estos problemas grandes en varios problemas más sencillos (Benders, 1962).

Esta descomposición permite trabajar con un problema en el cual se han eliminado una familia de variables continuas del problema lineal. Mediante la resolución de

otro problema lineal se comprueba si la solución del problema reducido es solución del problema principal o no. En el último caso lo que se hace es que se construye una o varias restricciones que deben ser insertadas al problema reducido.

4.1.3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución (Zeng et al, 2007). Las soluciones obtenidas con éstos métodos pueden ser mejoradas utilizando métodos de búsqueda más sofisticadas, pero incurriendo en tiempos de ejecución más altos. Entre ellos podemos encontrar:

4.1.3.2.1 HEURÍSTICA DE INSERCIÓN:

Las heurísticas de Inserción son métodos constructivos en los que se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas solo visitan un subconjunto de los clientes, y se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución (Solomon, 1987).

Los algoritmos de inserción comienzan seleccionando un ciclo inicial (sub –ruta) con n nodos, posteriormente los j son seleccionados e insertados en la ruta, de acuerdo a una o varias restricciones, donde la longitud del ciclo no se incrementen.

- ✓ Inserción Secuencial de Mole & Jameson: En esta heurística se utilizan dos medidas para decidir el próximo cliente a insertar en la solución parcial. Por un lado, para cada cliente no visitado se calcula la mejor posición para ubicarlo en la ruta actual teniendo en cuenta solamente las distancias y sin redondear los nodos que ya están en la ruta.
- ✓ Inserción en Paralelo de Christofides, Mingozzi y Toth: Este algoritmo opera en dos fases.

En la primera fase se aplica un algoritmo de inserción secuencial para obtener rutas compactas. No se presta especial atención a la ubicación de los clientes dentro de cada ruta, pues de esta fase solo se conservan los clientes iniciales de cada ruta y la cantidad de rutas de la solución final.

En la segunda fase, se crean k rutas y se las inicializa con unos clientes seleccionados. Cada cliente no visitado se asocia con la ruta en la que el costo de insertarlo es minimizado. Luego se selecciona una ruta cualquiera en la que se insertan los clientes que tiene asociados. Para decidir el orden en que se insertan los clientes asociados a una ruta se calcula, para cada cliente, la diferencia entre el costo de realizar la inserción en esa ruta y en la

segunda mejor opción para él. Cuanto mayor es esa diferencia, mayor es la urgencia para insertar dicho cliente en esa ruta.

4.1.3.2.2 HEURÍSTICA R:

Esta heurística toma algunos eventos y elementos que intervienen en un partido de fútbol. El campo de juego es el espacio de soluciones posibles, las posiciones del balón y de un grupo de jugadores son soluciones buenas y malas del problema.

Cuando inicia el partido del fútbol la primera posición del balón se toma como primera solución del problema y se guarda como la mejor solución hasta el momento. Ahora las posiciones que tienen los jugadores que están cerca o lejos del balón, son también posibles soluciones candidatas del problema, las cuales se deben comparar con la mejor solución hasta el momento. Si alguna de ellas las supera, pasa temporalmente a ser la mejor hasta ahora. Seguidamente los jugadores tratan de apoderarse del balón, y para lograr este objetivo tienen que cambiar de posición. Estas nuevas posiciones son comparadas con la mejor solución calculada hasta el momento. En caso de ser superada, será reemplazada. Este escenario se repite continuamente durante el partido, con la particularidad que el balón va ocupando nuevas posiciones en el campo de juego e inclusive se puede dar el evento que se repitan algunas (Restrepo et al, 2008).

4.1.3.2.3 HEURÍSTICA DE DOS FASES:

La heurística de dos fases permite construir soluciones factibles que normalmente no resultan óptimas, para ello dividen el problema en dos fases, la primera para el agrupamiento de los nodos y la segunda para la asignación de las rutas a los vehículos. En estas heurísticas sobresalen dos métodos y que implementaran un gran número de algoritmos para llegar a la solución (Beasley, 1983).

- ✓ Método de Rutear Primero y Asignar Después (Routing First Clustering Second): El planteamiento básico sobre este método puede ser adaptado a cualquier heurística y se desarrolla en dos fases. En la primera se usa un algoritmo que genere una ruta R donde se incluyen todos los nodos como si fueran a ser visitados por un solo vehículo sin tener en cuenta las restricciones de capacidad del problema. Esta ruta resulta ser la solución óptima que en la segunda fases va a ser agrupada (Clustering) de forma que la capacidad del vehículo sea optimizada y no se exceda. Para la primera fase se puede implementar cualquier método de solución que sea apropiado para la construcción de la ruta $R = (0, i, \dots, j, 0)$ como los mencionados anteriormente, el método de ahorro y de inserción. Para la segunda fase que es la de asignación, se divide R de forma que cumpla con la restricción de capacidad de los camiones, se puede utilizar el método de

participación óptima planteado por Beasley el cual consiste en dividir la ruta R en sub-rutas factibles, planteando el problema como el de hallar la ruta más corta.

- ✓ Método de Asignar Primero y Rutear Después: Están basadas en la características de este método, el cual es conocido por desarrollarse en dos fases, la primera consiste en crear grupos de clientes (Clusters), que se mantienen constantes hasta la solución final, teniendo en cuenta que la restricción de capacidad de los vehículos no sea excedida por la demanda de los clientes. La segunda fase consiste en la construcción de la ruta para cada grupo de clientes utilizando un algoritmo que permita solucionar el problema de forma exacta o aproximada y que se ajuste a las características del mismo.

4.1.3.3 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Una metaheurística es un algoritmo de optimización que resuelve problemas de optimización del tipo NP – HARD de difícil dominio de la investigación de operaciones (Olivera, 2004).

Estos métodos por lo general son algoritmos estocásticos iterativos que progresan hacia un óptimo global, por lo general las soluciones arrojadas resultan ser de mejor calidad que las de las heurísticas, pero con un tiempo de ejecución computacional mayor. A continuación se presenta alguno de estos métodos que se aplican en la solución de problemas de ruteo de vehículos.

4.1.3.3.1 ALGORITMOS DE BÚSQUEDA TABÚ:

Este algoritmo es un procedimiento de búsqueda local que explora el espacio de solución moviéndose en cada iteración de la solución actual a otra solución en su vecindario. El paso de una solución a otra no involucra necesariamente un mejoramiento en la función objetivo, es por eso que se debe considerar una lista que guarde aquellas soluciones en las cuales se ha pasado de manera de no volver a soluciones antes visitadas por lo menos para un número definido de iteraciones (Glover, 1986).

El objetivo general de esta lista denominada “Lista Tabú” es continuar estimulando el descubrimiento de soluciones de alta calidad. En general, un tipo común de restricción opera seleccionando algún subconjunto de atributos y declarando un movimiento tabú un determinado número de veces.

4.1.3.3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS:

Los algoritmos genéticos trabajan con una población de soluciones que en cada iteración se extrae algunas soluciones padres de la población actual y luego se combinan para dar descendientes que luego remplazan los peores elementos de la población si esto produce mejores (Bullnheimer et al, 1999).

Estos utilizan la idea de la evolución natural de los seres vivos para resolver problemas de optimización y búsqueda. El bajo nivel de acercamiento con la estructura propuesta en este trabajo hace tomar la decisión de no caer en mayor detalle en este algoritmo.

El algoritmo opera sobre una operación P se define una función de fitness $f(i)$ de modo que cuanto mayor es el fitness de un individuo, mejor es la solución que éste representa. En cada iteración se aplican operadores evolutivos que combinan y modifican a los individuos de la población, creando una nueva. En el esquema usual se opera en tres fases: Selección, Cruzamiento y mutación.

El operador de selección se encarga de elegir algunos individuos de la población que tendrán la posibilidad de reproducirse. Los operadores de selección, son en general probabilísticos y suelen privilegiar a los individuos con mayor fitness en la población. De modo general, puede decirse que este operador genera una población intermedia cuya cantidad de individuos depende del operador de cruzamiento utilizado.

Una vez generada la población intermedia, se aplica repetidamente el operador de cruzamiento para combinar individuos de dicha población y generar una nueva. Usualmente los operadores de cruzamiento toman dos individuos $P1$ y $P2$ llamados padres, y generan dos individuos $h1$ y $h2$ llamados hijos, mediante la aplicación de una regla probabilística.

Finalmente, se aplica a algunos individuos de la nueva población, un operador probabilístico de mutación que consiste en realizarle alguna modificación.

4.1.3.3.3 RECOCIDO SIMULADO:

Es una técnica estocástica de relajación la cual es originada por mecanismos estadísticos. Esta técnica se basa en una analogía a los procesos de aleación de sólidos, en donde un elemento sólido es calentado a altas temperaturas y gradualmente enfriado para lograr una estructura de cristalización en una configuración de energía baja. La idea principal que se aplica a los problemas de ruteo de vehículos es que una solución es aceptada siempre y cuando aporte en el costo asociado a la configuración de rutas entregadas. Sin embargo esta solución

puede aceptar configuraciones que no aporten mejoras a la función objetivo. La decisión de aceptar soluciones que empeoren el resultado se basan en una función de probabilidad que va siendo más restrictiva a medida que se aumentan las iteraciones en la heurística desarrollada (Kirpatrick et al, 1983).

4.1.3.3.4 BÚSQUEDA DISPERSA:

Esta metaheurística fue desarrollada por (Glover et al, 1993) y opera sobre un conjunto de soluciones, llamado conjunto de referencia (*RefSet*). Es una metaheurística evolutiva, lo cual se logra a través de la combinación de las soluciones del conjunto *RefSet*. Este conjunto está formado por “Buenas Soluciones”, donde no solo se limita a tener soluciones de calidad respecto a la función objetivo sino que también considera soluciones diversas con respecto a las otras soluciones en el conjunto de referencia.

En términos generales la implementación de una búsqueda dispersa se compone del siguiente método:

1. Un generador de Soluciones Diversas.
2. Un método de mejora.
3. Un método para crear y actualizar el conjunto de referencia *RefSet*.
4. Un método para generar subconjuntos de *RefSet* a los que se aplicará el método de combinación.
5. Un método de combinación.

4.2 ESTADO DEL ARTE

El problema de enrutamiento de vehículos VRP (Vehicle Routing Problem) es uno de los más comunes en la optimización de operaciones logísticas y uno de los más complejos de la optimización combinatorial; este problema plantea la búsqueda de una ruta óptima, maximizando o minimizando determinada función de desempeño, cumpliendo una serie de restricciones tales como: Número de vehículos, sus capacidades, demanda de clientes, entre otros. (Rocha, L. et al, 2011).

El primer problema de planeación de rutas fue el del Agente Viajero o TSP (Travelling Salesman Problem) planteado por Flood en 1956, tiene como objetivo diseñar una ruta específica que visite una cierta cantidad de ciudades, partiendo de un nodo de origen y regresando a él, minimizando la distancia total de recorrido.

Después de esta formulación, Dantzing y Ramser (1959), con su trabajo “The truck dispatching problem”, fueron las primeras personas que estudiaron la aplicación real del TSP, diseñando la ruta óptima de una flota de vehículos tipo cisterna para la entrega de gasolina desde una terminal de carburante hacia un número de estaciones de servicio, de tal forma que se satisfagan las demandas de los clientes y se minimice la distancia total recorrida. Este trabajo se convierte en la base de una serie de estudios que se realizan para dar solución a problemas logísticos de transporte.

El VRP desde el momento de su formulación, ha sufrido una serie de modificaciones que llevan a este problema a un nivel mayor de complejidad matemática, pero que lo asemejan más a la realidad, tal es el caso del Problema de enrutamiento de vehículos con Ventanas de Tiempo VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) que aparece en el año de 1967, el cual considera una restricción adicional de ventanas de tiempo donde los clientes deben de ser atendidos.

El VRPTW ha sufrido una serie cambios a través del tiempo, en 1967 presenta la primera variación donde se incorporan ventanas de tiempo rígida, en 1986 es formulado como un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempos múltiples y en 1992 se enuncia con ventanas blandas de tiempo; desde ese momento, se han ido desarrollando una serie de trabajos e investigaciones que dan solución a los problemas logísticos que se presentan en las organizaciones.

A continuación se describen las diferentes investigaciones relacionadas con el problema objeto de estudio.

Barón y Schaerer (2003), en su trabajo “A Multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows”, proponen una versión multiobjetivo del sistema de colonia de hormigas para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo con tres funciones objetivo, encontrando un conjunto de Pareto de óptimas soluciones. Los resultados experimentales muestran que este nuevo enfoque supera al algoritmo original MACS-VRPTW en este nuevo contexto multiobjetivo. Las ideas presentadas en este trabajo, pueden ser extendidas a otros objetivos e incluso a diferentes problemas multiobjetivo, guardando la información encontrada de buenas soluciones en una única matriz de feromonas.

Seguidamente, Lau, Sim y Teo (2003), realizaron una investigación acerca “Vehicle Routing Problem with Time Windows a Limited Number of Vehicles”, que proponen un enfoque en la búsqueda tabú, caracterizado por una lista de almacenamiento y un mecanismo para forzar un embalaje denso dentro de una ruta. Los resultados computacionales, demuestran que el enfoque utilizado en la solución de los problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, producen soluciones que son competitivas contra los mejores resultados del VRPTW. Además, el enfoque utilizado muestra que es bueno tanto del punto de vista de la optimalidad, como de la estabilidad.

Bent y Hentenryck (2004), en su investigación “A Two – Stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, proponen un Algoritmo de dos etapas para este problema de ruteo. En primer lugar, desarrollan un algoritmo de recocido simulado, con el fin de minimizar el número total de vehículos utilizados, y el segundo minimiza el costo total de la ruta utilizando la búsqueda de vecindarios, reubicando la mayor cantidad de clientes. Los resultados experimentales demuestran la efectividad del algoritmo que ha mejorado 10 de las 56 mejores soluciones de las instancias de Solomon, mientras que mejora las soluciones en 46 problemas. Estos resultados indican los beneficios de utilizar el enfoque de dos etapas, usando recocido simulado para minimizar el número de rutas y LNS para minimizar los tiempos de viaje.

Igualmente Ciszár (2005) en su trabajo “Route Elimination Heuristic for Vehicle for Routing Problem with Time Windows”, donde diseñan un algoritmo de eliminación de rutas para el problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo. El problema tiene dos objetivos, el primero es minimizar el número de rutas y el segundo el de reducir el costo total de distribución. Para hacer frente a la solución del problema, se sugiere realizar el enfoque en dos etapas, la primera fase se enfoca en la eliminación de la ruta y en la segunda la reducción de costos. El método fue desarrollado estudiando el comportamiento de la gráfica durante la eliminación

de la ruta. Para este propósito, se desarrolló el modelo Magic Bricks. Los tiempos computacionales en las instancias de Solomon, demuestran que el algoritmo desarrollado es competitivo con los mejores.

Posteriormente Yaw Chang y Lin Chen (2007), en su artículo “Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows Via a Genetic Algorithm”, ponen en práctica un Algoritmo Genético para resolver un problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo, donde algunas de las buenas soluciones se calculan a partir de la Heurística y así construir las poblaciones iniciales. Debido a que los problemas de prueba son relativamente pequeños, se construyeron las poblaciones iniciales de forma aleatoria sin usar ninguna Heurística. El Algoritmo Genético se llevó a cabo en Visual Basic, donde se asignaron dos conjuntos de datos diferentes, generados de forma aleatorio con $n=10$. Para cada conjunto de datos se encontraron 3 tamaños diferentes de Población y 3 tasas de mutación diferentes. La mejor solución se calcula por enumeración completa para ambos conjuntos de datos. Después de realizar el análisis de datos, encontraron que el tamaño de la población y la tasa de mutación aumentaron, las soluciones son cada vez mejores, disminuyendo los errores relativos.

También, Cruz y Díaz (2008) desarrollaron un trabajo denominado “Un mecanismo de vecindad con búsqueda local y algoritmo genético para el problema de transporte con ventanas de tiempo”, donde presentan un mecanismo de vecindad combinado con un algoritmo genético que lo proponen con la finalidad de explotar el espacio de soluciones del problema del transporte con ventanas de tiempo. Estos realizan la experimentación de una instancia definida por Solomon (1987) para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo tipo 1 (Ventanas estrechas) y clasificación C (Distribución territorial por cliente arracimado) para 25 clientes con una flotilla homogénea de 25 vehículos; estos propusieron utilizar la técnica de Or con 1 – óptimo, intercambiando un elemento en la ruta sólo con movimientos hacia adelante, y que llamaron VECINDAD TIPO OR MODIFICADA. El análisis de tiempos que realizaron al algoritmo genético aplicado generó resultados que ayudan a identificar en que instancias el algoritmo consume mayor tiempo de ejecución, y así identificar donde se puede aplicar la estructura de vecindad.

De igual modo Restrepo, Medina y Cruz (2008), desarrollan un trabajo de investigación que titula “Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo”, donde Para determinar la solución de este problema, utilizan la Heurística R, que desarrollaron en el lenguaje Visual Basic para Excel®. Como resultados de investigación, la heurística aplicada generó una programación de 13

vehículos con diferentes rutas para suplir la demanda de todos los clientes, minimizando considerablemente el costo total de la programación de los vehículos.

Igualmente, Cruz y Díaz (2008), realizan un trabajo de investigación que titula “Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique”, donde proponen un algoritmo memético para resolver el VRPTW realizando una serie de experimentos utilizando diferentes instancias propuestas por Solomon (1987), aplicando una heurística evolutiva para establecer el cruzamiento y mutación entre subrutas. Los resultados experimentales del algoritmo genético demostraron que el uso de la técnica de satisfacción de restricciones permite trabajar más eficiente en la búsqueda de una buena solución para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo.

Posteriormente, Tolosa (2009), en su trabajo “Colonia de hormigas, fundamentación teórica y aplicación en la optimización de sistemas logísticos de ruteo con intervalos de recepción y tiempo de atención máximo”, pretende demostrar una fundamentación teórica acerca de los sistemas de colonia de hormigas para resolver un problema de ruteo multiobjetivo; el problema plantea la necesidad de encontrar las rutas que debe seguir una flota de vehículos para satisfacer las necesidades de demanda de un grupo de clientes que deben ser atendidos en un intervalo de tiempo, optimizando el número de camiones, tiempo total empleado y tiempo de atención máximo. Para la resolución del problema propuso un algoritmo de solución donde no solamente se plantea la aplicación de los sistemas de colonia de hormigas, sino que además integra los conceptos de búsqueda multiobjetivo en una sola colonia de hormigas para minimizar los cuatro objetivos planteados. Para realizar las pruebas experimentales del algoritmo de solución, éste utiliza el esquema propuesto por Solomon (1987), para una instancia de 100 clientes. Los resultados experimentales demuestran la convergencia del algoritmo hacia una solución cercana al óptimo, llegando a la conclusión de que los sistemas de colonia de hormigas son muy eficientes a la hora de solucionar problemas de ruteo de vehículos multiobjetivo.

De igual manera, Ebensperger (2009), en su trabajo de investigación “Una formulación para el problema de ruteo de vehículos con tiempos de viaje dependientes del tiempo para la actualización de rutas con información en tiempo real”, estudia el problema de ruteo dinámico de vehículos con ventanas de tiempo e información en tiempo real respecto a las condiciones de oferta y demanda del sistema. Diseñó una nueva formulación para el problema de ruteo de vehículos dependiente del tiempo y considerando restricciones de ventanas de tiempo (TDVRPTW) con información en tiempo real, y así realizar un experimento donde

se evalúen diferentes escenarios donde se minimicen los costos asociados a la no atención de los clientes y a los tiempos totales de viaje. Para llevar a cabo el experimento del ruteo, utilizó la red estratégica del modelo de Etraus, correspondiente a la del transporte privado de Chile y empleó un algoritmo de solución que utiliza dos heurísticas; la primera denominada heurística de Ahorros que construye las rutas factibles y la heurística de mejoramiento local llamada Intra – Ruta (Or – Opt), que busca disminuir en lo posible los costos de las rutas. Para el análisis de resultados se trabajó con cuatro estrategias de selección, donde se puede observar la disminución de los costos de transporte y los tiempos de ejecución relativamente bajos, llegando a la conclusión de que es factible la utilización de este modelo en la práctica.

Del mismo modo Ribas et al. (2011), en su artículo “A Hybrid Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows”, proponen un algoritmo para dar solución al problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo, que combina la Metaheurística de Búsqueda Local, el Procedimiento del Barrido Variable y un Modelo Exacto para la partición del Conjunto. El último método se activa periódicamente con el fin de encontrar la mejor combinación de las rutas generadas a lo largo de la Ejecución del Algoritmo. Los resultados computacionales demostraron que el enfoque Híbrido propuesto es muy competitivo. El algoritmo se aplicó para resolver el conjunto de Instancias propuestas por Solomon (1987), que es bien conocido y ampliamente utilizado en la literatura. Se realizaron 5 corridas, con un tiempo de procesamiento de 10 minutos para cada ejecución como criterio de prueba.

Igualmente Alondra (2011), en su trabajo titulado “Un problema bi – objetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo”, formula un modelo de ruteo con múltiples objetivos, con el fin de minimizar los costos totales de transporte y balancear las rutas en cuanto al tiempo de recorrido; este es un problema real que se presenta en una empresa de Tenerife, España. Para resolver la problemática planteada, modeló el problema matemáticamente a través de un modelo bi – objetivo lineal entero, posteriormente propuso dos metodologías de solución basadas en técnicas metaheurística. La metodología I está basada en la técnica de búsqueda dispersa, donde la construcción de la población inicial se realiza siguiendo un procedimiento secuencial para diseñar las rutas, y la metodología II también está basada en la búsqueda dispersa, pero la construcción de la población inicial se realiza siguiendo un procedimiento en paralelo para diseñar las rutas. Para realizar la experimentación computacional de las metodologías propuesta, consideró las instancias de Solomon (1987), diseñadas para los problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. Los resultados experimentales arrojaron que la

metodología II logra mejores resultados que la metodología I, además propone realizar una comparación con la forma en que actualmente de la empresa diseña las rutas con las soluciones que se obtendrían al aplicar ésta metodología.

De igual forma, Herazo (2012) en su trabajo de investigación que titula “Modelación matemática del problema de ruteo de vehículos con restricciones de múltiples depósitos, flota heterogénea y ventanas de tiempo”, propone un modelo matemático que minimiza el costo total de proveer el servicio de entrega de mercancía a un conjunto de clientes. La solución de este problema la realizó a través del programa de modelado avanzado para programación y optimización GAMS (General Algebraic Modeling System), generando las soluciones a través del solver Cplex integrado a éste. El modelo fue probado con las instancias de referencia de Solomon (1987) y presenta un buen desempeño computacional arrojando soluciones cercanas al óptimo, lo que hace a este modelo una excelente herramienta para resolver problemas de este tipo.

Así mismo, Loo, Sánchez y Vega (2012), llevan a cabo un trabajo de investigación que titula “Diseño de rutas de transporte de personal aplicando modelación matemática para resolver el problema de enrutamiento vehicular capacitado con ventanas de tiempo”, con el objetivo de diseñar rutas para transportar a los empleados desde cierto paradero hasta su lugar de trabajo, y así minimizar el costo total de la ruta. Para llegar a la solución del problema, utilizaron GAMS, cuyos resultados arrojaron una cantidad de 15 rutas y un ahorro mensual en el costo de éstas del 8%.

De igual forma, Díaz, Fosado y Serrano (2012), realizaron un trabajo que titula “Colonia de abejas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneos multidepósito con ventanas de tiempo”, con el fin de optimizar el proceso de planificación operativa de la distribución de huevos para la empresa avícola de Pinar del Río, minimizando los costos de distribución y número de camiones y maximizando la eficiencia del uso de los vehículos. Para dar resolución a este problema multiobjetivo, utilizaron la metaheurística de colonia de abejas (ABC), que a pesar de ser muy reciente ha demostrado ser muy eficiente para problemas de tipo NP – Hard. Como resultados de esta investigación se espera que con el modelo desarrollado y la aplicación de esta metaheurística, se pueda dar solución al problema planteado.

Igualmente, Fuentes et al. (2014), en su artículo “Método heurístico para el problema de ruteo de vehículos aplicado a la empresa distribuidora representaciones continental”, estudiaron la viabilidad de aplicar el modelo heurístico secuencial de

Salomón para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y flota heterogénea de una empresa distribuidora de licores. Estos autores pretenden determinar si la heurística obtiene una mejora del tiempo y los costos de operación logística de la empresa. Los resultados obtenidos de esta investigación fue un ahorro del 4.88% de la distancia y los costos totales tuvieron una disminución del 4.9%, con base a esto llegaron a la conclusión de que la heurística de inserción aplicada para el problema de ruteo se comporta de forma esperada, obteniendo una mejora de resultados frente al ruteo actual de la compañía.

Posteriormente, Kaligari y Rueda (2015), en su trabajo “Métodos de optimización para el problema de ruteo de vehículos con inventarios y ventanas de tiempo duras”, donde formulan un modelo matemático basado en la programación entera mixta y se estudia el impacto que tiene las ventanas de tiempo sobre las decisiones del Ruteo de Vehículos, a través de dos métodos de solución. El primero optimiza las decisiones de forma simultánea y el segundo considera las decisiones de forma secuencial, convirtiéndose en un método heurístico. Los resultados demuestran que el método de optimización simultáneo tiene un desempeño mejor que el método heurístico de optimización secuencial generando ahorros en los costos logísticos de al menos el 6%.

Luego Dhahri et al. (2016), en su artículo “A VNS-based Heuristic for solving the Vehicle routing problem with time windows and vehicle preventive maintenance constraints”, proponen una formulación matemática, así como una metaheurística general de búsqueda de vecindario variable (VNS) para resolver a gran escala la situación del problema. La función objetivo es encontrar una nueva planificación – programación que minimice la desviación de la planificación original en términos de número de vehículos y distancia total recorrida. Se realizaron experimentos para estudiar cómo funciona la actividad de mantenimiento, los resultados experimentales demostraron que el algoritmo GVNS produce consistentemente alto rendimiento.

Por último, Mahmoudi y Zhou (2016), en su artículo “Finding optimal solutions for vehicle routing problem with pickup and delivery services with time windows: A dynamic programming approach based on state-space-time network representation”, proponen por primera vez un modelo de flujo de la red multiproducto discreto en el tiempo, basado en integración de vehículos que transportan las redes de transporte espacio tiempo, para permitir una articulación de la optimización de la asignación de pasajeros a vehículos y el ruteo turno a turno en redes de transporte gestionadas. Utilizando un enfoque de relajación Langragiana, el problema primario de ruteo de múltiples vehículos se descompone en una frecuencia de sub - problemas de enrutamiento de un único vehículo, con multiplicadores Lagrangianos para solicitudes individuales de los pasajeros que se actualizan mediante algoritmos basados en sub-gradientes.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

La Logística puede definirse como la ciencia que estudia como las mercancías, las personas o la información superan el tiempo y la distancia de forma eficiente. La Logística se contempla como envolvente natural del Transporte, y es posible aplicar principios comunes a la concepción de un sistema de transporte colectivo en una ciudad, a la definición de una red de carreteras, o en el sistema de distribución de una empresa fabricante de productos.

4.3.1 Transporte:

El transporte es por excelencia uno de los procesos fundamentales de la estrategia logística de una organización, este componente es de atención prioritaria en el diseño y la gestión del sistema logístico de una compañía, dado que suele ser el elemento individual con mayor ponderación en el consolidado de los costos logísticos de la mayoría de empresas.

4.3.2 Cadena de Abastecimiento:

El concepto de Cadena de Abastecimiento surge de la incapacidad de control del canal de flujo por parte de una sola compañía, esta pérdida de control es motivada principalmente por la globalización de los mercados. Las Cadenas de Abastecimiento abarcan los procesos de negocio, de talento humano, las organizacionales, de infraestructura física, de tecnologías y plataformas de información, permitiendo el flujo continuo de los procesos de servicio y/o manufactura en pro de la creación de bienes y/o servicios con el objetivo de satisfacer las necesidades del consumidor final, obteniendo un beneficio global.

4.3.3 Gestión de la Cadena de Abastecimiento:

La Gestión de la Cadena de Abastecimiento es una práctica basada en la filosofía ganar/ganar, la cual consiste en la planificación, organización y el control de los flujos de la red de valor, entre los que se encuentran los flujos transaccionales, de productos y/o servicios, y de la información, los cuales son aplicados a los proveedores de mis proveedores, mis proveedores, los operadores de transporte, los centros de distribución, los vendedores y los consumidores finales.

4.3.4 Logística de Transporte:

Desde un punto de vista más amplio, la Logística incluye todas y cada una de las operaciones necesarias para mantener una actividad productiva: desde la programación de compras hasta servicio post – venta, pasando por

aprovisionamiento de materias primas, planificación y gestión de la producción, almacenaje, diseño, embalaje, etiquetaje, clasificación y distribución física.

La Logística de Transporte actualmente está experimentando un cambio profundo que afecta la forma de Distribución, los fabricantes adoptan estrategias logísticas globales buscando la optimización de los flujos de mercancías de la empresa.

La optimización de la Logística de Distribución de Productos, consiste en resolver cuestiones como:

- Determinar la cantidad de productos que se envía desde cada fábrica para cada almacén, y así reducir al mínimo el costo de envía, al tiempo que se consigue satisfacer la demanda de almacenamiento sin exceder los suministros de fábrica.
- Especificar cuántos productos de varios tipos diferentes es preciso enviar desde cada fábrica a cada almacén y cada cliente, para minimizar el costo total del envío.
- Decidir qué tamaño o tipos de productos se deben cargar en un vehículo, teniendo en cuenta sus límites de tamaño, para garantizar un mejor servicio al cliente, satisfaciendo la demanda y reduciendo al mínimo el espacio perdido.
- Averiguar si es necesario proceder al cierre de plantas para minimizar los costos totales, que incluyen los costos fijos de operación y costos de transporte de las mismas hasta los almacenes.
- Calcular la cantidad de productos a producir en cada fábrica y el envío a almacenes y clientes, para reducir al mínimo los costos generales.

4.3.5 Gestión del Transporte:

El diseño de un sistema de logístico en una organización comprende la implementación de los procesos de Planificación, Aprovisionamiento, Producción, Distribución y Servicio al Cliente, Para lograr integrar todos estos procesos se hace necesario trabajar en la solidez de los flujos, es decir, decidir sobre la definición de sus redes de distribución, la ubicación de sus almacenes o centros de distribución, el momento de gestionar su inventario y el cómo unir todas estas partes con los actores de la cadena de abastecimiento.

La gestión de Transporte tiene dos tareas imperativas, estas son la elección del medio o los medios de transporte a utilizar y la programación de movimientos a emplear. Estas casi que ocupan el derrotero de la gestión del transporte, dado que todas las decisiones que tomen deben ajustarse a unas medidas óptimas teniendo en cuenta los siguientes factores:

4.3.6 Costos:

Este debe ser sustentado por el valor del producto, para que de esta manera se vea reflejada la inversión en la modalidad de transporte que se escoja y por tal motivo la ganancia que se obtenga de dicha operación sea alta.

Los aspectos a tener en cuenta para establecer un costo aceptable de flete, son la competencia, la distribución y el costo de bienes parecidos, y la manera cómo afectará el precio de venta final del producto en el consumidor.

4.3.7 Confiabilidad del Medio de Transporte:

Hace referencia a la seguridad, el manejo y el nivel de servicio que se presenta para llevar a cabo la operación de la mejor forma posible.

De igual manera el Tiempo de Entrega debe cumplir con los acuerdos los acuerdos establecidos entre las partes interesadas, en cuanto los tiempos de entrega de mercancía, siguiendo con los requisitos y convenios predeterminados.

4.3.8 Selección del Modo de Transporte:

Es una de las principales decisiones que deben de tomarse en un sistema de transporte. Esta decisión se toma fundamentalmente con base en los siguientes elementos cuantitativos que cada modo de transporte implica:

- El costo total de Logística.
- El tiempo promedio de Reposición.
- Las Variables de tiempo de Reposición.

Dentro de los diferentes tipos de Transporte tenemos:

4.3.9 Transporte Terrestre:

La producción en Masa de grandes Fabricantes de automotores ha impulsado la elaboración de vehículos para el transporte de carga y mercancías, ha impulsado la exportación masiva de los mismos a países en vía de desarrollo.

4.3.10 Tipos de Vehículos:

Dentro del medio transporte terrestre se tienen las siguientes especificaciones de vehículos:

- Camión de Plataforma abierta.
- Camión con Carrocería de Estacas.
- Camión Cerrado tipo Furgón.
- Camión Tolva.
- Camión Tanque.
- Camión Planchón.

- Camión Reparto.
- Camión Hormigoner.
- Camión Pick Up.
- Camión para Cargas Especiales.

Además de esto, se tiene la clasificación de acuerdo a la disposición de los ejes (Ver Tabla 2):

Tabla 2. Clasificación de Vehículos de carga.

DESIGNACIÓN	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
2		Camión de dos ejes Camión Sencillo
3		Camión de tres ejes Doble Troque
4		Camión de 4 ejes
2S1		Tracto camión de dos ejes con semirremolque de un eje
2S3		Tracto camión de dos ejes con semirremolque de tres ejes
3S1		Tracto camión de tres ejes con semirremolque de un eje
3S2		Tracto camión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tracto camión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Fuente: Resolución 1782 de 2009

Tabla 2. Clasificación de Vehículos de Carga (continuación).

DESIGNACIÓN	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
R2		Remolque de dos ejes
2 R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
2 R3		Camión de dos ejes con remolque de tres ejes
3 R2		Camión de tres ejes Doble troque con remolque de dos ejes
3 R3		Camión de tres ejes Doble troque con remolque de tres ejes
4 R2		Camión de cuatro ejes con remolque de dos ejes

Fuente: Resolución 1782 de 2009

Tabla 2. Clasificación de Vehículos de Carga (continuación).

DESIGNACIÓN	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
4 R4		Camión de cuatro ejes con remolque de cuatro ejes
2 B1		Camión de dos ejes con remolque balancín de un eje
2 B2		Camión de dos ejes con remolque balancín de dos ejes
2 B3		Camión de dos ejes con remolque balancín de tres ejes
3 B1		Camión de tres ejes Doble troque con remolque balancín de un eje

Fuente: Resolución 1782 de 2009

Tabla 2. Clasificación de Vehículos de Carga (continuación).

DESIGNACIÓN	CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN
3 B3		Camión de tres ejes Doble troque con remolque balancín de tres ejes
4 B1		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de un eje
4 B3		Camión de cuatro ejes con remolque balancín de tres ejes

Fuente: Resolución 1782 de 2009

4.3.11 Opciones Básicas del Transporte:

El servicio básico de transporte terrestre es utilizado comúnmente para ejecutar el movimiento de productos semielaborados y terminados. La longitud promedio de recorrido origen - destino es de 1150 Km. Las grandes ventajas del servicio de transporte terrestre son su capacidad de brindar el servicio puerta a puerta, su frecuencia, disponibilidad y velocidad.

Las principales desventajas que presenta el servicio de transporte terrestre son la capacidad (tamaño de envío), y las restricciones en el manejo del tipo de carga, debido a las condiciones de seguridad de las vías, las cuales limitan las dimensiones y pesos de los envíos.

4.3.12 Costos del Transporte Terrestre:

Los costos del vehículo de transporte terrestre se pueden agrupar en fijos y variables. Sus costos fijos son los menores de cualquier medio de transporte, dado que no son propietarios de las vías por las que operan; entre sus costos fijos más representativos se tienen los siguientes:

- Seguros.
- Amortizaciones.
- Salarios de Conductores.
- Depreciación.

Por otro lado los costos variables tienden a ser altos, dado a que la construcción y el mantenimiento de las vías de tránsito se cobran a los usuarios en forma de impuestos de combustible, peaje e impuestos por la relación de peso kilometraje; Los costos variables en el transporte terrestre deben calcularse por kilómetro recorrido, entre sus costos variables más significativos se encuentran los siguientes:

- Gasolina.
- Aceite.
- Llantas.
- Peajes.

Los usuarios deben exigir de los transportadores por carretera cotizaciones que contemplen los siguientes aspectos:

- Valor de Tarifa por unidad de carga.
- Tipo de Vehículo que se utilizará.
- Seguro que Aplica.
- Recargos por manejos adicionales y/o Stand By.
- Tiempo de Tránsito.
- Condiciones de Seguridad y Control de Trazabilidad.
- Documentos de Pago.
- Documentos Exigibles.

4.3.13 Tipos de Vehículos.

VEHICULO UTILITARIOS: Considerado para cargas pequeñas a los que diariamente transportan por las ciudades un límite de peso.

VEHÍCULOS MULTIPROPÓSITO: Son aquellos cuyo fin es ser utilitarios, tanto en el caso urbano como en el rural. Son vehículos que sirven para trabajos de carga y transporte de mercancías más robustas que las de los utilitarios.

CAMIONES: Son vehículos de carga que sin sobrepasar un límite, tienen un gran espacio; son utilizados en tareas de gran escala cuya capacidad y fortaleza los hacen imprescindibles para transportar carga mediana.

CAMIONES DE CARGAS EXIGENTES: Diseñados especialmente para el trabajo más duro y de mayor exigencia; denominados de aguante y durabilidad para las tareas pesadas y versátiles para labores fuertes frente a la carga y su transporte, son razones que los convierten en lo más útiles a la hora de invertir para obtener un gran beneficio.

TRACTOCAMIONES: Son vehículos destinados a soportar y arrastrar semirremolques y remolques, acoplados con mecanismos de articulación. Sirven para transportar grandes cantidades de carga y se utilizan también para trasladar container. Su utilidad radica básicamente en el aprovechamiento del Espacio. Están diseñados para la movilización en rutas urbanas, a pesar de ser robustos, se utilizan para el uso exclusivo de envíos y acarreos grandes.

5 DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

En este capítulo se pretende abordar la situación en la cual se encuentra actualmente la empresa caso de estudio, información que servirá de insumo para construir el modelo que se muestra en el capítulo siguiente.

5.1 Descripción de la Empresa:

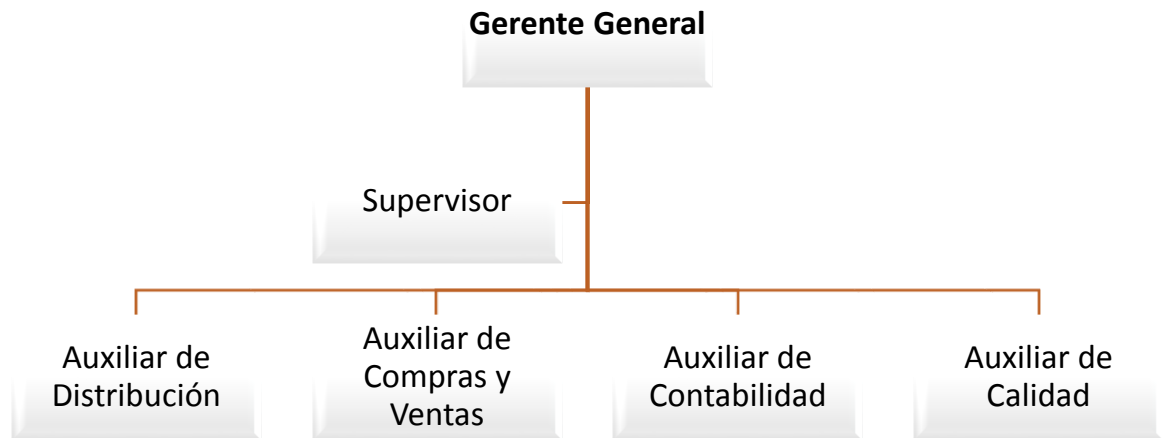
La idea de negocio de la empresa caso de estudio, se basa en la distribución de frutas y verduras a nivel del centro del Valle, cuya finalidad es satisfacer las necesidades del cliente y el desarrollo de soluciones óptimas a la hora de la entrega del producto. La actividad de la empresa requiere contar con el menor tiempo de recorrido para la entrega del producto, ya que de esto depende el cumplimiento, eficiencia y productividad de la empresa. El objetivo de la empresa es satisfacer las necesidades del cliente, prestándole una atención personalizada y exclusiva, proponiendo soluciones idóneas para la entrega del producto. Se pretende establecer una empresa de alto estatus y generar el mejoramiento del posicionamiento a través del valor agregado del servicio.

La empresa caso de estudio, actualmente se encuentra ubicada en el Norte del Valle, que en la última década se ha caracterizado por cultivar y distribuir frutas y verduras al interior y exterior del país.

5.2 Estructura Organizacional:

La organización presenta la siguiente estructura organizacional, encabezada por el Gerente de la Distribuidora (Ver Figura 3):

Figura 3. Organigrama.



Fuente: Los Autores.

A continuación se realiza la explicación de las funciones que cumple cada persona dentro del Proceso de Compra, Venta y Distribución de Frutas y Verduras.

- **GERENTE GENERAL:** Es la persona encargada de establecer las metas y objetivos de la organización, y desarrollar los mecanismos para alcanzarlos; es el que controla y vigila de cerca el desempeño de cada uno de los Procesos de la Organización y Fija los Precios de Compra y Venta con los Proveedores y Clientes.
- **SUPERVISOR:** Es el que realiza el recibo de las Frutas y Verduras que adquiere la empresa, verifica que el peso sea el correcto al cual se está pagando y Contrata el Personal necesario para realizar el proceso de Selección, lavado, empaque y cargue del Vehículo.
- **AUXILIAR DE DISTRIBUCIÓN:** Es el encargado muchas veces de realizar la conducción de los vehículos y como tarea principal y foco de nuestro Trabajo, es el que realiza la asignación de Clientes y Vehículos, diseñando las rutas de la mejor manera posible.
- **AUXILIAR DE CALIDAD:** Es el que verifica la eficiencia de los procesos, que tan productivo son a la hora de realizar los despachos, además de ser el encargado de inspeccionar la calidad del Producto, el empaque y la forma como llega al cliente.

- **AUXILIAR DE COMPRAS Y VENTAS:** Es el que genera los pedidos a los proveedores tanto de Frutas como Verduras, recibe las órdenes de pedido de los clientes y realiza visitas de seguimientos a los Clientes y Proveedores.
- **AUXILIAR DE CONTABILIDAD:** Es el que lleva todos los registros tanto contables como financieros de la empresa.

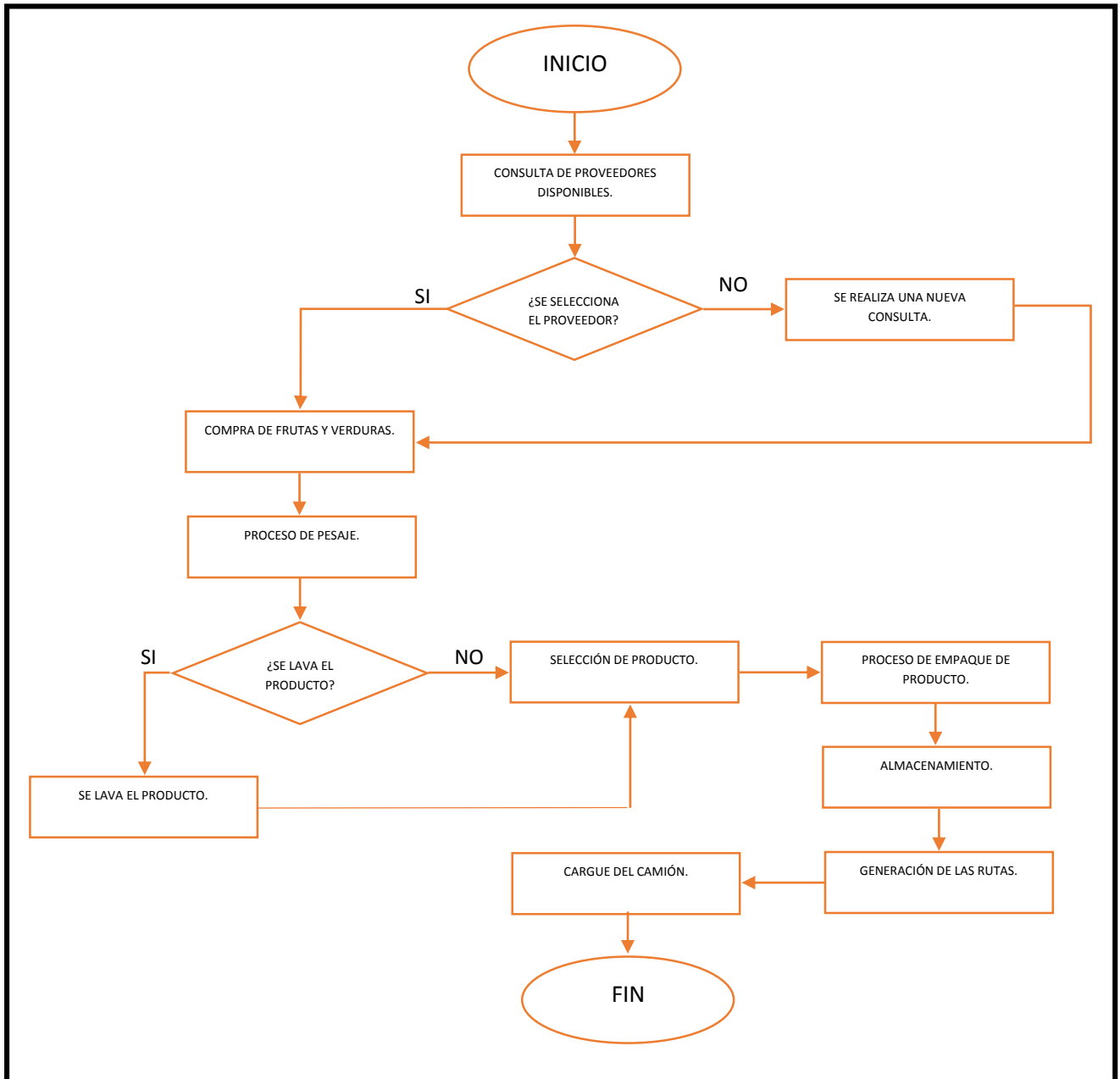
5.3 Logística de Distribución:

Procesos de la Organización: El diseño del modelo de optimización se basa en la logística que actualmente se está llevando en la empresa caso de estudio, a continuación se realiza una breve descripción acerca de los procesos que se generan allí.

- **SELECCIÓN DE PROVEEDOR:** Es en este punto donde empieza toda la logística tanto de distribución como de compra y venta de Producto, ya que la selección del proveedor marca la pauta acerca de que Frutas y Verduras se van a poder ofrecer a los clientes y de que calidad. La selección del Proveedor la realiza el Gerente General ya que esta decisión se basa en el precio del producto.
- **COMPRA DE PRODUCTO:** Una Vez el Proveedor esté seleccionado y cumpla con las especificaciones de la empresa, el auxiliar de compras y ventas decide que cantidad de producto y de qué calidad va a comprar, teniendo como referencia un histórico de productos que presentan más salida para la empresa.
- **SELECCIÓN DE PRODUCTO:** Luego de que la Fruta o Verdura esté pesada y en muchos casos lavada (Depende de los requerimientos del Cliente), el personal se encarga de verificar la calidad del producto que se está ofreciendo al cliente, realizando la diferente clasificación de acuerdo a las calidades que maneja la empresa (Primera, Segunda y Tercera).
- **GENERACIÓN DE RUTAS:** Una vez el Auxiliar de Compras y Ventas dé el visto bueno acerca de los clientes a los cuales se va a despachar, el auxiliar de distribución se encarga de asignar los diferentes clientes a los vehículos, con el objetivo de realizar las entregas a todos los clientes respetando los horarios de recibo.
- **DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN:** Es el último proceso que se lleva a cabo, y es donde se despacha los vehículos ya cargados a que visiten cada uno de los clientes asignados a sus rutas, con el fin de satisfacer toda la demanda.

Para resumir todo este proceso, a continuación se presenta el siguiente Diagrama de Flujo con la Secuencia de Actividades desarrolladas en la empresa caso de estudio.

Figura 4. Proceso Organizacional.



Fuente: Los Autores.

5.3.1 Tipos de Producto:

Actualmente la empresa suministra frutas y verduras frescas de la región, de acuerdo a la temporada o cosecha disponible de sus proveedores, bajo estándares agroecológicos aún sin certificación, guardando las normas sanitarias y de buenas prácticas agroindustriales existentes en el territorio nacional. A continuación se presentan los 40 productos o ítems de la distribuidora de frutas y verdura.

Tabla 3. Frutas.

FRUTAS	ITEM
Guanábana	Primera.
	Segunda.
Guayaba	Primera.
	Segunda.
	Tercera.
Guayaba Coronilla	Primera.
	Segunda.
Guayaba Manzana	Primera.
	Segunda.
Granadilla	Primera.
	Segunda.
Maracuyá	Primera.
	Segunda.
	Tercera.
Melón	Primera.
	Segunda.
	Tercera.
Papaya	Primera.
	Segunda.
	Tercera.
Sandía	Primera.
	Segunda.
Uva Blanca	Primera.
Uva Roja	Primera.
Uva Mixta	Primera.

Fuente: Los Autores.

Tabla 4. Verduras.

VERDURAS	ITEM
Berenjena	Primera.
Tomate	Primera.
	Segunda.
	Tercera.
Pepino	Primera.
	Segunda.
Pimentón	Primera.
	Segunda.
	Tercera.

Fuente: Los Autores.

Tabla 5. Otros Productos.

OTROS PRODUCTOS	Presentación
Tomate	½ Kilogramo
	2 Kilogramos
Guayaba Coronilla	2 Kilogramos
Guayaba Manzana	½ Kilogramo
	2 Kilogramos
Granadilla	½ Kilogramo
	2 Kilogramos
Maracuyá	2 Kilogramos
	10 Kilogramos
Papaya	2 Kilogramos
	10 Kilogramos
Uva Blanca	½ Kilogramo
Uva Roja	½ Kilogramo
Uva Mixta	½ Kilogramo
Pepino	½ Kilogramo
	2 Kilogramos
Pimentón	½ Kilogramo
	2 Kilogramos

Fuente: Los Autores.

5.3.2 Operación Actual del Sistema de Distribución:

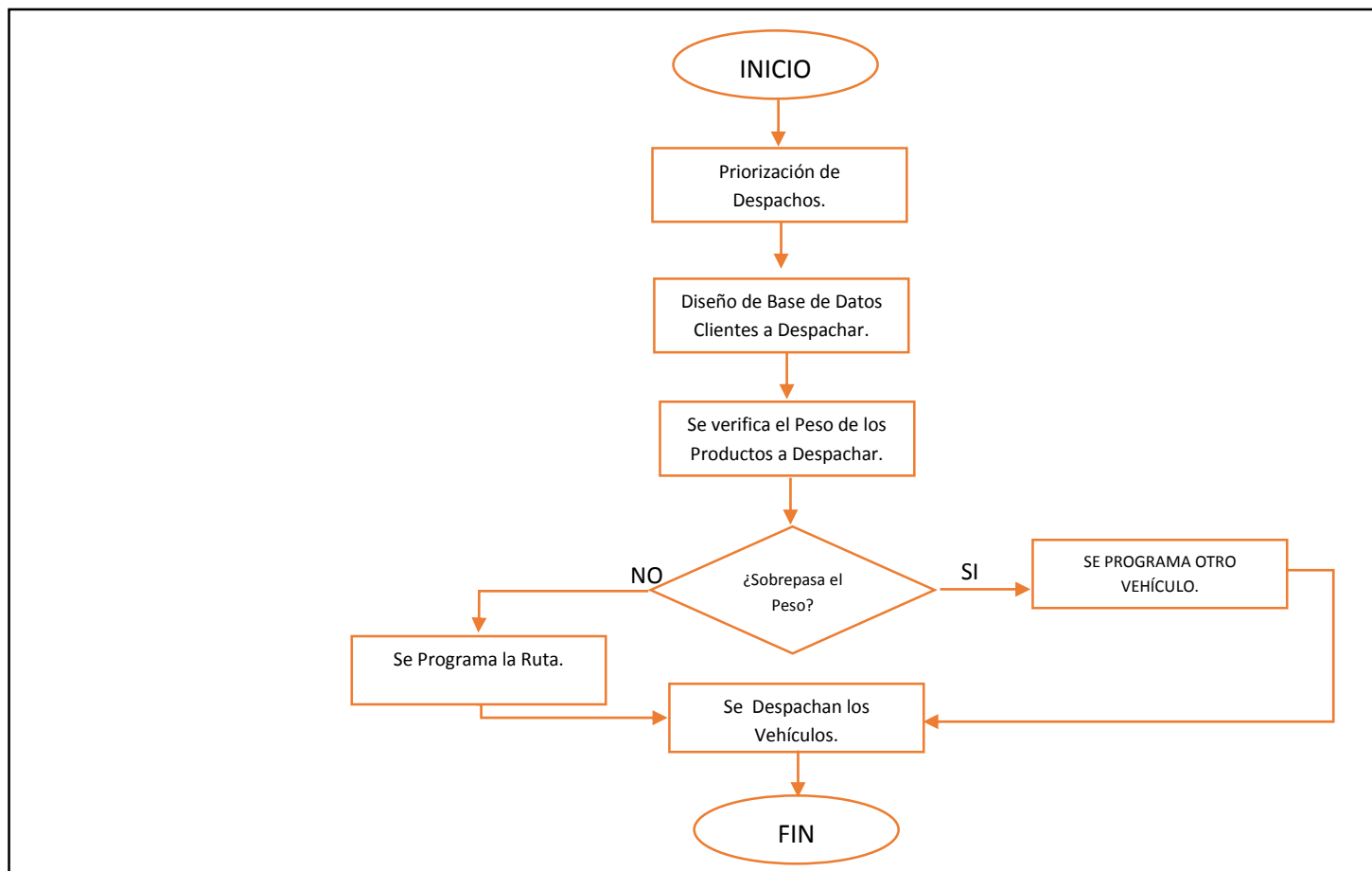
El sistema de distribución actual de la empresa caso de estudio se basa en la experiencia y pericia del Auxiliar de Distribución a la hora de asignar las rutas, ya que conoce los tiempos de entrega y de viaje entre cada cliente.

Esta forma empírica ha llegado a traer complicaciones económicas a la empresa ya que muchas veces el producto no se entrega a tiempo, siendo devuelto por el cliente. A continuación se explica cómo se desarrolla este sistema:

- i. Una vez se conoce todas las demandas de los clientes, se realiza una priorización de los despachos de los clientes más importantes y así poder dar más relevancia a estos pedidos.
- ii. Se realiza una base de datos con las direcciones de los clientes a los cuales se les va entregar producto y los horarios de recibo.
- iii. Luego de saber a qué clientes se debe despachar, el auxiliar de distribución verifica que la demanda total no sobrepase la capacidad del vehículo, si se pasa, procede a programar otro vehículo.
- iv. Con la Información de cuantos vehículos y las direcciones empieza a programar la ruta de acuerdo a los grupos de clientes que estén más cerca, evitando de la mejor manera que los horarios de recibo no se vean afectados.
- v. Se le entrega el derrotero o el plan de entregas a los conductores.
- vi. Se revisa por última vez las rutas, y los camiones se despachan.

De esta manera es como se programan las Rutas en la empresa, tomando como base principios de tiempos de arribos, de agrupamiento de clientes por cercanía y Total de Demandas.

Figura 5. Logística de Despacho.



Fuente: Los Autores

5.3.3 Clientes:

La empresa caso de estudio distribuye en la actualidad frutas y verduras a minoristas y mayoristas que se encuentran ubicados en la ciudad de Cali, este es el listado de los 22 Clientes los cuales se les entrega pedido.

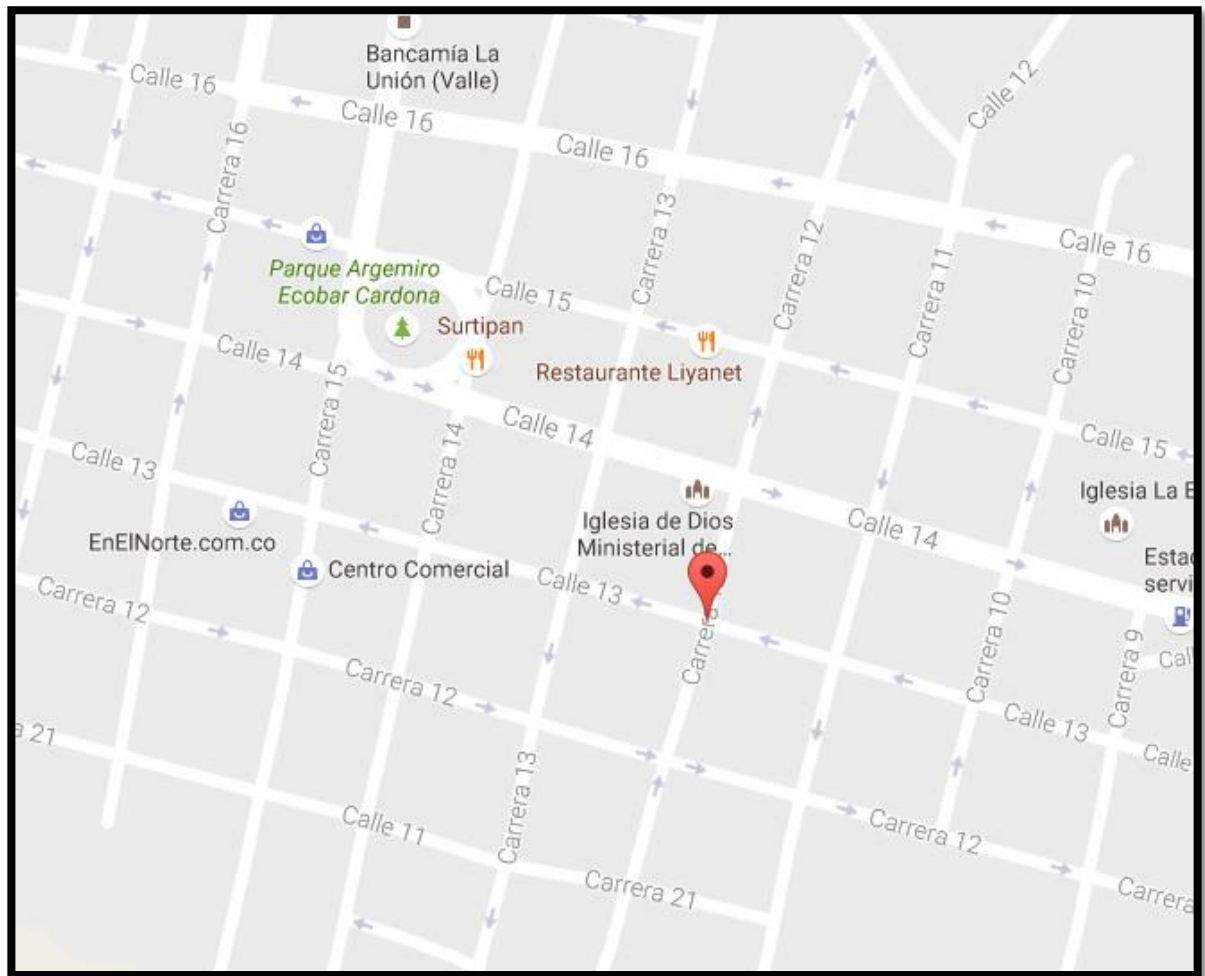
Tabla 6. Listado de Clientes.

CLIENTES	NOMBRE	DIRECCION
Nodo 1	Mercatodo Floraralia	CRA. 4 Norte
Nodo 2	Surtifamiliar Alcázares	CRA 1A5 #71 - 46
Nodo 3	Supermercado Lm 2	CRA 2 # 58 - 95
Nodo 4	Supermercado Lm 1	Cl. 56 #1D-210
Nodo 5	Makro Norte	CR 1 # 69 – 41
Nodo 6	Olímpica	CL 44 # 2-95
Nodo 7	Falca (Villa)	CR 8 Cl 52 Esquina
Nodo 8	Casa Grande	CR 25F DIAG 70 -06
Nodo 9	El Rendidor	CL 125 # 23B - 08
Nodo 10	Autoservicio el jardín	CR 27 # 121 - 19
Nodo 11	Comercializadora Floralia	Cl 33 A 17 C-52
Nodo 12	Falca	AV COLOMBIA 1 - 50
Nodo 13	Surtifamiliar Alameda	CL 9B # 23C - 65
Nodo 14	Mi cosecha	Cl 19 # 21- 43
Nodo 15	Mercar Caney	CR 28 # 19 - 120
Nodo 16	La casa de los tenderos	CL 27 # 33B - 09
Nodo 17	Súper inter	CR 40b # 27 - 40
Nodo 18	Rebajon	CR 80 # 38 - 98
Nodo 19	Mercar	Cl 48 # 85 – 54
Nodo 20	Supe familiar Caney	CL 48 # 83E - 53
Nodo 21	Makro Valle	CR 94 # 25 -60
Nodo 22	San Alejo	CL 18 # 100 - 11

Fuente: Los Autores.

Para satisfacer la necesidad de todos estos clientes, se tiene dispuesto un centro de distribución en La Unión, Valle del Cauca el cual se muestra en el siguiente mapa, con la ayuda de Google Maps.

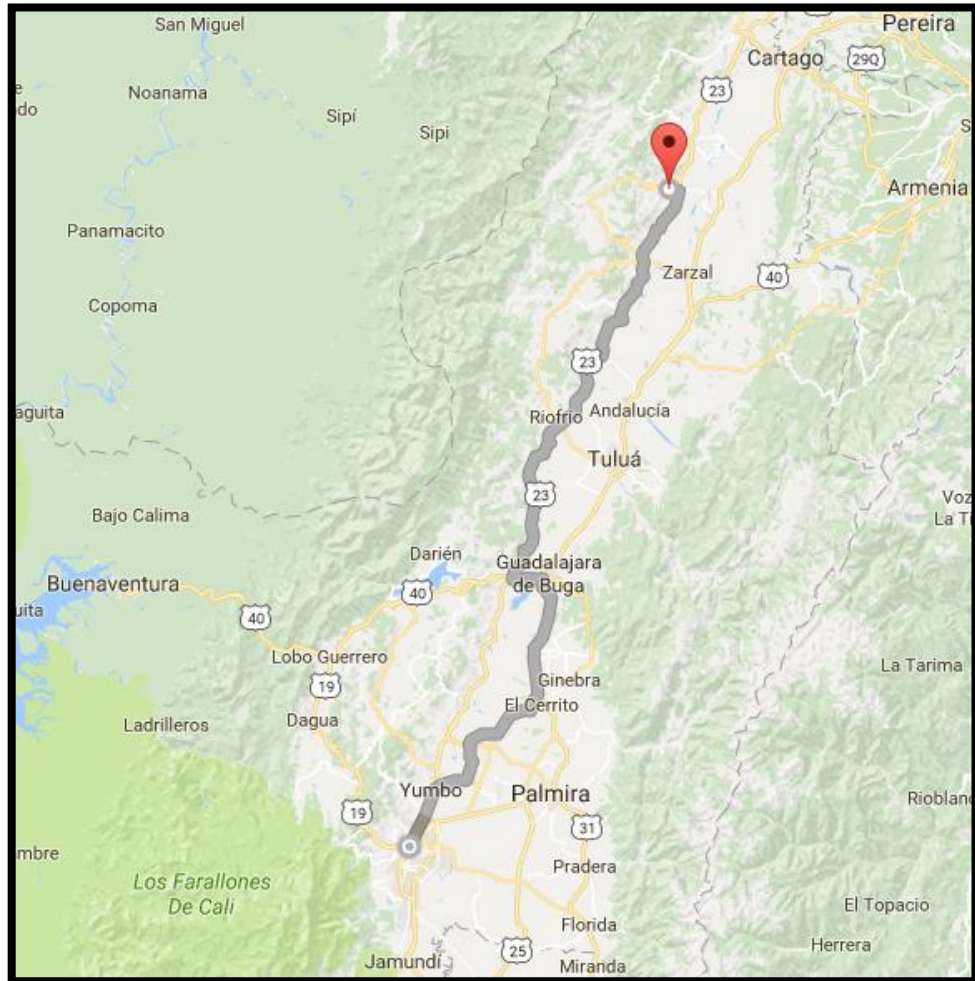
Figura 6. Ubicación Centro de Distribución Real.



Fuente: Google Maps.

De igual manera, se realiza de forma gráfica el recorrido que tiene que hacer los vehículos desde el Centro de Distribución hasta la Ciudad de Cali. Cabe resaltar, que el viaje se realiza por la vía Mediacanoa por ser la ruta más económica para la empresa caso de estudio, debido al pago de los Peaje en la vía.

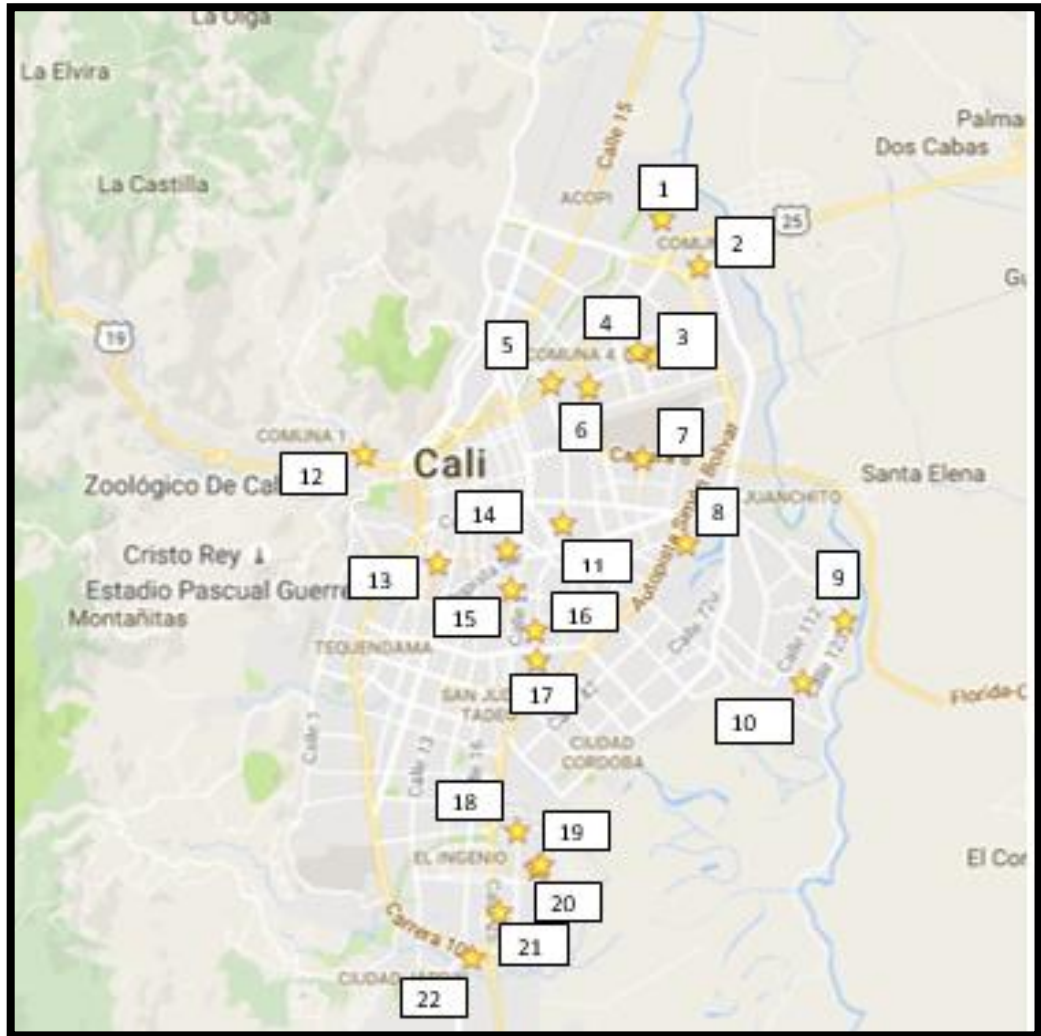
Figura 7. Ruta Primaria a la Ciudad de Cali.



Fuente: Google Maps.

Por último, se muestra la distribución de los clientes que se encuentran por toda la Ciudad de Cali, cada número hace referencia al nodo que fue asignado al cliente (Ver Tabla 6).

Figura 8. Distribución de Clientes.



Fuente: Google Maps.

5.3.4 Distancia:

La distancia entre los nodos se considera simétrica y se calculó con ayuda de la herramienta de Google Maps. A continuación se presenta la matriz de Distancias entre los diferentes clientes de la empresa caso de estudio.

Tabla 7. Matriz de Distancias (Km).

CLIENTE	NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14	NODO 15	NODO 16	NODO 17	NODO 18	NODO 19	NODO 20	NODO 21	NODO 22
NODO 0	0	9,6	8,5	6,8	6,4	5,6	5,5	6,6	7,6	12,7	13,6	4,1	2,2	2,2	3	3,9	5	5,8	11,8	12,4	11,9	12,7	11,2
NODO 1	9,6	0	2,2	4,6	5	5,2	7,2	7,3	8,3	10,5	11,7	10,2	9,1	12,5	9,8	11,1	11,6	12	16,9	17,7	17	17,6	18,4
NODO 2	8,5	2,2	0	3,4	3,8	4,8	5	6,1	7,1	8,8	10	9	9,4	11,3	10	9,9	10,4	10,8	15,7	16,4	15,7	16,3	18,9
NODO 3	6,8	4,6	3,4	0	0,9	2,8	1,6	3,6	7,1	9,8	10,9	5,4	7,5	8,6	6	6,6	16,4	10,8	15,7	16,4	15,8	16,3	16,3
NODO 4	6,4	5	3,8	0,9	0	2,1	1,6	3,7	6,3	9	10,2	6,3	7,5	8,6	6,1	6,7	9,6	10	14,9	15,7	15	15,6	16,4
NODO 5	5,6	5,2	4,8	2,8	2,1	0	1,7	3,3	8,4	9,2	10,4	3,3	4,8	5,8	4,4	5	6,2	6,9	14,8	14,9	14,9	15,5	14
NODO 6	5,5	7,2	5	1,6	1,6	1,7	0	2,3	7,2	8,4	9,6	5	6,1	7,2	4,7	5,3	6,5	10,9	15,8	16,6	15,9	16,5	14,9
NODO 7	6,6	7,3	6,1	3,6	3,7	3,3	2,3	0	3,6	6,2	7,3	3,5	10	5,8	4,6	4,4	7	7,4	14,2	14,3	14,3	14,3	13,5
NODO 8	7,6	8,3	7,1	7,1	6,3	8,4	7,2	3,6	0	4,9	6,1	3,7	10,2	6	4,8	4,6	4,6	5	9,7	10,5	9,8	10,4	13,7
NODO 9	12,7	10,5	8,8	9,8	9	9,2	8,4	6,2	4,9	0	1,8	7,5	14,3	10,1	8,9	8,7	9,1	9,5	4,6	5,7	5,1	5,4	6,8
NODO 10	13,6	11,7	10	10,9	10,2	10,4	9,6	7,3	6,1	1,8	0	9	15,4	11,3	10,1	8,8	8,1	7,8	12,9	13,7	13	13,6	14,4
NODO 11	4,1	10,2	9	5,4	6,3	3,3	5	3,5	3,7	7,5	9	0	10,2	6	4,8	2,1	3,1	3,8	12,2	12,9	12,3	12,8	11,4
NODO 12	2,2	9,1	9,4	7,5	7,5	4,8	6,1	10	10,2	14,3	15,4	10,2	0	3,5	4,3	5,4	6,4	7	13,4	13,5	13,4	14	12,1
NODO 13	2,2	12,5	11,3	8,6	8,6	5,8	7,2	5,8	6	10,1	11,3	6	3,5	0	2,1	2,6	3,4	4,2	9,6	9,7	9,7	10,3	9,9
NODO 14	3	9,8	10	6	6,1	4,4	4,7	4,6	4,8	8,9	10,1	4,8	4,3	2,1	0	1,5	2,3	8	8,8	8,8	7,9	8,7	8,7
NODO 15	3,9	11,1	9,9	6,6	6,7	5	5,3	4,4	4,6	8,7	8,8	2,1	5,4	2,6	1,5	0	0,8	7,3	8,1	8	8	8	8,1
NODO 16	5	11,6	10,4	16,4	9,6	6,2	6,5	7	4,6	9,1	8,1	3,1	6,4	3,4	2,3	0,8	0	1,4	8,2	7,9	7,8	8,2	8
NODO 17	5,8	12	10,8	10,8	10	6,9	10,9	7,4	5	9,5	7,8	3,8	7	4,2	8	7,3	1,4	0	7,3	8,1	7,4	8	8,8
NODO 18	11,8	16,9	15,7	15,7	14,9	14,8	15,8	14,2	9,7	4,6	12,9	12,2	13,4	9,6	8,8	8,1	8,2	7,3	0	1,1	1,2	2,2	4,5
NODO 19	12,4	17,7	16,4	16,4	15,7	14,9	16,6	14,3	10,5	5,7	13,7	12,9	13,5	9,7	8,8	8	7,9	8,1	1,1	0	1,5	2	4,3
NODO 20	11,9	17	15,7	15,8	15	14,9	15,9	14,3	9,8	5,1	13	12,3	13,4	9,7	7,9	8	7,8	7,4	1,2	1,5	0	1,8	4,1
NODO 21	12,7	17,6	16,3	16,3	15,6	15,5	16,5	14,3	10,4	5,4	13,6	12,8	14	10,3	8,7	8	8,2	8	2,2	2	1,8	0	3,7
NODO 22	11,2	18,4	18,9	16,3	16,4	14	14,9	13,5	13,7	6,8	14,4	11,4	12,1	9,9	8,7	8,1	8	8,8	4,5	4,3	4,1	3,7	0

Fuente: Los Autores.

Tabla 8. Matriz de Tiempos (Min).

CLIENTE	NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11	NODO 12	NODO 13	NODO 14	NODO 15	NODO 16	NODO 17	NODO 18	NODO 19	NODO 20	NODO 21	NODO 22
NODO 0	0	9,60	8,50	6,80	6,40	5,60	5,50	6,60	7,60	12,70	13,60	4,10	2,20	2,20	3,00	3,90	5,00	5,80	11,80	12,40	11,90	12,70	11,20
NODO 1	9,60	0	2,20	4,60	5,00	5,20	7,20	7,30	8,30	10,50	11,70	10,20	9,10	12,50	9,80	11,10	11,60	12,00	16,90	17,70	17,00	17,60	18,40
NODO 2	8,50	2,20	0	3,40	3,80	4,80	5,00	6,10	7,10	8,80	10,00	9,00	9,40	11,30	10,00	9,90	10,40	10,80	15,70	16,40	15,70	16,30	18,90
NODO 3	6,80	4,60	3,40	0	0,90	2,80	1,60	3,60	7,10	9,80	10,90	5,40	7,50	8,60	6,00	6,60	16,40	10,80	15,70	16,40	15,80	16,30	16,30
NODO 4	6,40	5,00	3,80	0,90	0	2,10	1,60	3,70	6,30	9,00	10,20	6,30	7,50	8,60	6,10	6,70	9,60	10,00	14,90	15,70	15,00	15,60	16,40
NODO 5	5,60	5,20	4,80	2,80	2,10	0	1,70	3,30	8,40	9,20	10,40	3,30	4,80	5,80	4,40	5,00	6,20	6,90	14,80	14,90	14,90	15,50	14,00
NODO 6	5,50	7,20	5,00	1,60	1,60	1,70	0	2,30	7,20	8,40	9,60	5,00	6,10	7,20	4,70	5,30	6,50	10,90	15,80	16,60	15,90	16,50	14,90
NODO 7	6,60	7,30	6,10	3,60	3,70	3,30	2,30	0	3,60	6,20	7,30	3,50	10,00	5,80	4,60	4,40	7,00	7,40	14,20	14,30	14,30	14,30	13,50
NODO 8	7,60	8,30	7,10	7,10	6,30	8,40	7,20	3,60	0	4,90	6,10	3,70	10,20	6,00	4,80	4,60	4,60	5,00	9,70	10,50	9,80	10,40	13,70
NODO 9	12,70	10,50	8,80	9,80	9,00	9,20	8,40	6,20	4,90	0	1,80	7,50	14,30	10,10	8,90	8,70	9,10	9,50	4,60	5,70	5,10	5,40	6,80
NODO 10	13,60	11,70	10,00	10,90	10,20	10,40	9,60	7,30	6,10	1,80	0	9,00	15,40	11,30	10,10	8,80	8,10	7,80	12,90	13,70	13,00	13,60	14,40
NODO 11	4,10	10,20	9,00	5,40	6,30	3,30	5,00	3,50	3,70	7,50	9,00	0	10,20	6,00	4,80	2,10	3,10	3,80	12,20	12,90	12,30	12,80	11,40
NODO 12	2,20	9,10	9,40	7,50	7,50	4,80	6,10	10,00	10,20	14,30	15,40	10,20	0	3,50	4,30	5,40	6,40	7,00	13,40	13,50	13,40	14,00	12,10
NODO 13	2,20	12,50	11,30	8,60	8,60	5,80	7,20	5,80	6,00	10,10	11,30	6,00	3,50	0	2,10	2,60	3,40	4,20	9,60	9,70	9,70	10,30	9,90
NODO 14	3,00	9,80	10,00	6,00	6,10	4,40	4,70	4,60	4,80	8,90	10,10	4,80	4,30	2,10	0	1,50	2,30	8,00	8,80	8,80	7,90	8,70	8,70
NODO 15	3,90	11,10	9,90	6,60	6,70	5,00	5,30	4,40	4,60	8,70	8,80	2,10	5,40	2,60	1,50	0	0,80	7,30	8,10	8,00	8,00	8,00	8,10
NODO 16	5,00	11,60	10,40	16,40	9,60	6,20	6,50	7,00	4,60	9,10	8,10	3,10	6,40	3,40	2,30	0,80	0	1,40	8,20	7,90	7,80	8,20	8,00
NODO 17	5,80	12,00	10,80	10,80	10,00	6,90	10,90	7,40	5,00	9,50	7,80	3,80	7,00	4,20	8,00	7,30	1,40	0	7,30	8,10	7,40	8,00	8,80
NODO 18	11,80	16,90	15,70	15,70	14,90	14,80	15,80	14,20	9,70	4,60	12,90	12,20	13,40	9,60	8,80	8,10	8,20	7,30	0	1,10	1,20	2,20	4,50
NODO 19	12,40	17,70	16,40	16,40	15,70	14,90	16,60	14,30	10,50	5,70	13,70	12,90	13,50	9,70	8,80	8,00	7,90	8,10	1,10	0	1,50	2,00	4,30
NODO 20	11,90	17,00	15,70	15,80	15,00	14,90	15,90	14,30	9,80	5,10	13,00	12,30	13,40	9,70	7,90	8,00	7,80	7,40	1,20	1,50	0	1,80	4,10
NODO 21	12,70	17,60	16,30	16,30	15,60	15,50	16,50	14,30	10,40	5,40	13,60	12,80	14,00	10,30	8,70	8,00	8,20	8,00	2,20	2,00	1,80	0	3,70
NODO 22	11,20	18,40	18,90	16,30	16,40	14,00	14,90	13,50	13,70	6,80	14,40	11,40	12,10	9,90	8,70	8,10	8,00	8,80	4,50	4,30	4,10	3,70	0

Fuente: Los Autores.

Con base en el supuesto que se hace referencia en el Capítulo 6. Definición del Modelo, se define una velocidad máxima de 60 Klm/Hr, por esta razón, para el cálculo de tiempo entre los nodos, se realizó la conversión a horas y luego en minutos, debido a esto, aunque los resultados de las Tabla 7 y 8 son iguales, las unidades son diferentes.

5.3.5 Vehículos:

Una vez realizado el listado de los clientes, una pregunta importante es saber en qué medio transportar el Producto y cómo hacer que llegue a su destino en los tiempos estipulados; para esto, la empresa caso de estudio cuenta con dos vehículos propios de igual capacidad y referencia, dispuestos para hacer la entrega de producto a sus clientes. Estas son las especificaciones de los vehículos.

Tabla 9. Especificaciones de los Vehículos.

HINO 300 DUTRO MAX.		
MOTOR	PESOS Y CAPACIDADES	DIMENSIONES
MARCA: Hino. REFERENCIA: NO4CUV POTENCIA MÁXIMA: 148 HP – 2500 rpm. TORQUE MÁXIMO: 43 Kg.m – 1400 rpm. NÚMERO DE CILINDROS Y POSICIÓN: Cuatro en Línea. COMBUSTIBLE: Diesel. ASPIRACIÓN: Turbo Intercooler. NORMA DE EMISIONES: Euro IV. DESPLAZAMIENTO: 4099 cc.	PESO BRUTO VEHICULAR: 8500 Kg. PESO CHASIS: 2545 Kg. PESO DE EJE DELANTERO: 1655 Kg. PESO DE EJE TRASERO: 890 Kg. CAPACIDAD DE CARGA BRUTA: 5955 Kg. CAPACIDAD DE CARGA BRUTA: 5955 Kg. CAPACIDAD DE CARGA EJE DELANTERO: 3100 Kg. CAPACIDAD DE CARGA EJE TRASERO: 5500 Kg. CAPACIDAD DE ARRANQUE EN PENDIENTE: 28.89%.	LARGO TOTAL: 6735 mm. ALTO TOTAL: 2215 mm. ANCHO TOTAL: 1995 mm. DISTANCIA ENTRE EJES: 3870 mm. VOLADO DELANTERO: 1105 mm. VOLADO TRASERO: 1760 mm. CABINA A EJE TRASERO: 3310 mm. LARGO CARROZABLE A BORDE DE CHASIS: 5070 mm. LLANTA: 215 / 75R 17.5.

FUENTE: <http://www.hino.com.co/>

Tabla 9: Especificaciones de los Vehículos (Continuación).

HINO 300 DUTRO MAX.		
CAJA Y FRENOS	TANQUE DE COMBUSTIBLE	SISTEMA ELÉCTRICO
REFERENCIA: MYY6S. TIPO: Manual. NÚMERO DE CAMBIOS: 6 MT (Adelante).	CAPACIDAD: 100 LTS + 75 LTS.	VOLTAJE NOMINAL: 24 V. CAPACIDAD ALTERNADOR: 24 V 80 A.

FUENTE: <http://www.hino.com.co/>

Figura 9. Hino 300 Dutro Max.



Fuente: <http://www.hino.com.co/>

5.3.6 Demanda:

Para analizar la demanda caso de estudio, se realizó un promedio con los históricos de la demanda de los clientes, con un horizonte de planeación de 6 meses, considerándose los días de la quincena, ya que en éstos es donde hay más flujo de mercancía.

Esta Información histórica, proviene del módulo de ventas del software CG1 que utiliza la empresa objeto de estudio, y fue proporcionada por el Supervisor de la Distribuidora.

Debido a que los días de despacho de la empresa son los lunes, miércoles y viernes; a continuación se presenta las demandas asociadas a estos días.

Tabla 10. Demanda de Clientes (Kg).

CLIENTE	DEMANDA		
	LUNES	MIÉRCOLES	VIERNES
NODO 0	-	-	-
NODO 1	320	298	260
NODO 2	212	280	310
NODO 3	245	240	267
NODO 4	245	-	256
NODO 5	220	180	320
NODO 6	320	350	-
NODO 7	145	-	200
NODO 8	647	745	730
NODO 9	160	-	280
NODO 10	267	405	-
NODO 11	320	320	347
NODO 12	200	280	-
NODO 13	865	654	600
NODO 14	210	220	180
NODO 15	986	870	870
NODO 16	167	350	-
NODO 17	323	-	270
NODO 18	220	300	165
NODO 19	1022	750	900
NODO 20	210	-	256
NODO 21	311	290	235
NODO 22	268	370	187

Fuente: Los Autores.

5.3.7 Costos Operacionales de Transporte.

Para el Cálculo de los Costos Operacionales se tomó como referencia el consolidado de costos de operación vehicular para transporte por Carretera.

Costos Variables: Para el cálculo de los costos variables se tuvieron en cuenta el consumo de combustible dependiendo de los diferentes tipos de terreno, Consumo de Llantas, Lubricantes, Filtros, Mantenimiento y Reparaciones, Lavado, engrase e Imprevistos.

Tabla 11. Costos Variables.

COMPONENTE DE COSTOS		\$/Km
CONSUMO DE COMBUSTIBLE		
Terreno Plano.	\$	512.78
Terreno Ondulado.	\$	722.22
Terreno Montañoso.	\$	1,059.29
COSTOS VARIABLES		
Consumo de Llantas.	\$	159.94
Consumo de Lubricantes.	\$	39.67
Consumo de Filtros.	\$	10.96
Mtto y Reparaciones.	\$	230.23
Lavado y Engrase.	\$	27.98
Impuestos.	\$	35.16
TOTAL COSTOS VARIABLES POR KM.		\$ 1,268.70

Fuente: Dirección de Transporte y Tránsito.

Costos Fijos: Para este cálculo, se tomaron los costos mensuales del Seguro de los Vehículos, Salario y Prestaciones Básicas de los conductores, Parquaderos, Impuestos de Rodamiento y Recuperación de Capital.

Tabla 12. Costos Fijos.

COMPONENTE DE COSTOS	\$/Mes
COSTOS FIJOS	
Seguros.	\$ 841,542.02
Salarios y Prestaciones Básicas.	\$ 1,256,372.25
Peajes.	\$ 392,000
Parquadero.	\$ 98,400
TOTAL COSTOS FIJOS MES	\$ 3331456.29

Fuente: Dirección de Tránsito y Transporte.

Matriz de Costos: Una vez calculados los costos variables por Kilómetro recorrido de un Vehículo, se realiza la matriz de Costos por las distancias recorrida entre cada cliente.

Tabla 13. Matriz de Costos Variables (\$/Km):

CLIENTE	NODO 0	NODO 1	NODO 2	NODO 3	NODO 4	NODO 5	NODO 6	NODO 7	NODO 8	NODO 9	NODO 10	NODO 11
NODO 0	\$ -	\$ 12.179,6	\$ 10.784,0	\$ 8.627,2	\$ 8.119,7	\$ 7.104,7	\$ 6.977,9	\$ 8.373,4	\$ 9.642,1	\$ 16.112,5	\$ 17.254,4	\$ 5.201,7
NODO 1	\$ 12.179,6	\$ -	\$ 2.791,1	\$ 5.836,0	\$ 6.343,5	\$ 6.597,3	\$ 9.134,7	\$ 9.261,5	\$ 10.530,2	\$ 13.321,4	\$ 14.843,8	\$ 12.940,8
NODO 2	\$ 10.784,0	\$ 2.791,1	\$ -	\$ 4.313,6	\$ 4.821,1	\$ 6.089,8	\$ 6.343,5	\$ 7.739,1	\$ 9.007,8	\$ 11.164,6	\$ 12.687,0	\$ 11.418,3
NODO 3	\$ 8.627,2	\$ 5.836,0	\$ 4.313,6	\$ -	\$ 1.141,8	\$ 3.552,4	\$ 2.029,9	\$ 4.567,3	\$ 9.007,8	\$ 12.433,3	\$ 13.828,9	\$ 6.851,0
NODO 4	\$ 8.119,7	\$ 6.343,5	\$ 4.821,1	\$ 1.141,8	\$ -	\$ 2.664,3	\$ 2.029,9	\$ 4.694,2	\$ 7.992,8	\$ 11.418,3	\$ 12.940,8	\$ 7.992,8
NODO 5	\$ 7.104,7	\$ 6.597,3	\$ 6.089,8	\$ 3.552,4	\$ 2.664,3	\$ -	\$ 2.156,8	\$ 4.186,7	\$ 10.657,1	\$ 11.672,1	\$ 13.194,5	\$ 4.186,7
NODO 6	\$ 6.977,9	\$ 9.134,7	\$ 6.343,5	\$ 2.029,9	\$ 2.029,9	\$ 2.156,8	\$ -	\$ 2.918,0	\$ 9.134,7	\$ 10.657,1	\$ 12.179,6	\$ 6.343,5
NODO 7	\$ 8.373,4	\$ 9.261,5	\$ 7.739,1	\$ 4.567,3	\$ 4.694,2	\$ 4.186,7	\$ 2.918,0	\$ -	\$ 4.567,3	\$ 7.866,0	\$ 9.261,5	\$ 4.440,5
NODO 8	\$ 9.642,1	\$ 10.530,2	\$ 9.007,8	\$ 9.007,8	\$ 7.992,8	\$ 10.657,1	\$ 9.134,7	\$ 4.567,3	\$ -	\$ 6.216,6	\$ 7.739,1	\$ 4.694,2
NODO 9	\$ 16.112,5	\$ 13.321,4	\$ 11.164,6	\$ 12.433,3	\$ 11.418,3	\$ 11.672,1	\$ 10.657,1	\$ 7.866,0	\$ 6.216,6	\$ -	\$ 2.283,7	\$ 9.515,3
NODO 10	\$ 17.254,4	\$ 14.843,8	\$ 12.687,0	\$ 13.828,9	\$ 12.940,8	\$ 13.194,5	\$ 12.179,6	\$ 9.261,5	\$ 7.739,1	\$ 2.283,7	\$ -	\$ 11.418,3
NODO 11	\$ 5.201,7	\$ 12.940,8	\$ 11.418,3	\$ 6.851,0	\$ 7.992,8	\$ 4.186,7	\$ 6.343,5	\$ 4.440,5	\$ 4.694,2	\$ 9.515,3	\$ 11.418,3	\$ -
NODO 12	\$ 2.791,1	\$ 11.545,2	\$ 11.925,8	\$ 9.515,3	\$ 9.515,3	\$ 6.089,8	\$ 7.739,1	\$ 12.687,0	\$ 12.940,8	\$ 18.142,5	\$ 19.538,0	\$ 12.940,8
NODO 13	\$ 2.791,1	\$ 15.858,8	\$ 14.336,3	\$ 10.910,8	\$ 10.910,8	\$ 7.358,5	\$ 9.134,7	\$ 7.358,5	\$ 7.612,2	\$ 12.813,9	\$ 14.336,3	\$ 7.612,2
NODO 14	\$ 3.806,1	\$ 12.433,3	\$ 12.687,0	\$ 7.612,2	\$ 7.739,1	\$ 5.582,3	\$ 5.962,9	\$ 5.836,0	\$ 6.089,8	\$ 11.291,5	\$ 12.813,9	\$ 6.089,8
NODO 15	\$ 4.947,9	\$ 14.082,6	\$ 12.560,2	\$ 8.373,4	\$ 8.500,3	\$ 6.343,5	\$ 6.724,1	\$ 5.582,3	\$ 5.836,0	\$ 11.037,7	\$ 11.164,6	\$ 2.664,3
NODO 16	\$ 6.343,5	\$ 14.717,0	\$ 13.194,5	\$ 20.806,7	\$ 12.179,6	\$ 7.866,0	\$ 8.246,6	\$ 8.880,9	\$ 5.836,0	\$ 11.545,2	\$ 10.276,5	\$ 3.933,0
NODO 17	\$ 7.358,5	\$ 15.224,4	\$ 13.702,0	\$ 13.702,0	\$ 12.687,0	\$ 8.754,1	\$ 13.828,9	\$ 9.388,4	\$ 6.343,5	\$ 12.052,7	\$ 9.895,9	\$ 4.821,1
NODO 18	\$ 14.970,7	\$ 21.441,1	\$ 19.918,6	\$ 19.918,6	\$ 18.903,7	\$ 18.776,8	\$ 20.045,5	\$ 18.015,6	\$ 12.306,4	\$ 5.836,0	\$ 16.366,3	\$ 15.478,2
NODO 19	\$ 15.731,9	\$ 22.456,0	\$ 20.806,7	\$ 20.806,7	\$ 19.918,6	\$ 18.903,7	\$ 21.060,5	\$ 18.142,5	\$ 13.321,4	\$ 7.231,6	\$ 17.381,2	\$ 16.366,3
NODO 20	\$ 15.097,6	\$ 21.568,0	\$ 19.918,6	\$ 20.045,5	\$ 19.030,6	\$ 18.903,7	\$ 20.172,4	\$ 18.142,5	\$ 12.433,3	\$ 6.470,4	\$ 16.493,1	\$ 15.605,1
NODO 21	\$ 16.112,5	\$ 22.329,2	\$ 20.679,9	\$ 20.679,9	\$ 19.791,8	\$ 19.664,9	\$ 20.933,6	\$ 18.142,5	\$ 13.194,5	\$ 6.851,0	\$ 17.254,4	\$ 16.239,4
NODO 22	\$ 14.209,5	\$ 23.344,1	\$ 23.978,5	\$ 20.679,9	\$ 20.806,7	\$ 17.761,8	\$ 18.903,7	\$ 17.127,5	\$ 17.381,2	\$ 8.627,2	\$ 18.269,3	\$ 14.463,2

Fuente: Los Autores.

Tabla 13: Matriz de Costos Variables (\$/Km) (Continuación)

CLIENTE	NODO 12	NODO 13	NODO 14	NODO 15	NODO 16	NODO 17	NODO 18	NODO 19	NODO 20	NODO 21	NODO 22
NODO 0	\$ 2.791,15	\$ 2.791,15	\$ 3.806,11	\$ 4.947,94	\$ 6.343,52	\$ 7.358,48	\$ 14.970,70	\$ 15.731,92	\$ 15.097,57	\$ 16.112,53	\$ 14.209,48
NODO 1	\$ 11.545,20	\$ 15.858,79	\$ 12.433,29	\$ 14.082,61	\$ 14.716,96	\$ 15.224,44	\$ 21.441,09	\$ 22.456,05	\$ 21.567,96	\$ 22.329,18	\$ 23.344,14
NODO 2	\$ 11.925,81	\$ 14.336,35	\$ 12.687,03	\$ 12.560,16	\$ 13.194,51	\$ 13.702,00	\$ 19.918,64	\$ 20.806,73	\$ 19.918,64	\$ 20.679,86	\$ 23.978,49
NODO 3	\$ 9.515,28	\$ 10.910,85	\$ 7.612,22	\$ 8.373,44	\$ 20.806,73	\$ 13.702,00	\$ 19.918,64	\$ 20.806,73	\$ 20.045,51	\$ 20.679,86	\$ 20.679,86
NODO 4	\$ 9.515,28	\$ 10.910,85	\$ 7.739,09	\$ 8.500,31	\$ 12.179,55	\$ 12.687,03	\$ 18.903,68	\$ 19.918,64	\$ 19.030,55	\$ 19.791,77	\$ 20.806,73
NODO 5	\$ 6.089,78	\$ 7.358,48	\$ 5.582,29	\$ 6.343,52	\$ 7.865,96	\$ 8.754,05	\$ 18.776,81	\$ 18.903,68	\$ 18.903,68	\$ 19.664,90	\$ 17.761,85
NODO 6	\$ 7.739,09	\$ 9.134,66	\$ 5.962,91	\$ 6.724,13	\$ 8.246,57	\$ 13.828,87	\$ 20.045,51	\$ 21.060,48	\$ 20.172,38	\$ 20.933,61	\$ 18.903,68
NODO 7	\$ 12.687,03	\$ 7.358,48	\$ 5.836,04	\$ 5.582,29	\$ 8.880,92	\$ 9.388,40	\$ 18.015,59	\$ 18.142,46	\$ 18.142,46	\$ 18.142,46	\$ 17.127,50
NODO 8	\$ 12.940,77	\$ 7.612,22	\$ 6.089,78	\$ 5.836,04	\$ 5.836,04	\$ 6.343,52	\$ 12.306,42	\$ 13.321,39	\$ 12.433,29	\$ 13.194,51	\$ 17.381,24
NODO 9	\$ 18.142,46	\$ 12.813,90	\$ 11.291,46	\$ 11.037,72	\$ 11.545,20	\$ 12.052,68	\$ 5.836,04	\$ 7.231,61	\$ 6.470,39	\$ 6.851,00	\$ 8.627,18
NODO 10	\$ 19.538,03	\$ 14.336,35	\$ 12.813,90	\$ 11.164,59	\$ 10.276,50	\$ 9.895,89	\$ 16.366,27	\$ 17.381,24	\$ 16.493,14	\$ 17.254,37	\$ 18.269,33
NODO 11	\$ 12.940,77	\$ 7.612,22	\$ 6.089,78	\$ 2.664,28	\$ 3.932,98	\$ 4.821,07	\$ 15.478,18	\$ 16.366,27	\$ 15.605,05	\$ 16.239,40	\$ 14.463,22
NODO 12	\$ -	\$ 4.440,46	\$ 5.455,42	\$ 6.851,00	\$ 8.119,70	\$ 8.880,92	\$ 17.000,62	\$ 17.127,50	\$ 17.000,62	\$ 17.761,85	\$ 15.351,31
NODO 13	\$ 4.440,46	\$ -	\$ 2.664,28	\$ 3.298,63	\$ 4.313,59	\$ 5.328,55	\$ 12.179,55	\$ 12.306,42	\$ 12.306,42	\$ 13.067,64	\$ 12.560,16
NODO 14	\$ 5.455,42	\$ 2.664,28	\$ -	\$ 1.903,06	\$ 2.918,02	\$ 10.149,63	\$ 11.164,59	\$ 11.164,59	\$ 10.022,76	\$ 11.037,72	\$ 11.037,72
NODO 15	\$ 6.851,00	\$ 3.298,63	\$ 1.903,06	\$ -	\$ 1.014,96	\$ 9.261,53	\$ 10.276,50	\$ 10.149,63	\$ 10.149,63	\$ 10.149,63	\$ 10.276,50
NODO 16	\$ 8.119,70	\$ 4.313,59	\$ 2.918,02	\$ 1.014,96	\$ -	\$ 1.776,18	\$ 10.403,37	\$ 10.022,76	\$ 9.895,89	\$ 10.403,37	\$ 10.149,63
NODO 17	\$ 8.880,92	\$ 5.328,55	\$ 10.149,63	\$ 9.261,53	\$ 1.776,18	\$ -	\$ 9.261,53	\$ 10.276,50	\$ 9.388,40	\$ 10.149,63	\$ 11.164,59
NODO 18	\$ 17.000,62	\$ 12.179,55	\$ 11.164,59	\$ 10.276,50	\$ 10.403,37	\$ 9.261,53	\$ -	\$ 1.395,57	\$ 1.522,44	\$ 2.791,15	\$ 5.709,17
NODO 19	\$ 17.127,50	\$ 12.306,42	\$ 11.164,59	\$ 10.149,63	\$ 10.022,76	\$ 10.276,50	\$ 1.395,57	\$ -	\$ 1.903,06	\$ 2.537,41	\$ 5.455,42
NODO 20	\$ 17.000,62	\$ 12.306,42	\$ 10.022,76	\$ 10.149,63	\$ 9.895,89	\$ 9.388,40	\$ 1.522,44	\$ 1.903,06	\$ -	\$ 2.283,67	\$ 5.201,68
NODO 21	\$ 17.761,85	\$ 13.067,64	\$ 11.037,72	\$ 10.149,63	\$ 10.403,37	\$ 10.149,63	\$ 2.791,15	\$ 2.537,41	\$ 2.283,67	\$ -	\$ 4.694,20
NODO 22	\$ 15.351,31	\$ 12.560,16	\$ 11.037,72	\$ 10.276,50	\$ 10.149,63	\$ 11.164,59	\$ 5.709,17	\$ 5.455,42	\$ 5.201,68	\$ 4.694,20	\$ -

Fuente: Los Autores.

De igual forma, se establecen las ventanas de tiempo en los cuáles los clientes están dispuestos a recibir los productos, estos horizontes de tiempos están definidos en minutos.

Esta información fue suministrada por el supervisor de la empresa caso de estudio.

Tabla 14. Matriz de Ventanas de Tiempo.

CLIENTE	INTERVALO HORA DE RECIBO	TIEMPO MÁS TEMPRANO (MIN)	TIEMPO MÁS TARDÍO (MIN)
NODO 1	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 2	[06:00 AM, 09:00 AM]	360	540
NODO 3	[10:00 AM, 12:00 MD]	600	720
NODO 4	[10:00 AM, 12:00 MD]	600	720
NODO 5	[08:00 AM, 10:00 AM]	480	600
NODO 6	[05:00 AM, 08:00 AM]	300	480
NODO 7	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 8	[06:00 AM, 08:00 AM]	360	480
NODO 9	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 10	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 11	[10:00 AM, 12:00 MD]	600	720
NODO 12	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 13	[07:00 AM, 10:00 AM]	420	600
NODO 14	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 15	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 16	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 17	[06:00 AM, 09:00 AM]	360	540
NODO 18	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720
NODO 19	[06:00 AM, 09:00 AM]	360	540
NODO 20	[06:00 AM, 08:00 AM]	360	480
NODO 21	[08:00 AM, 10:00 AM]	480	600
NODO 22	[08:00 AM, 12:00 MD]	480	720

Fuente: Los Autores.

Por último, se describen los tiempos de servicio o descargue de los vehículos en cada uno de los clientes.

Tabla 15. Tiempos de Servicio (Min).

CLIENTE	TIEMPO DE SERVICIO
NODO 0	0
NODO 1	20
NODO 2	30
NODO 3	20
NODO 4	20
NODO 5	20
NODO 6	30
NODO 7	10
NODO 8	30
NODO 9	15
NODO 10	20
NODO 11	30
NODO 12	15
NODO 13	45
NODO 14	15
NODO 15	60
NODO 16	10
NODO 17	20
NODO 18	10
NODO 19	60
NODO 20	30
NODO 21	15
NODO 22	15

Fuente: Los Autores.

6 DEFINICIÓN DEL MODELO

Con base en el diagnóstico del Sistema de Distribución Actual de la empresa caso de estudio y la revisión de la literatura el cual se contempla en el estado del arte, en este capítulo se realiza la definición del modelo matemático que recoge todas las características del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.

Con el fin de definir el modelo a proponer para resolver el problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo de la empresa caso de estudio, se buscó en la literatura cuáles de los modelos son los más utilizados para resolver este tipo de problemas, y clasificarlos según la eficacia en los siguientes criterios:

1. Distancias Totales Obtenidas en un tiempo máximo de 200 segundos.
2. Tiempos de Ejecución Obtenidas.

Para éste análisis se tomó como referencia los modelos de (Dash et al. 2009), (Toth y Vigo, 2002), y (Cordone y Wolfler, 2001).

Los resultados se tomaron con base en la solución de las instancias de Solomon, para una cantidad de 50 y 100 Nodos, ya que para estas se tienen una solución factible de 360.2 y 589.1 Kilómetros respectivamente.

Tabla 16. Resumen de Resultados.

INSTANCIA	MODELO DE DASH		MODELO DE TOTH Y VIGO		MODELO DE CORDONE Y WOLFLER	
	MEJOR SOLUCIÓN FACTIBLE (KM)	TIEMPO DE EJECUCIÓN (SEG)	MEJOR SOLUCIÓN FACTIBLE (KM)	TIEMPO DE EJECUCIÓN (SEG)	MEJOR SOLUCIÓN FACTIBLE (KM)	TIEMPO DE EJECUCIÓN (SEG)
50 NODOS	357.324	23.936	357.24	4.701	357.24	0.647
100 NODOS	N/A	200	588.628	41.747	588.628	8.195

Fuente: Arturo, 2016.

Con base en los resultados, a excepción del modelo de (Dash, 2009), los demás modelos mejoran las soluciones factibles para las instancias de propuestas por Solomon en un tiempo a lo máximo de 200 segundos, pero como muestra la tabla 16, el modelo de (Cordone y Wolfler, 2001), presenta menor tiempo computacional para llegar una solución factible y resolver el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.

Por esta razón, el modelo propuesto para dar solución al problema de la empresa caso de estudio, es el referente del Modelo de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo y Capacidad Limitada (Cordone & Wolfler, 2001), considerándose del tipo NP – HARD por su complejidad matemática.

Para el Planteamiento del Modelo se consideran los siguientes supuestos:

- Se consideran Ventanas de Tiempo Blandas.
- Los Costos, Demanda, Capacidad y Tiempo de Recibo de los Clientes se consideran Determinísticos.
- No se considera los tiempos de demoras por tráfico.
- Se trabaja bajo la modalidad de Monoperiodo, analizando el comportamiento de los costos en cada uno de los días de despacho por separado.
- No se considera el análisis de los tiempos en cola de atención para los descargues.
- Las distancias se consideran Simétricas.
- Se considera una Velocidad Máxima de los Vehículos de 60 Km/Hora.
- Se supone un Nodo Ficticio en la Entrada de la Ciudad de Cali, el cual se empleará como un depósito alternativo o ficticio para efectos de facilitar la modelación matemática. El nodo ficticio fue determinado a partir de la distancia más corta ente el depósito central ubicado en el municipio de La Unión y la entrada a la ciudad de Cali empleando Google Maps.

El Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo se formula de la Siguiete manera:

Se considera una red de distribución definida por el Grafo $G = (N, A)$, donde $N = \{0, \dots, n\}$ es el conjunto de nodos y $A \in (i, j)$ representa el conjunto de Arcos, con $i \neq j$. Un Grafo completo posee arcos hacia todos los nodos.

Los Nodos $i = \{1, \dots, n\}$ corresponde a los Clientes y el Nodo i_0 corresponde al Depósito.

La ventana de tiempo general asociada a los nodos de salida y de llegada se representa como $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [S, L]$, donde S representa la salida más temprana posible y L la llegada al nodo más tardía posible.

Para cada Nodo $A \in (i, j)$ se define lo siguiente:

Conjuntos:

Nodo $i, j = 0, \dots, n$; donde representa i el Nodo de salida / llegada de los vehículos y n representa el número total de destinos a visitar.

Origen $i = 0$; donde i representa el Nodo Origen Ficticio.

Clientes $i, j = 1, \dots, n$; donde i representa los clientes que se van a visitar.

Vehículos $K = 0, \dots, k$; donde k representa el número total de vehículos que se van a utilizar.

Variables de Decisión:

X_{ijk} : 1, si se recorre del Nodo i al Nodo j en el vehículo k .

Y_{ik} : Cantidad producto del vehículo k al salir del nodo i .

Z_{ik} : Comienzo del Servicio en el Nodo i con el vehículo k .

Parámetros:

c_{ij} : Costo del recorrido entre el Nodo i al Nodo j .

d_i : Demanda asociada a cada Nodo i .

cap : Capacidad del Vehículo k .

t_{ij} : Tiempo de viaje o recorrido del Nodo i al Nodo j .

s_i : Tiempo de servicio en el Nodo i .

a_i : Salida más temprana posible del Nodo i .

b_i : Llegada más temprana posible del Nodo i .

M : Valor elevado para cota superior en algunas restricciones.

Función Objetivo:

$$\text{Minimizar} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^k X_{ijk} * c_{ij} \quad (1)$$

(1) La Función Objetivo pretende minimizar el Costo Total de Recorrido entre los Nodo i y j .

Restricciones:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n \sum_{k=1}^k X_{ijk} = 1 \quad \forall i \neq i_0 \quad (2)$$

(2) Para todo Nodo distinto al Origen, el número de Arcos debe ser igual a 1.

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{ijk} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{jik} \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (3)$$

(3) El número de Arcos que llegan a un nodo debe ser igual al número de Arcos que salen.

$$\sum_{j=1}^n X_{i_0jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, k \quad (4)$$

(4) Para el Nodo Origen sólo puede salir un Arco hacia el Nodo Destino.

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \sum_{k=1}^k X_{ijk} = 1 \quad \forall j \neq i_0 \quad (5)$$

(5) Para todo Nodo diferente del Nodo Origen, debe existir un Arco que entre a éste Nodo.

$$Z_{ik} + S_i + t_{ij} \leq M(1 - X_{ijk}) + Z_{jk} \quad \forall i \neq j; j \neq i_0; k = 1, \dots, k \quad (6)$$

(6) Dado que existe un Arco de i a j utilizando el vehículo k , el tiempo de comienzo de servicio en el Nodo j debe ser menor o igual al Tiempo de comienzo de servicio en el Nodo i , más el Tiempo de Servicio en el Nodo, más el Tiempo de desplazarse del Nodo i al Nodo j . Si no existe un Arco de i a j con el vehículo k , se tiene una cuota superior para los Tiempos de servicio.

$$a_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{ijk} \leq Z_{ik} \leq b_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{ijk} \quad \forall i \neq i_0; k = 1, \dots, k \quad (7)$$

(7) Garantiza que el Inicio del Servicio en el Nodo i se lleve a cabo dentro de la Ventana de Tiempo $[a_1, b_1]$.

$$Y_{ik} + d_j \leq M(1 - X_{ijk}) + Y_{jk} \quad \forall i \neq j; j \neq i_0; k = 1, \dots, k \quad (8)$$

(8) Restringe la carga transportada por el vehículo k .

$$d_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{ijk} \leq Y_{ik} \leq cap_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n X_{ijk} \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (9)$$

(9) Indica que la Cantidad Total demanda por los Nodos i no puede exceder la capacidad del vehículo k .

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j / a_i + s_i + t_{i,j} \leq b_j; k = 1, \dots, k \quad (10)$$

(10) Define la Naturaleza Binaria de las Variables.

$$Y_{ik} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (11)$$

$$Z_{ik} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, k \quad (12)$$

(11) y (12) Restricciones de no Negatividad.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este Capítulo se describen los resultados obtenidos del modelo mediante la plataforma Neos Solver for Optimization ® y así comparar estos datos con los costos actuales del Sistema de Distribución de la empresa caso de Estudio. Por último, se realiza un análisis de sensibilidad, alterando parámetros críticos en el proceso de distribución.

7.1 Resultados de la Solución del Modelo.

Para dar solución al modelo matemático planteado en el capítulo anterior, se programó el modelo en AMPL, utilizando el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS para dar solución a dicho modelo; se realizaron tres corridas con el fin de caracterizar las rutas óptimas en los días en que la empresa realiza el despacho de fruta. Dicha evaluación se realizó en un equipo con procesador AMD® A8 – 6410 APU, con 4 GB de Memoria RAM, disco duro de 500 GB y sistema operativo Windows 10 Home Single de 64 Bits.

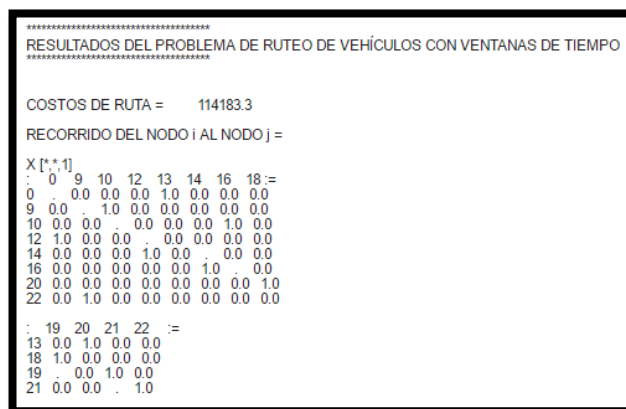
Los resultados que arrojó el solver fueron los siguientes:

7.1.1 Día lunes.

Para el día lunes, la solución del modelo propuesto se originó en un tiempo computacional de 400 segundos, con un total de 1100 variables, 1012 variables binarias y 88 variables lineales; 2116 restricciones todas lineales, 90 restricciones de igualdad y 2026 restricciones de desigualdad.

Los resultados se muestran en la Figura 10:

Figura 10. Ruta Óptima de Distribución – Día Lunes.



```
*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO
*****

COSTOS DE RUTA =      114183.3

RECORRIDO DEL NODO i AL NODO j =

X[*,*]
0  9  10  12  13  14  16  18 :=
0  .  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  0.0
9  0.0  .  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
10 0.0  0.0  .  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0
12 1.0  0.0  0.0  .  0.0  0.0  0.0  0.0
14 0.0  0.0  0.0  1.0  .  0.0  0.0  0.0
16 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  .  1.0  0.0
18 0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  .  1.0
22 0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  .

.  19  20  21  22 :=
13 0.0  1.0  0.0  0.0
18 1.0  0.0  0.0  0.0
19  .  0.0  1.0  0.0
21 0.0  0.0  .  1.0
```

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 10: Ruta Óptima de Distribución – Día Lunes (Continuación).

[*,2]								
:	0	1	2	3	4	5	6	7:=
1	0.0		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0		1.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	1.0
5	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0		0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
15	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
:								
:	8	11	15	17	:=			
0	0.0	0.0	0.0	1.0				
7	0.0	1.0	0.0	0.0				
11	0.0		1.0	0.0				
17	1.0	0.0	0.0					
:								

VEHICULOS EN EL CUAL TRANSPORTAR =

Y [*,*]								
:	1	2	:=					
1	0.0	1830.0						
2	0.0	2042.0						
3	0.0	2287.0						
4	0.0	2532.0						
5	0.0	1510.0						
6	0.0	1290.0						
7	0.0	2972.0						
8	0.0	970.0						
9	3470.0	0.0						
10	3737.0	0.0						
11	0.0	3292.0						
12	4314.0	0.0						
13	865.0	0.0						
14	4114.0	0.0						
15	0.0	4278.0						
16	3904.0	0.0						
17	0.0	323.0						
18	1295.0	0.0						
19	2317.0	0.0						
20	1075.0	0.0						
21	2628.0	0.0						
22	2896.0	0.0						
:								

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 10: Ruta Óptima de Distribución – Día Lunes (Continuación).

COMIENZO DEL SERVICIO =			
Z [*,*]			
	1	2	:=
1	0.0	517.8	
2	0.0	540.0	
3	0.0	600.0	
4	0.0	620.9	
5	0.0	480.0	
6	0.0	422.2	
7	0.0	674.4	
8	0.0	385.0	
9	643.5	0.0	
10	660.3	0.0	
11	0.0	687.9	
12	720.0	0.0	
13	420.0	0.0	
14	700.7	0.0	
15	0.0	720.0	
16	688.4	0.0	
17	0.0	360.0	
18	505.9	0.0	
19	517.0	0.0	
20	474.7	0.0	
21	579.0	0.0	
22	621.7	0.0	

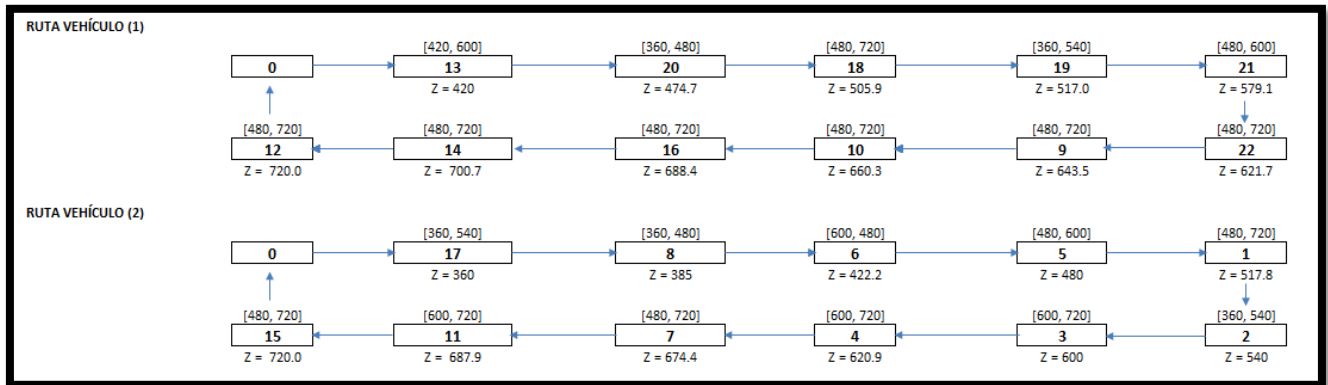
Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Con base en estos resultados, se evidencia que el costo de la Ruta para los 2 Vehículos es de **\$114183.3**, se utilizaron dos vehículos con una capacidad homogénea de 5300 Kilogramos; el primer vehículo sale a las 4:30 A.M, visitando un Total de 11 Clientes, sirviendo un Total de 3900 Kilogramos de Fruta, el tiempo de recorrido desde que sale del Depósito ubicado en La Unión Valle hasta que regresa nuevamente allí es de **11 Horas y 30 Minutos**, con un porcentaje de utilización del Vehículo del **73.6%**.

El Vehículo 2, sale del depósito a las 4:30 A.M, visita un Total de 11 Clientes sirviendo un total de 3989 Kilogramos de Fruta, en un tiempo de **12 Horas**, con un porcentaje de utilización del **75.2%**.

Los Tiempos de Servicio en los cuales los vehículos deben de estar parqueados en cada uno de los clientes esperando para ser descargados, cumplen con las Ventanas de Tiempo establecidas con anterioridad entre el cliente y la empresa caso de estudio, dichos parámetros se observan en la figura 11. Los Tiempos de Servicio están representados por la Letra Z.

Figura 11. Ventanas de Tiempo - Día Lunes.



Fuente: Los Autores:

De igual forma, se muestra los diferentes horarios en los cuales los vehículos deben de llegar y salir de cada cliente, cumpliendo con las restricciones de Tiempo plasmadas con anterioridad:

Tabla 17. Tiempos Ruta 1 - Día Lunes.

CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 13	7:00 A.M	7:45 A.M
NODO 20	7:54 A.M	8:24 A.M
NODO 18	8:25 A.M	8:35 A.M
NODO 19	8:37 A.M	9:37 A.M
NODO 21	9:39 A.M	9:54 A.M
NODO 22	10:21 A.M	10:36 A.M
NODO 9	10:43 A.M	10:58 A.M
NODO 10	11: 00 A.M	11:20 A.M
NODO 16	11:28 A.M	11:38 A.M
NODO 14	11:40 A.M	11:55 A.M
NODO 12	12:00 M.D	12:15 P.M

Fuente: Los Autores

Tabla 18. Tiempos Ruta 2 - Día Lunes.

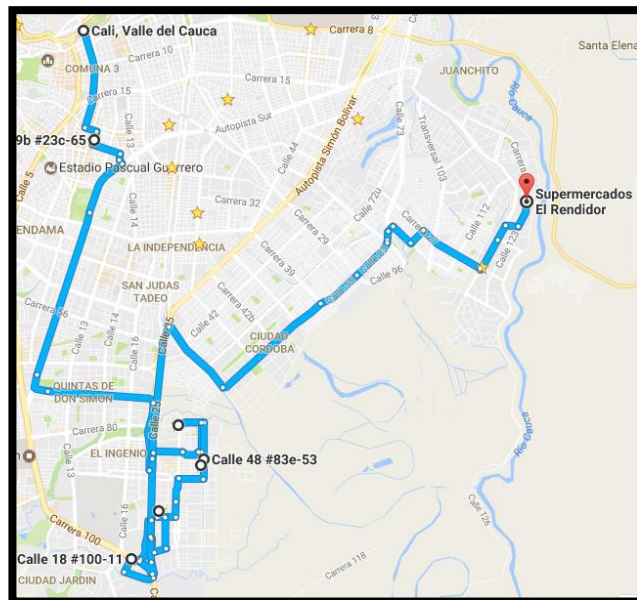
CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 17	6:00 A.M	6:20 A.M
NODO 8	6:25 A.M	6:55 A.M
NODO 6	7:02 A.M	7:32 A.M
NODO 5	8:00 A.M	8:20 A.M
NODO 1	8:37 A.M	8:57 A.M
NODO 2	9:00 A.M	9:30 A.M
NODO 3	10: 00 A.M	10:07 A.M
NODO 4	10:20 A.M	10:40 A.M
NODO 7	11:14 A.M	11:24 A.M
NODO 11	11:27 A.M	11:57 A.M
NODO 15	12:00 M.D	01:00 P.M

Fuente: Los Autores

A continuación se muestra el recorrido que debe de realizar los vehículos en cada una de las Rutas asignadas.

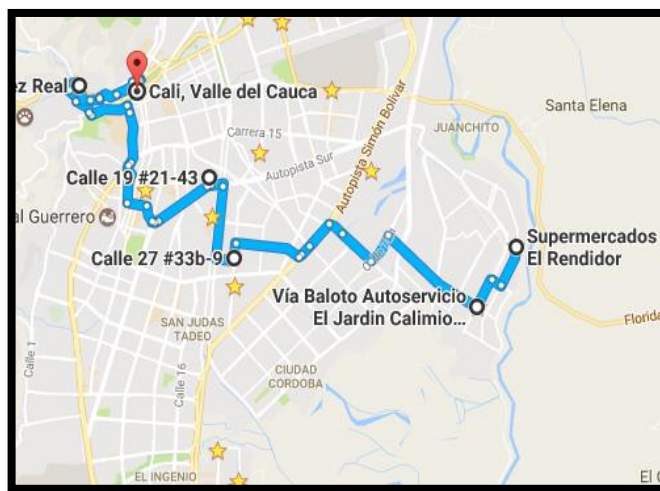
Se dividen las Figuras 12 y 13, debido a que Google Maps ® solo deja visualizar 9 destinos dentro de una misma Ruta.

Figura 12. Ruta Óptima 1 – Día Lunes.



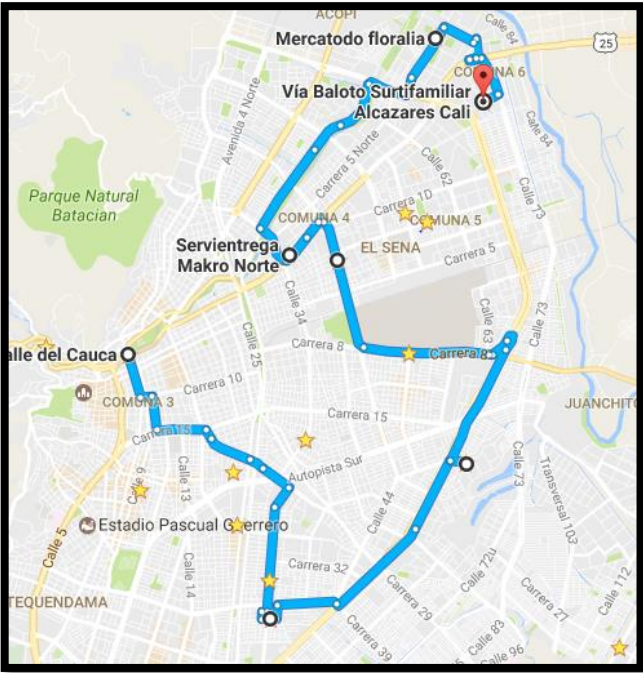
Fuente: Google Maps.

Figura 12: Ruta Óptima 1 – Día Lunes (Continuación).



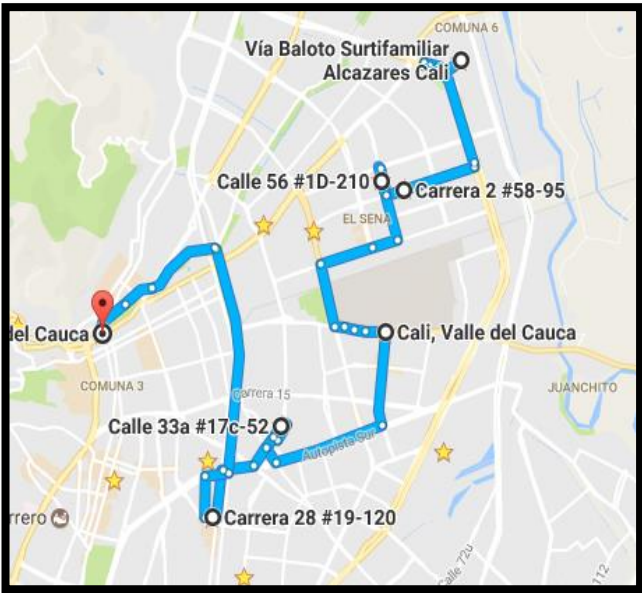
Fuente: Google Maps.

Figura 13. Ruta Óptima 2 – Día Lunes.



Fuente: Google Maps.

Figura 13: Ruta Óptima 2 – Día Lunes (Continuación).



Fuente: Google Maps.

Una vez plasmadas las rutas, se muestra la distancia Total por Recorrido de cada uno de los vehículos, en primera instancia se muestra la distancia desde el Depósito hasta el Nodo ficticio y viceversa, y después la distancia total entre los clientes.

Tabla 19. Distancia Total Vehículo 1 - Día Lunes.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	45.4 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	373.4 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

Tabla 20. Distancia Total Vehículo 2 - Día Lunes.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	44.6 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	372.6 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

De igual manera, se muestra la carga con la cual cada vehículo debe de salir de cada Nodo, con el fin de suplir la demanda de cada cliente (Ver Tablas 21 y 22).

Tabla 21. Carga del Vehículo 1 - Día Lunes.

CLIENTE	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO	DEMANDA SERVIDA (KG)
NODO 13	865	865
NODO 20	1075	210
NODO 18	1295	220
NODO 19	2317	1022
NODO 21	2628	311
NODO 22	2896	268
NODO 9	3470	574
NODO 10	3737	267
NODO 16	3904	167
NODO 14	4114	210
NODO 12	4314	200

Fuente: Los Autores.

Tabla 22. Carga del Vehículo 2 - Día Lunes.

CLIENTE	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO	DEMANDA SERVIDA (KG)
NODO 17	323	323
NODO 8	970	647
NODO 6	1290	320
NODO 5	1510	220
NODO 1	1830	320
NODO 2	2042	212
NODO 3	2287	245
NODO 4	2532	245
NODO 7	2972	145
NODO 11	3292	320
NODO 15	4278	986

Fuente: Los Autores.

Una vez analizadas todas estas variables, se procede a calcular el Costo Total de la Ruta, donde se tiene en cuenta tanto los Costos Fijos como los Variables (Ver Tabla 23). El Costo Total de la Ruta en un día de distribución es de **\$1159278.88**.

Tabla 23. Estructura de Costos Ruta - Día Lunes.

COSTOS VARIABLES	
COSTO DE RUTA DESDE EL CD HASTA EL NODO FICTICIO	\$ 832,269.39
COSTO DE RUTA ENTRE CLIENTES	\$ 114,183.30
COSTOS FIJOS	
SEGUROS	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00
COSTO TOTAL DE DISTRIBUCIÓN	\$1,159,278.88

Fuente: Los Autores

7.1.2 Día miércoles.

Para el día miércoles, los clientes número 4, 7, 9, 17 y 20 (Ver Tabla 10), no realizan pedido de venta a la empresa caso de estudio, por esta razón la solución del modelo propuesto se originó en un tiempo computacional de 21.4 segundos, con un total de 682 variables, 612 variables binarias y 70 variables lineales; 1330 restricciones todas lineales, 70 restricciones de igualdad y 1260 restricciones de desigualdad.

Los resultados se muestran en la Figura 14:

Figura 14. Ruta Óptima de Distribución – Día Miércoles.

```
*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO
*****

COSTOS DE RUTA =          102765.0

RECORRIDO DEL NODO i AL NODO j =

X :=
0  8  2  1.0
0  13 1  1.0
1  3  1  1.0
2  1  1  1.0
3  11 1  1.0
5  2  1  1.0
6  5  1  1.0
8  10 2  1.0
10 18 2  1.0
11 0  1  1.0
12 0  2  1.0
13 6  1  1.0
14 12 2  1.0
15 14 2  1.0
16 15 2  1.0
18 19 2  1.0
19 21 2  1.0
21 22 2  1.0
22 16 2  1.0
;
```

Fuente: Neos Solver Optimization ®

Figura 14: Ruta Óptima de Distribución – Día Miércoles (Continuación).

VEHICULOS EN EL CUAL TRANSPORTAR =		
Y :=		
1	1	1762.0
2	1	1464.0
3	1	2002.0
5	1	1184.0
6	1	1004.0
8	2	745.0
10	2	1150.0
11	1	2322.0
12	2	4646.0
13	1	654.0
14	2	4366.0
15	2	4080.0
16	2	3210.0
18	2	1450.0
19	2	2200.0
21	1	0.0
21	2	2490.0
22	2	2860.0
;		

Fuente: Neos Solver Optimization ®

Figura 14: Ruta Óptima 1 – Día Miércoles (Continuación).

COMIENZO DEL SERVICIO =		
Z :=		
1	1	568.7
2	1	536.5
3	1	600.0
5	1	511.7
6	1	480.0
8	2	360.0
10	2	480.0
11	1	720.0
12	2	720.0
13	1	420.0
14	2	700.0
15	2	638.5
16	2	627.7
18	2	512.9
19	2	524.0
21	2	586.0
22	2	604.7
;		

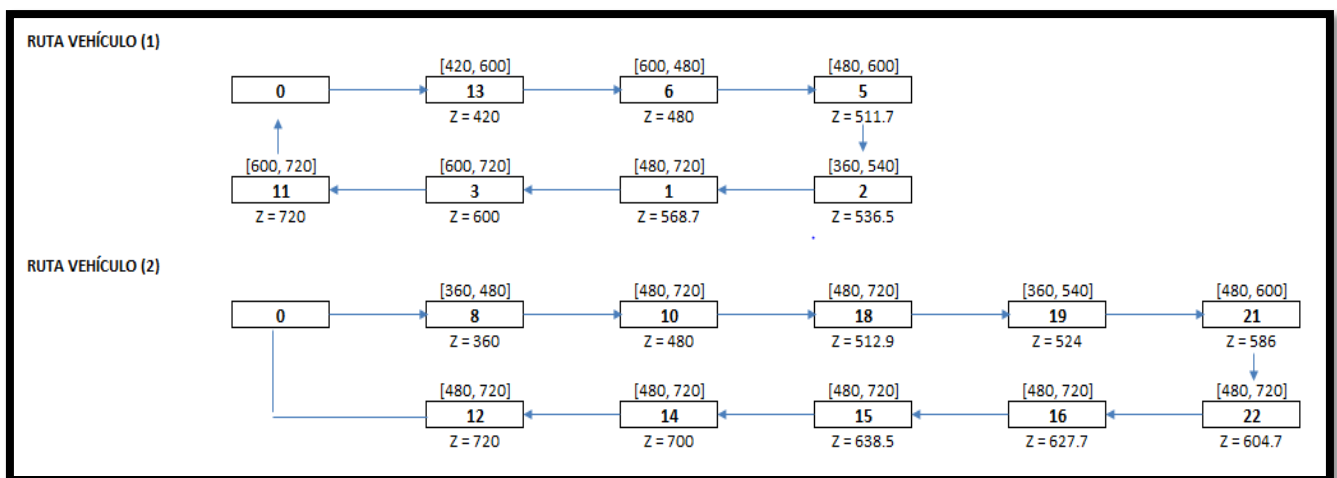
Fuente: Neos Solver Optimization ®

Se evidencia que el costo Total de la Ruta es de **\$102765**, se utilizaron dos vehículos con capacidad homogénea de 5300 Kilogramos; el primero sale a las 4:30 A.M, visitando un Total de 7 Clientes en un tiempo total de **10 Horas y 30 Minutos**, con un porcentaje de utilización del Vehículo del **43.8%**.

El segundo vehículo, sale del depósito a las 3:30 A.M, visitando 10 Clientes en un tiempo de **12 Horas**, con un porcentaje de utilización del **86.4%**.

Los tiempos de servicios se evidencian en la Figura 15.

Figura 15. Ventanas de Tiempo - Día Miércoles.



Fuente: Los Autores.

De igual forma, se muestra en las Tablas 24 y 25 el horario de llegada y salida a cada uno de los nodos, respetando las ventanas de tiempo.

Tabla 24. Tiempos Ruta 1 - Día Miércoles.

CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 13	7:00 A.M	7:45 A.M
NODO 6	8:00 A.M	8:30 A.M
NODO 5	8:31 A.M	8:51 A.M
NODO 2	8:56 A.M	9:26 A.M
NODO 1	9:28 A.M	9:48 A.M
NODO 3	10:00 A.M	10:20 A.M
NODO 11	12:00 M.D	12:30 P.M

Fuente. Los Autores

Tabla 25. Tiempos Ruta 2 - Miércoles.

CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 8	6:00 A.M	6:30 A.M
NODO 10	8:00 A.M	8:20 A.M
NODO 18	8:32 A.M	8:42 A.M
NODO 19	8:44 A.M	9:44 A.M
NODO 21	9:46 A.M	10:01 A.M
NODO 22	10:04 A.M	10:19 A.M
NODO 16	10:27 A.M	10:37 A.M
NODO 15	10:38 A.M	11:38 A.M
NODO 14	11:40 A.M	11:55 A.M
NODO 12	12:00 M.D	12:15 P.M

Fuente. Los Autores

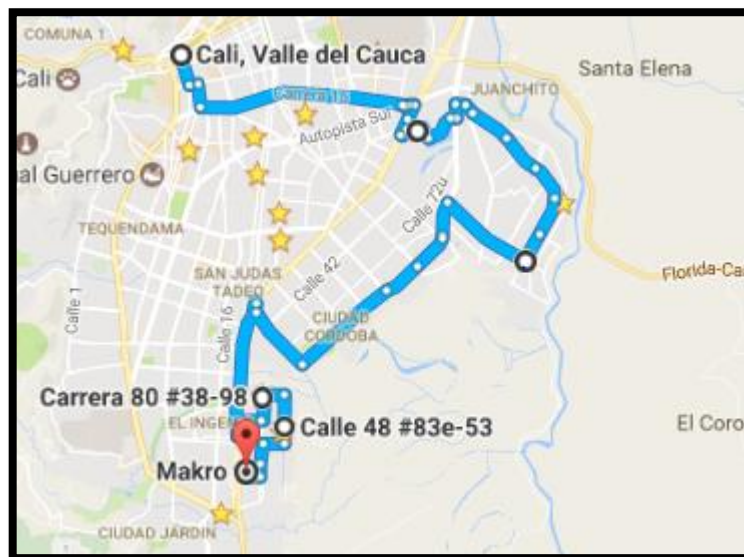
A continuación se muestra el recorrido que debe de realizar los vehículos en cada una de las Rutas asignadas.

Figura 16. Ruta Óptima 1 – Día Miércoles.



Fuente. Google Maps.

Figura 17. Ruta Óptima 2 – Día Miércoles.



Fuente. Google Maps.

Figura 17: Ruta Óptima 2 – Día Miércoles (Continuación).



Fuente. Google Maps.

Luego de ilustrar las rutas que deben de seguir cada uno de los vehículos, a continuación se calcula la distancia total de cada una de las rutas (Ver Tabla 26 y 27).

Tabla 26. Distancia Total Vehículo 1 - Día Miércoles.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	32.2 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	360.2 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

Tabla 27. Distancia Total Vehículo 2 - Día Miércoles.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	50.2 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	378.2 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

De igual forma, se muestra la carga con la cual cada vehículo debe de salir de cada Nodo (Ver Tablas 28 y 29).

Tabla 28. Carga del Vehículo 1 - Día Miércoles.

CLIENTE	DEMANDA SERVIDA (KG)	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO
NODO 13	654	654
NODO 6	350	1004
NODO 5	180	1184
NODO 2	280	1464
NODO 1	298	1762
NODO 3	240	2002
NODO 11	320	2322

Fuente: Los Autores.

Tabla 29. Carga del Vehículo 2 - Día Miércoles.

CLIENTE	DEMANDA SERVIDA (KG)	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO
NODO 8	745	745
NODO 10	405	1150
NODO 18	300	1450
NODO 19	750	2200
NODO 21	290	2490
NODO 22	370	2860
NODO 16	350	3210
NODO 15	870	4080
NODO 14	220	4366
NODO 12	280	4646

Fuente: Los Autores.

Luego de realizar el análisis de los resultados arrojados por el modelo propuesto, se procede a calcular el Costo Total de la Ruta, (Ver Tabla 30). El Costo Total de la Ruta en un día de distribución es de **\$1147860.58**.

Tabla 30. Estructura de Costos Ruta - Día Miércoles.

COSTOS VARIABLES	
COSTO DE RUTA DESDE EL CD HASTA EL NODO FICTICIO	\$ 832,269.39
COSTO DE RUTA ENTRE CLIENTES	\$ 102,765.00
COSTOS FIJOS	
SEGUROS	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00
COSTO TOTAL DE DISTRIBUCIÓN	\$ 1,147,860.58

Fuente: Los Autores

7.1.3 Día Viernes.

Para este día, los clientes número 6, 10, 12 y 16 (Ver Tabla 10), no realizan pedido de venta a la empresa caso de estudio; el tiempo computacional que se demoró la solución del modelo fue de 182.90 segundos, con un total de 758 variables, 684 variables binarias y 74 variables lineales; 1480 restricciones todas lineales, 74 restricciones de igualdad y 1406 restricciones de desigualdad.

Los resultados se muestran en la Figura 18:

Figura 18. Ruta Óptima de Distribución – Día Viernes.

```
*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS CON VENTANAS DE TIEMPO
*****

COSTOS DE RUTA =      97943.9

RECORRIDO DEL NODO i AL NODO j =

X :=
0 13 2 1.0
0 17 1 1.0
1 5 2 1.0
2 1 2 1.0
3 0 2 1.0
4 3 2 1.0
5 4 2 1.0
7 2 2 1.0
8 7 2 1.0
9 11 1 1.0
11 15 1 1.0
13 8 2 1.0
14 0 1 1.0
15 14 1 1.0
17 20 1 1.0
18 19 1 1.0
19 21 1 1.0
20 18 1 1.0
21 22 1 1.0
22 9 1 1.0
;
```

Fuente. Neos Solver Optimization ®

Figura 18. Ruta Óptima de Distribución – Día Viernes (Continuación).

VEHICULOS EN EL CUAL TRANSPORTAR =		
Y :=		
1	2	2100.0
2	2	1840.0
3	2	4400.0
4	2	4133.0
5	2	2420.0
7	2	1530.0
8	2	1330.0
9	1	3173.0
11	1	3520.0
13	2	600.0
14	1	4570.0
15	1	4390.0
17	1	270.0
18	1	691.0
19	1	1591.0
20	1	526.0
21	1	1826.0
22	1	2013.0
;		

Fuente. Neos Solver Optimization ®

Figura 18. Ruta Óptima de Distribución – Día Viernes (Continuación).

COMIENZO DEL SERVICIO =		
Z :=		
1	2	574.8
2	2	520.7
3	2	720.0
4	2	699.1
5	2	600.0
7	2	504.6
8	2	471.0
9	1	603.9
11	1	626.4
13	2	420.0
14	1	720.0
15	1	658.5
17	1	360.0
18	1	480.0
19	1	491.1
20	1	387.4
21	1	563.4
22	1	582.1
;		

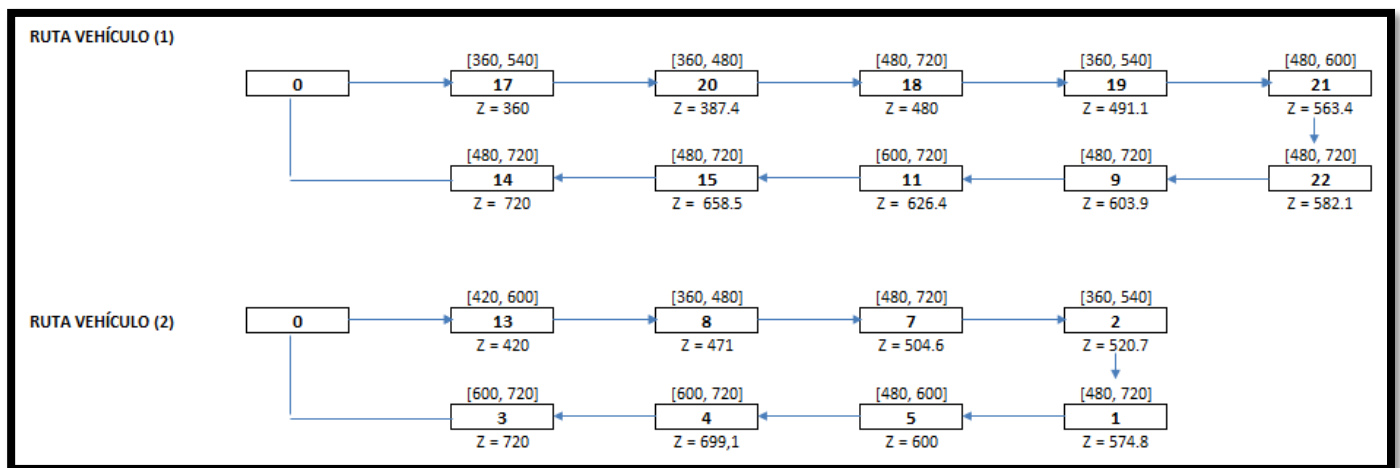
Fuente. Neos Solver Optimization ®

El Costo Total del recorrido de los clientes es de **\$97943.9**, para este recorrido se utilizaron dos vehículos con capacidad homogénea de 5300 Kilogramos; el primero sale a las 3:30 A.M, visitando un Total de 10 Clientes en un tiempo total de **12 Horas y 30 Minutos**, con un porcentaje de utilización del Vehículo del **69.6%**.

El segundo vehículo, sale del depósito a las 4:30 A.M, visita 8 Clientes en un tiempo de **11 Horas y 30 Minutos**, con un porcentaje de utilización del **55.5%**.

Los tiempos de servicios de cada uno de los clientes se ilustran en la Figura 19.

Figura 19. Ventanas de Tiempo - Día Viernes.



Fuente. Los Autores.

En las Tablas 31 y 32, se muestra los horarios de los vehículos a cada uno de los clientes, respetando los horarios de recibo.

Tabla 31. Tiempos Ruta 1 - Día Viernes.

CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 17	6:00 A.M	6:20 A.M
NODO 20	6:27 A.M	6:57 A.M
NODO 18	8:00 A.M	8:10 A.M
NODO 19	8:11 A.M	9:11 A.M
NODO 21	9:23 A.M	9:38 A.M
NODO 22	9:42 A.M	9:57 A.M
NODO 9	10:03 A.M	10:18 A.M
NODO 11	10:26 A.M	10:56 A.M
NODO 15	10:58 A.M	11:58 A.M
NODO 14	12:00 M.D	12:15 P.M

Fuente. Los Autores

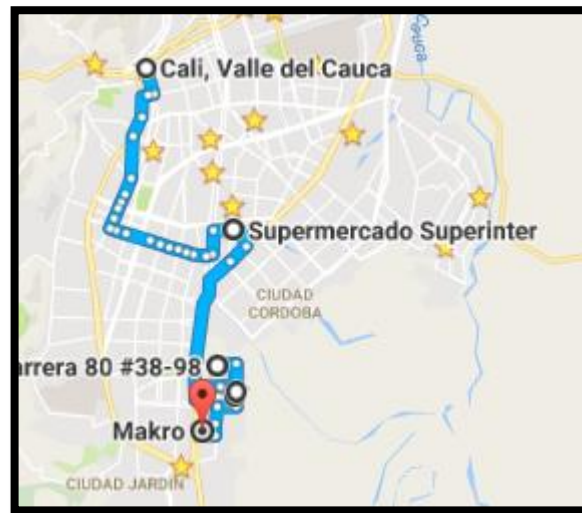
Tabla 32. Tiempos Ruta 2 - Día Miércoles.

CLIENTE	HORA DE LLEGADA	HORA DE SALIDA
NODO 13	7:00 A.M	7:45 A.M
NODO 8	7:51 A.M	8:21 A.M
NODO 7	8:24 A.M	8:34 A.M
NODO 2	8:40 A.M	9:10 A.M
NODO 1	9:34 A.M	9:54 A.M
NODO 5	10:00 A.M	10:20 A.M
NODO 4	11:39 A.M	11:59 A.M
NODO 3	12:00 M.D	12:20 P.M

Fuente. Los Autores

Una vez se tienen los horarios de recibo de cada cliente, en las figuras 20 y 21, se muestra el recorrido que debe de seguir cada vehículo con el fin de suplir la demanda de cada uno de los clientes.

Figura 20. Ruta Óptima 1 – Día Viernes.



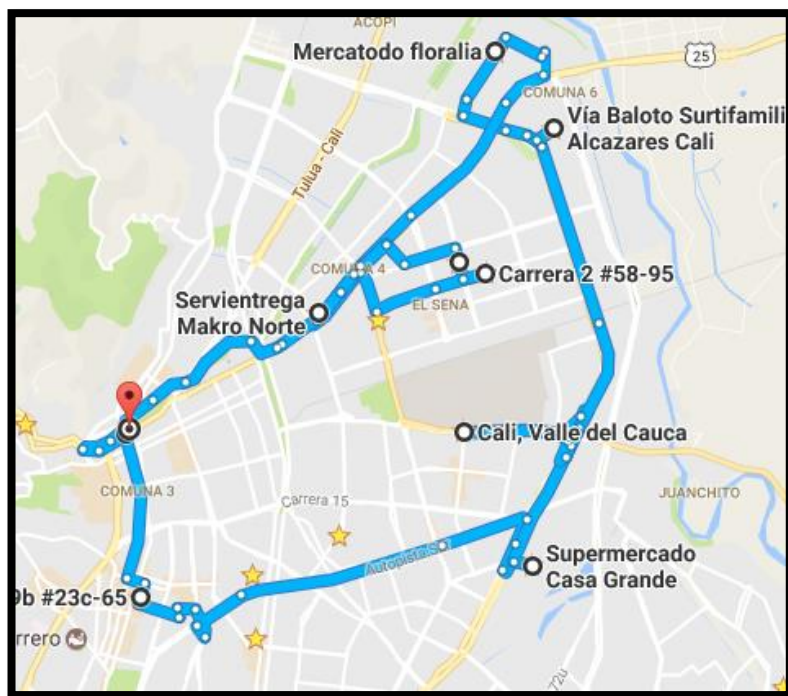
Fuente. Google Maps.

Figura 20: Ruta Óptima 1 – Día Viernes (Continuación).



Fuente. Google Maps.

Figura 21. Ruta Óptima 2 – Día Viernes.



Fuente. Google Maps

A continuación se calcula la distancia total de cada una de las rutas (Ver Tabla 33 y 34).

Tabla 33. Distancia Total Vehículo 1 - Día Viernes.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	42.1 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	370.1 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

Tabla 34. Distancia Total Vehículo 2 - Día Miércoles.

DISTANCIA RECORRIDA

<i>RECORRIDO DEPÓSITO – NODO ORIGEN FICTICIO</i>	164 Kilómetros.
<i>RECORRIDO ENTRE NODOS</i>	35.1 Kilómetros.
<i>REOCORRIDO NODO ORIGEN FICTICIO – DEPÓSITO</i>	164 Kilómetros.
<i>TOTAL RECORRIDO</i>	363.1 Kilómetros.

Fuente: Los Autores.

De igual forma, se muestra la carga con la cual cada vehículo debe de salir de cada Nodo (Ver Tablas 35 y 36).

Tabla 35. Carga del Vehículo 1 - Día Viernes.

CLIENTE	DEMANDA SERVIDA (KG)	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO
NODO 17	270	270
NODO 20	256	526
NODO 18	165	691
NODO 19	900	1591
NODO 21	235	1826
NODO 22	187	2013
NODO 9	280	2293
NODO 11	347	2640
NODO 15	870	3510
NODO 14	180	3690

Fuente: Los Autores.

Tabla 36. Carga del Vehículo 1 - Día Viernes.

CLIENTE	DEMANDA SERVIDA (KG)	CARGA DEL VEHÍCULO AL SALIR DEL NODO
NODO 13	600	600
NODO 8	730	1330
NODO 7	200	1530
NODO 2	310	1840
NODO 1	260	2100
NODO 5	320	2420
NODO 4	256	2676
NODO 3	267	2943
NODO 0	0	2943

Fuente: Los Autores.

Una vez analizado los resultados arrojados por el modelo propuesto, se procede a calcular el Costo Total de la Ruta, (Ver Tabla 37).

Dicho costo de distribución es de **\$1143039.48**.

Tabla 37. Estructura de Costos Ruta - Día Viernes.

COSTOS VARIABLES	
COSTO DE RUTA DESDE EL CD HASTA EL NODO FICTICIO	\$ 832,269.39
COSTO DE RUTA ENTRE CLIENTES	\$ 97,943.90
COSTOS FIJOS	
SEGUROS	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00
COSTO TOTAL DE DISTRIBUCIÓN	\$ 1,143,039.48

Fuente: Los Autores

7.2 Comparación con el Sistema Actual de Distribución.

Se va a realizar la comparación del costo total de distribución entre el sistema actual de distribución y los resultados arrojados por el modelo propuesto. Para esto, se muestra en las Tablas 38, 39 y 40, los costos totales de la Ruta asociada a los días lunes, miércoles y viernes respectivamente.

Tabla 38. Costos Distribución Actual - Día Lunes.

COSTOS VARIABLES			
COMPONENTE DE COSTOS		RUTA 1	RUTA 2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	\$ 764.76	\$ 233196.44	\$ 228607.88
CONSUMO DE LLANTAS	\$ 159.94	\$ 66055.22	\$ 65095.58
CONSUMO DE LUBRICANTES	\$ 39.67	\$ 16383.71	\$ 16145.69
CONSUMO DE FILTROS	\$ 10.96	\$ 4526.48	\$ 4460.72
MTTO Y REPARACIONES	\$ 230.23	\$ 95084.99	\$ 93703.61
LAVADO Y ENGRASE	\$ 27.98	\$ 11555.74	\$ 11387.86
IMPUESTOS	\$ 35.16	\$ 14521.08	\$ 14310.12
TOTAL	\$ 1,268.70	\$ 441323.66	\$ 433711.46
COSTOS FIJOS			
SEGUROS	\$ 841,542.02	\$ 70,128.50	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 1,256,372.00	\$ 104,697.69	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00
TOTAL	\$ 2234314.02	\$ 221026.17	\$ 221026.17
COSTO TOTAL DE LA RUTA		\$	1317087.46

Fuente: Los Autores.

Tabla 39. Costos Distribución Actual - Día Miércoles.

COSTOS VARIABLES			
COMPONENTE DE COSTOS		RUTA 1	RUTA 2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	\$ 764.76	\$ 221725.04	\$ 233196.44
CONSUMO DE LLANTAS	\$ 159.94	\$ 63656.12	\$ 66055.22
CONSUMO DE LUBRICANTES	\$ 39.67	\$ 15788.66	\$ 16383.71
CONSUMO DE FILTROS	\$ 10.96	\$ 4362.08	\$ 4526.48
MTTO Y REPARACIONES	\$ 230.23	\$ 91631.54	\$ 95084.99
LAVADO Y ENGRASE	\$ 27.98	\$ 11136.04	\$ 11555.74
IMPUESTOS	\$ 35.16	\$ 13993.68	\$ 14521.08
TOTAL	\$ 1,268.70	\$ 422293.16	\$ 441323.66
COSTOS FIJOS			
SEGUROS	\$ 841,542.02	\$ 70,128.50	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 1,256,372.00	\$ 104,697.69	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00
TOTAL	\$ 2,135,914.02	\$ 212,826.19	\$ 212,826.19
COSTO TOTAL DE LA RUTA		\$	1305669.16

Fuente: Los Autores.

Tabla 40. Costos Distribución Actual - Día Viernes.

COSTOS VARIABLES			
COMPONENTE DE COSTOS		ruta 1	ruta 2
CONSUMO DE COMBUSTIBLE	\$ 764.76	\$ 229372.64	\$ 225548.84
CONSUMO DE LLANTAS	\$ 159.94	\$ 65255.52	\$ 64455.82
CONSUMO DE LUBRICANTES	\$ 39.67	\$ 16185.36	\$ 15987.01
CONSUMO DE FILTROS	\$ 10.96	\$ 4471.68	\$ 4416.88
MTTO Y REPARACIONES	\$ 230.23	\$ 93933.84	\$ 92782.69
LAVADO Y ENGRASE	\$ 27.98	\$ 11415.84	\$ 11275.94
IMPUESTOS	\$ 35.16	\$ 14345.28	\$ 14169.48
TOTAL	\$ 1,268.70	\$ 434980.16	\$ 428636.66
COSTOS FIJOS			
SEGUROS	\$ 841,542.02	\$ 70,128.50	\$ 70,128.50
SALARIOS Y PRESTACIONES BÁSICAS	\$ 1,256,372.00	\$ 104,697.69	\$ 104,697.69
PEAJES	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00	\$ 38,000.00
TOTAL	\$ 2,135,914.02	\$ 212,826.19	\$ 212,826.19
COSTO TOTAL DE LA RUTA		\$	1305669.20

Fuente: Los Autores.

Una vez se tienen los costos actuales de distribución de la empresa caso de estudio, por los tres días en que realizan el despacho de fruta, se procede a realizar el siguiente cuadro, donde se comparan los costos arrojados por el modelo propuesto y los actuales de la organización. (Ver Tabla 41).

Tabla 41. Comparación de Costos.

DÍA	Sistema Actual	Modelo Propuesto	Reducción de Costos
Lunes.	\$ 1317087.46	\$ 1159278.88	12%
Miércoles.	\$ 1305669.16	\$ 1147860.58	12%
Viernes.	\$ 1305669.20	\$ 1143039.48	12%

Fuente. Los Autores.

Cómo se puede observar, el modelo propuesto presenta mejor desempeño en cuanto a la reducción de costos comparado con el sistema actual de Distribución de la empresa caso de estudio, se espera un porcentaje de reducción de costos del **12%**, aproximadamente un Total de **\$489665.19** por Ruta Semanal.

7.2.1 Desempeño del Modelo.

Se realizó la corrida del modelo 18 veces con el fin de analizar el desempeño del modelo, en cuanto el tiempo computacional que demora en obtener una solución óptima al Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo. Cabe resaltar que dicho análisis se realizó en el día lunes debido a que este presenta los 22 Nodos, es decir, la mayor cantidad de clientes a visitar.

Las corridas empezaron con 5 Nodos, aumentando de a 1 hasta llegar a los 22.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 42. Desempeño Computacional del Modelo.

NÚMERO DE NODOS	FUNCIÓN OBJETIVO	TIEMPO COMPUTACIONAL (Seg)
5	\$ 30,068.30	0.01
6	\$ 32,098.20	0.01
7	\$ 37,046.10	0.01
8	\$ 48,845.08	0.02
9	\$ 58,360.40	0.02
10	\$ 63,435.17	0.1
11	\$ 64,703.90	0.05
12	\$ 73,331.10	0.11
13	\$ 81,070.20	0.29
14	\$ 87,794.30	1.48
15	\$ 77,264.10	0.85
16	\$ 78,659.60	18.73
17	\$ 83,353.80	21.4
18	\$ 90,078.00	28.23
19	\$ 94,621.50	61.4
20	\$ 102,130.60	52.59
21	\$ 107,205.40	270.74
22	\$ 114,183.30	399.06

Fuente. Los Autores.

El modelo que arrojó el resultado óptimo a la solución del problema de la empresa caso de estudio para el día lunes, tuvo un tiempo computacional de **400 Segundos**.

7.2.2 Análisis de Sensibilidad.

Con el fin de analizar que tanto impacta en el modelo los cambios significativos en las variables críticas del proceso, se presenta a continuación los siguientes escenarios y su respectivo análisis de Sensibilidad. Dicho Análisis se va a realizar con los datos del día lunes, ya que es el día que presenta mayor demanda.

7.2.2.1 Escenario 1:

Para el primer escenario, se va a modificar los datos actuales de los vehículos que realizan la distribución del producto, en cuanto a la cantidad que se van a utilizar y su respectiva capacidad de carga.

Los Datos son los siguientes:

Tabla 43. Escenario 1.

	CANTIDAD	CAPACIDAD
MODELO PROPUESTO	2	5300 kilogramos.
ESCENARIO 1	3	3500 Kilogramos.

Fuente: Los Autores

Para este primer análisis, el modelo arrojó los siguientes resultados:

Figura 22. Ruta Óptima – Escenario 1.

***** RESULTADOS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO *****									
COSTOS DE RUTA = 115959.5									
RECORRIDO DEL NODO i AL NODO j =									
X [*,*]									
:	0	8	13	14	15	16	:	=	
0	.	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0			
8	0.0	.	0.0	0.0	0.0	1.0			
13	0.0	1.0	.	0.0	0.0	0.0			
14	1.0	0.0	0.0	.	0.0	0.0			
15	0.0	0.0	0.0	1.0	.	0.0			
16	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	.			

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 22. Ruta Óptima – Escenario 1 (Continuación).

[*,2]									
:	0	7	9	10	11	17	18	19	:=
0	.	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	
7	0.0	.	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	.	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	0.0	1.0	0.0	.	0.0	0.0	0.0	0.0	
11	1.0	0.0	0.0	0.0	.	0.0	0.0	0.0	
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.	1.0	
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
22	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
:									
:	20	21	22	:=					
17	1.0	0.0	0.0						
19	0.0	1.0	0.0						
21	0.0	.	1.0						
:									
[*,3]									
:	0	1	2	3	4	5	6	12	:=
0	.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
1	0.0	.	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	.	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	.	1.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	.	0.0	0.0	1.0	
5	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	.	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	.	0.0	
12	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	.	
:									
:									

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 22. Ruta Óptima – Escenario 1 (Continuación).

VEHICULOS EN EL CUAL TRANSPORTAR =				
Y [*,*]				
:	1	2	3	:=
1	0.0	0.0	860.0	
2	0.0	0.0	1072.0	
3	0.0	0.0	3055.0	
4	0.0	0.0	3300.0	
5	0.0	0.0	540.0	
6	0.0	0.0	320.0	
7	0.0	3180.0	0.0	
8	1512.0	0.0	0.0	
9	0.0	2768.0	0.0	
10	0.0	3035.0	0.0	
11	0.0	3500.0	0.0	
12	0.0	0.0	3500.0	
13	865.0	0.0	0.0	
14	3500.0	0.0	0.0	
15	3290.0	0.0	0.0	
16	1679.0	0.0	0.0	
17	0.0	323.0	0.0	
18	0.0	753.0	0.0	
19	0.0	1775.0	0.0	
20	0.0	533.0	0.0	
21	0.0	2086.0	0.0	
22	0.0	2354.0	0.0	
:				

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 22. Ruta Óptima – Escenario 1 (Continuación).

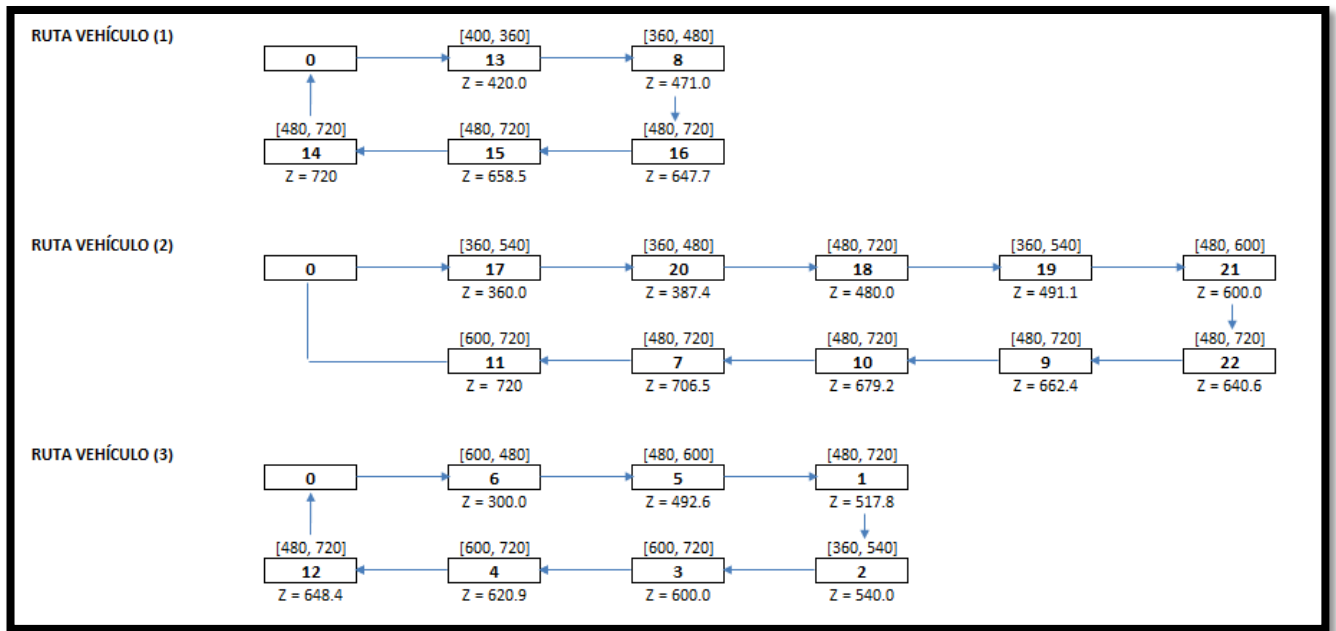
COMIENZO DEL SERVICIO =				
Z [*,*]	1	2	3	:=
1	0.0	0.0	517.8	
2	0.0	0.0	540.0	
3	0.0	0.0	600.0	
4	0.0	0.0	620.9	
5	0.0	0.0	492.6	
6	0.0	0.0	300.0	
7	0.0	706.5	0.0	
8	471.0	0.0	0.0	
9	0.0	662.4	0.0	
10	0.0	679.2	0.0	
11	0.0	720.0	0.0	
12	0.0	0.0	648.4	
13	420.0	0.0	0.0	
14	720.0	0.0	0.0	
15	658.5	0.0	0.0	
16	647.7	0.0	0.0	
17	0.0	360.0	0.0	
18	0.0	480.0	0.0	
19	0.0	491.1	0.0	
20	0.0	387.4	0.0	
21	0.0	600.0	0.0	
22	0.0	640.6	0.0	
;				

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

En este primer análisis, se puede observar que se pasó de 2 a 3 rutas, con un costo Total de Distribución entre clientes de **\$115959.5**, visitando cada vehículo 5, 10 y 7 clientes respectivamente; el vehículo 1 visita los clientes en un tiempo total de **10 horas y 30 minutos**, con un porcentaje de utilización del **82.1%**; el vehículo 2 realiza el recorrido en un total de **11 horas y 30 minutos**, con un porcentaje de utilización del **92.27%**, y el vehículo 3 realiza el recorrido en **12 Horas**, con una utilización del **50.3%**.

Se resalta que los vehículos cumplen con las ventanas de Tiempo en las que debe de llegar a cada cliente. Dichas Ventanas se muestran en la Figura 23.

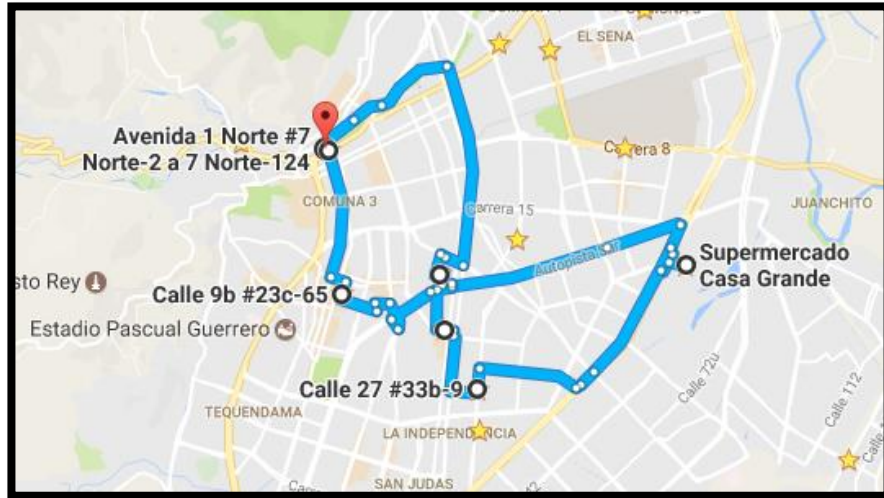
Figura 23. Ventanas de Tiempo – Escenario 1.



Fuente: Los Autores.

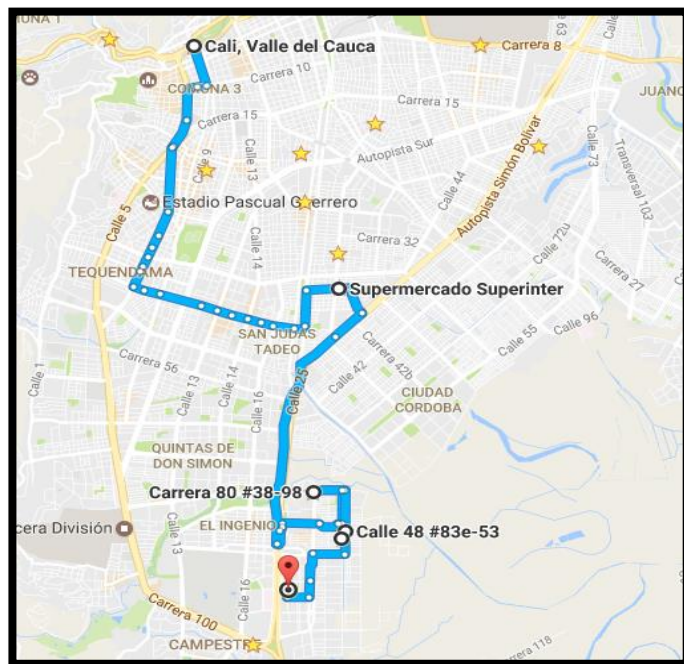
A continuación se muestra la asignación de rutas óptimas a cada vehículo.

Figura 24. Ruta Óptima 1 – Escenario 1.



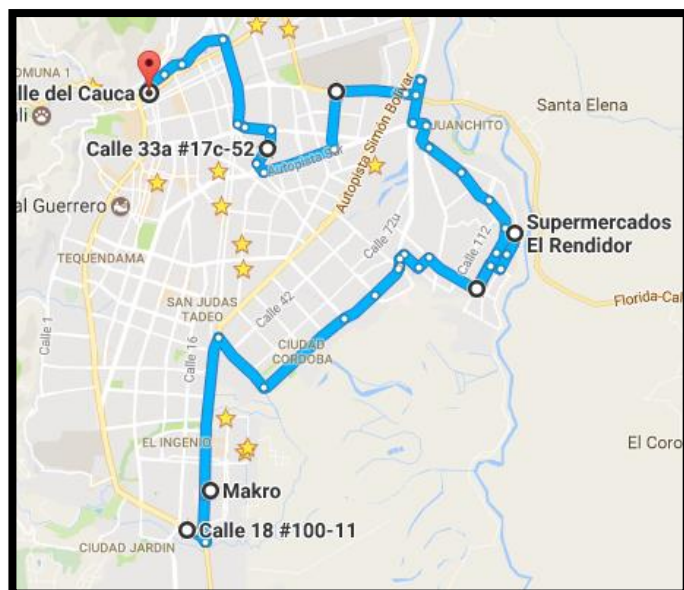
Fuente: Google Maps.

Figura 25. Ruta Óptima 2 – Escenario 1.



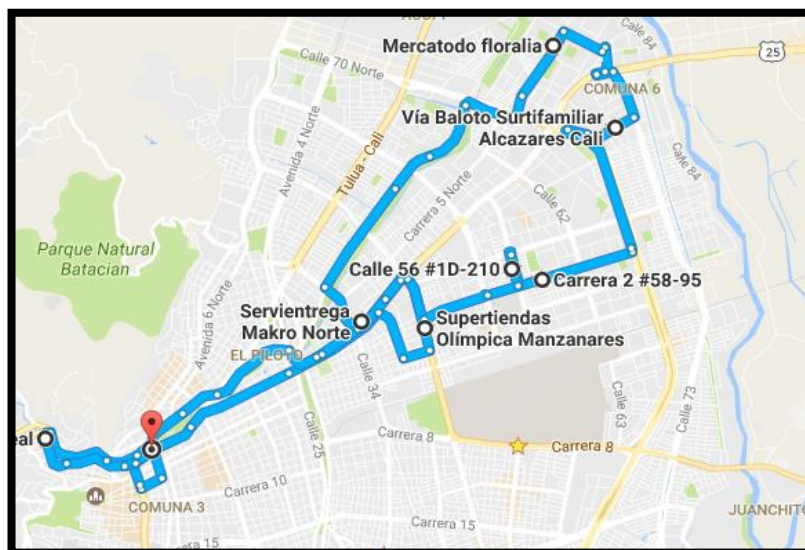
Fuente: Google Maps.

Figura 25. Ruta Óptima 2 – Escenario 1 (Continuación).



Fuente: Google Maps.

Figura 26. Ruta Óptima 3 – Escenario 1.



Fuente: Google Maps.

7.2.2.2 Escenario 2:

Para el segundo escenario, se modificó las ventanas de tiempo de los nodos que presentan mayor demanda en el día lunes, específicamente los clientes 8, 13, 15 y 19, minimizando los tiempos de recibo en una hora, los datos son los siguientes:

Tabla 44. Escenario 2.

NODOS	LLEGADA MÁS TEMPRANA SISTEMA ACTUAL (Min)	LLEGADA MÁS TEMPRANA ESCENARIO 2 (Min)
8	480	420
13	600	540
15	720	660
19	540	480

Fuente: Los Autores

Los Resultados del Escenario 2 son los siguientes.

Figura 27. Ruta Óptima – Escenario 2.

```

*****
RESULTADOS DEL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO
*****

COSTOS DE RUTA =      117735.7

RECORRIDO DEL NODO i AL NODO j =

X [*,*]
: 0  1  3  4  5 12 13 14 :=
0  .  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0
1  0.0 .  0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
3  0.0 1.0 .  0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
4  0.0 0.0 1.0 .  0.0 0.0 0.0 0.0
5  0.0 0.0 0.0 1.0 .  0.0 0.0 0.0
12 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 .  0.0 0.0
14 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 .
15 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0

: 15 16 17 :=
13 0.0 0.0 1.0
16 1.0 .  0.0
17 0.0 1.0 .

```

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 27. Ruta Óptima – Escenario 2 (Continuación).

```
[*,*,2]
: 0 2 6 7 8 9 10 11 :=
0 . 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2 0.0 . 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
6 0.0 1.0 . 0.0 0.0 0.0 0.0
7 0.0 0.0 0.0 . 0.0 0.0 0.0 1.0
9 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 . 1.0 0.0
10 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 . 0.0
11 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 .
22 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0

: 18 19 20 21 22 :=
8 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
18 . 0.0 0.0 1.0 0.0
19 1.0 . 0.0 0.0 0.0
20 0.0 1.0 . 0.0 0.0
21 0.0 0.0 0.0 . 1.0
;
```

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 27. Ruta Óptima – Escenario 2 (Continuación).

```
VEHICULOS EN EL CUAL TRANSPORTAR =
Y [*,*]
: 1 2 :=
1 4078.0 0.0
2 0.0 532.0
3 3758.0 0.0
4 3513.0 0.0
5 3268.0 0.0
6 0.0 320.0
7 0.0 3994.0
8 0.0 1179.0
9 0.0 3582.0
10 0.0 3849.0
11 0.0 4314.0
12 4278.0 0.0
13 865.0 0.0
14 3048.0 0.0
15 2838.0 0.0
16 1852.0 0.0
17 1188.0 0.0
18 0.0 2631.0
19 0.0 2411.0
20 0.0 1389.0
21 0.0 2942.0
22 0.0 3422.0
;
```

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

Figura 27. Ruta Óptima – Escenario 2 (Continuación).

COMIENZO DEL SERVICIO =

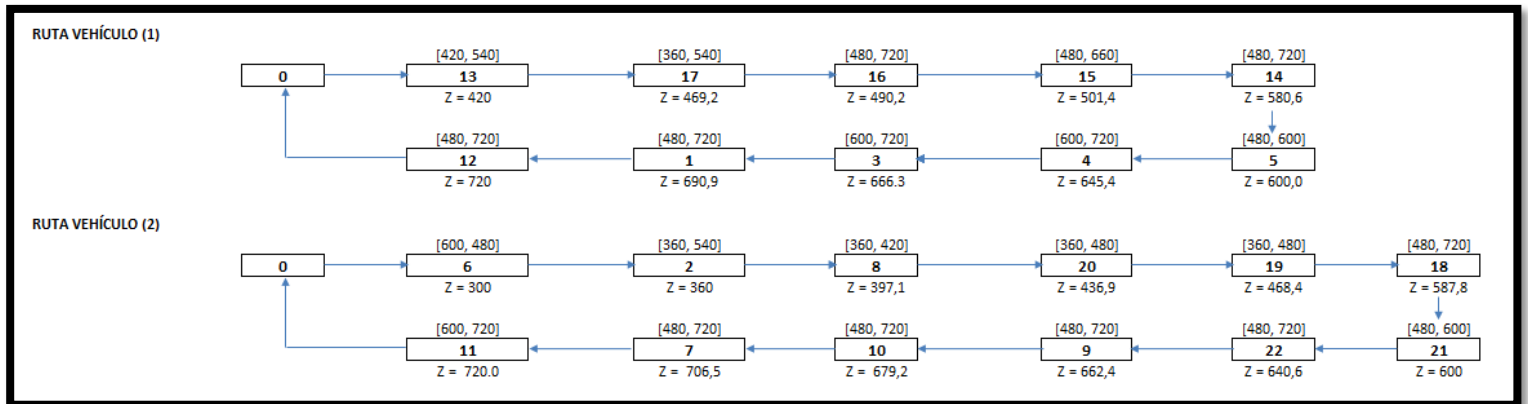
Z [*,*]		
:	1	2 :=
1	690.9	0.0
2	0.0	360.0
3	666.3	0.0
4	645.4	0.0
5	600.0	0.0
6	0.0	300.0
7	0.0	706.5
8	0.0	397.1
9	0.0	662.4
10	0.0	679.2
11	0.0	720.0
12	720.0	0.0
13	420.0	0.0
14	580.6	0.0
15	501.4	0.0
16	490.6	0.0
17	469.2	0.0
18	0.0	587.8
19	0.0	468.4
20	0.0	436.9
21	0.0	600.0
22	0.0	640.6
:		

Fuente: Neos Solver Optimization ®.

En el segundo análisis, el costo Total de Distribución entre clientes es de **\$117735,7**; se utilizaron dos vehículos con capacidad homogénea de 5300 Kilogramos, el primero visita los clientes en un tiempo total de **10 horas y 30 minutos**, con un porcentaje de utilización del **71.3%**, y el segundo realiza el recorrido en un total de **11 horas y 30 minutos**, con un porcentaje de utilización del **77.4%**.

Las modificaciones en las ventanas de tiempo se muestran en la Figura 28.

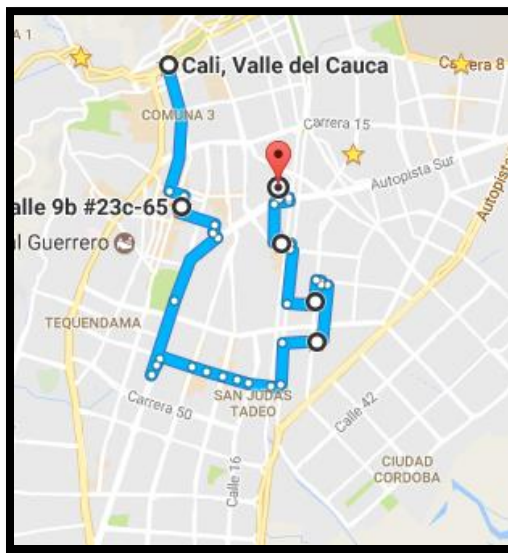
Figura 28. Ventanas de Tiempo – Escenario 2.



Fuente: Los Autores.

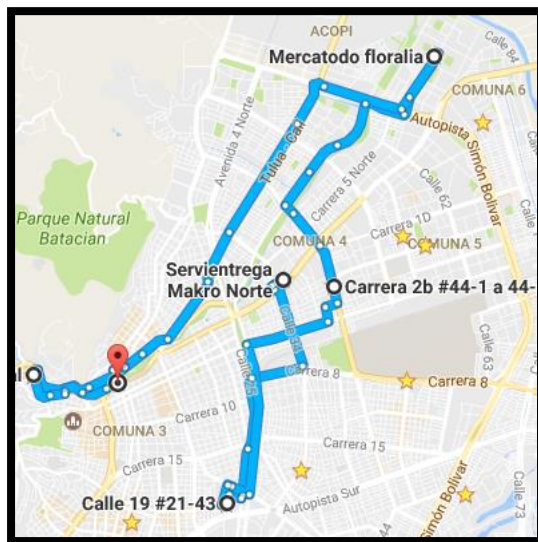
Las Figuras 29 y 30 ilustran las rutas óptimas del Escenario 2.

Figura 29. Ruta Óptima 1 – Escenario 2.



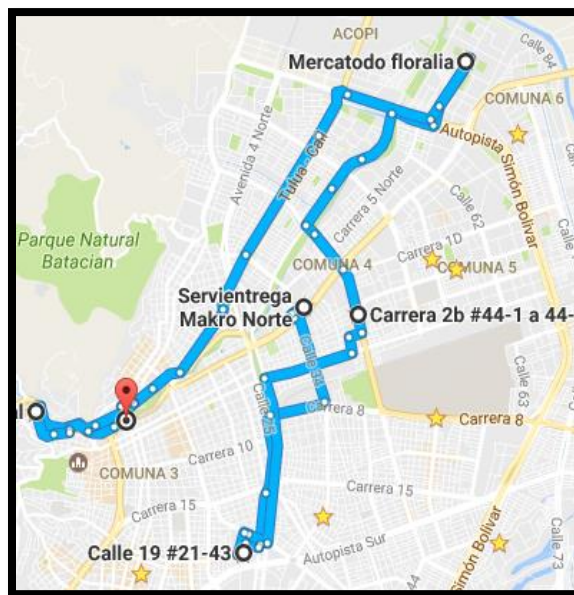
Fuente: Google Maps.

Figura 29. Ruta Óptima 1 – Escenario 2 (Continuación).



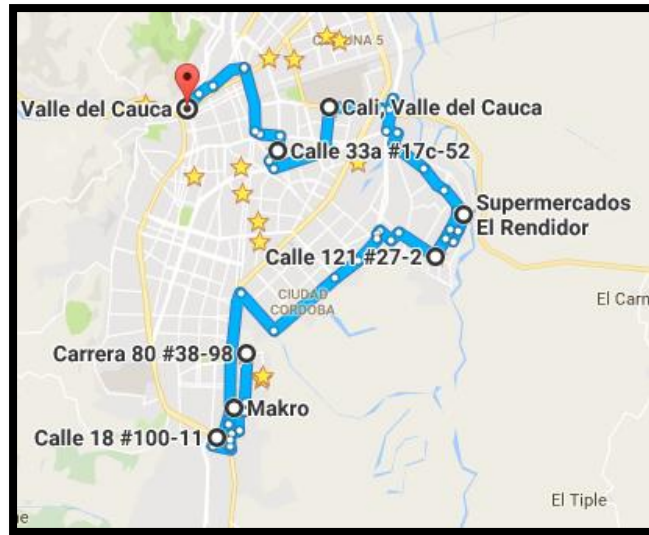
Fuente: Google Maps.

Figura 30. Ruta Óptima 2 – Escenario 2.



Fuente: Google Maps.

Figura 30. Ruta Óptima 2 – Escenario 2 (Continuación).



Fuente: Google Maps.

7.2.2.3 Escenario 3:

Para este último escenario, se realiza la corrida del modelo con un aumento del 10, 20, 30, y 40% en la demanda de cada uno de los clientes, esto debido a las estadísticas de crecimiento poblacional que para el año 2020 el Valle del Cauca aumentará su población en un 4,93% (Recuperado www.dane.gov.co). De igual forma se contempla una disminución de este parámetro del 10 al 40%, considerando la posible pérdida de clientes para la empresa.

Éstos porcentajes de Crecimiento y Decrecimiento de la Demanda, fueron concertados entre la gerencia de la empresa caso de estudio y los autores del Trabajo, ya que era importante conocer el comportamiento de las variables sensibles del modelo.

Cuando se aumenta la demanda, se incrementa el número de vehículos a tres, y cuando disminuye, se contempla la ruta con dos vehículos.

Los datos son los siguientes:

Tabla 45. Vehículos - Escenario 3.

	CANTIDAD DE VEHÍCULOS	CAPACIDAD
MODELO PROPUESTO	2	5300 kilogramos.
ESCENARIO 3 – AUMENTO DE DEMANDA	3	5300 Kilogramos.
ESCENARIO 3 - DISMINUCIÓN DE DEMANDA	2	5300 Kilogramos

Fuente: Los Autores

Tabla 46. Aumento en la demanda - Escenario 3.

CLIENTE	DEMANDA ACTUAL	(+) 10%	(+) 20%	(+) 30%	(+) 40%
NODO 1	320	352	384	416	448
NODO 2	212	233	254	276	297
NODO 3	245	270	294	319	343
NODO 4	245	270	294	319	343
NODO 5	220	242	264	286	308
NODO 6	320	352	384	416	448
NODO 7	145	160	174	189	203
NODO 8	647	712	776	841	906
NODO 9	160	176	192	208	224
NODO 10	267	294	320	347	374
NODO 11	320	352	384	416	448
NODO 12	200	220	240	260	280
NODO 13	865	952	1038	1125	1211
NODO 14	210	231	252	273	294
NODO 15	986	1085	1183	1282	1380
NODO 16	167	184	200	217	234
NODO 17	323	355	388	420	452
NODO 18	220	242	264	286	308
NODO 19	1022	1124	1226	1329	1431
NODO 20	210	231	252	273	294
NODO 21	311	342	373	404	435
NODO 22	268	295	322	348	375

Fuente: Los Autores

Para obtener los resultados de este escenario, primero se va a mostrar los datos obtenidos en los incrementos de la demandan en la Tabla 47, donde se resumen los costos de las rutas para cada instancia, luego las ventanas de Tiempo, y por

último las ilustraciones de las Rutas óptimas. Luego de esto, se realiza estos mismos pasos para el escenario de disminución de la demanda.

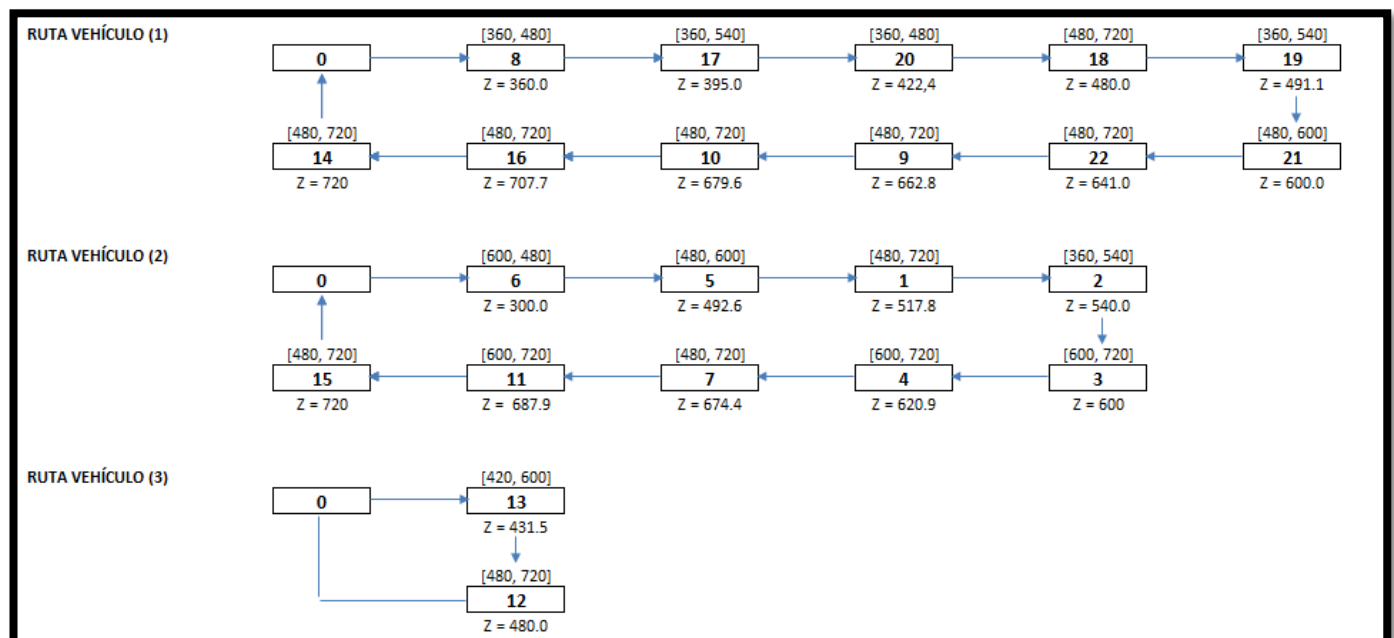
Tabla 47. Resumen Escenario 3 - Incremento en la Demanda.

INCREMENTO EN DEMANDA	COSTO DE RUTA	TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO POR LOS VEHÍCULOS
10%	\$ 114183.30	30 HORAS
20%	\$ 115959.50	33 HORAS
30%	\$ 123444.80	33 HORAS 30 MINUTOS
40%	\$ 121668.60	34 HORAS 30 MINUTOS

Fuente. Los Autores.

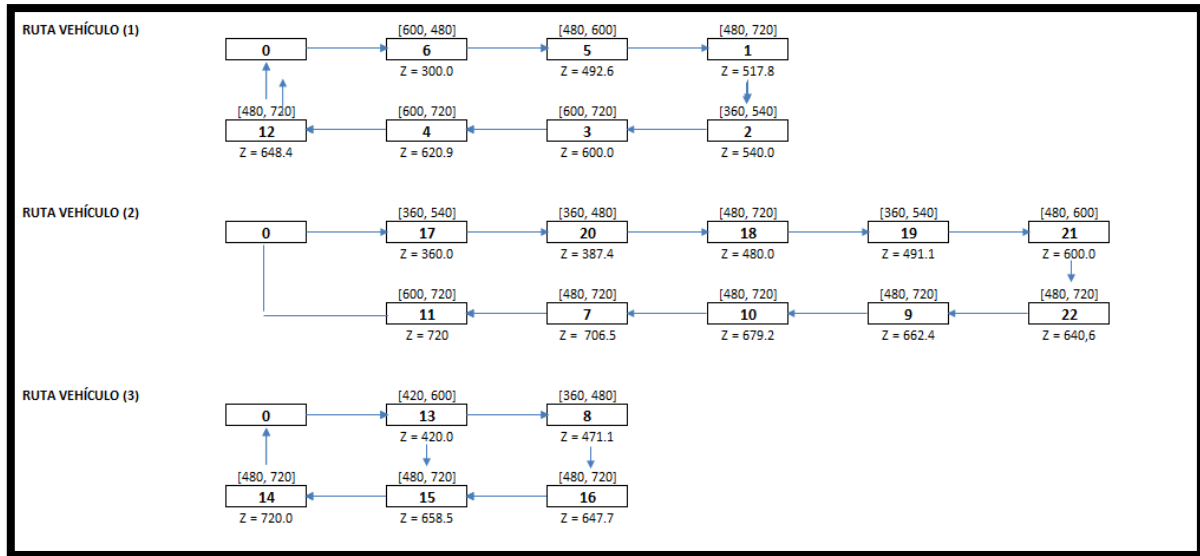
A continuación, en las Figuras de la 31 a la 35 se muestran las ventanas de tiempo de cada uno de los clientes, y sus respectivos tiempos de servicio.

Figura 31. Ventanas de Tiempo – Incremento 10%.



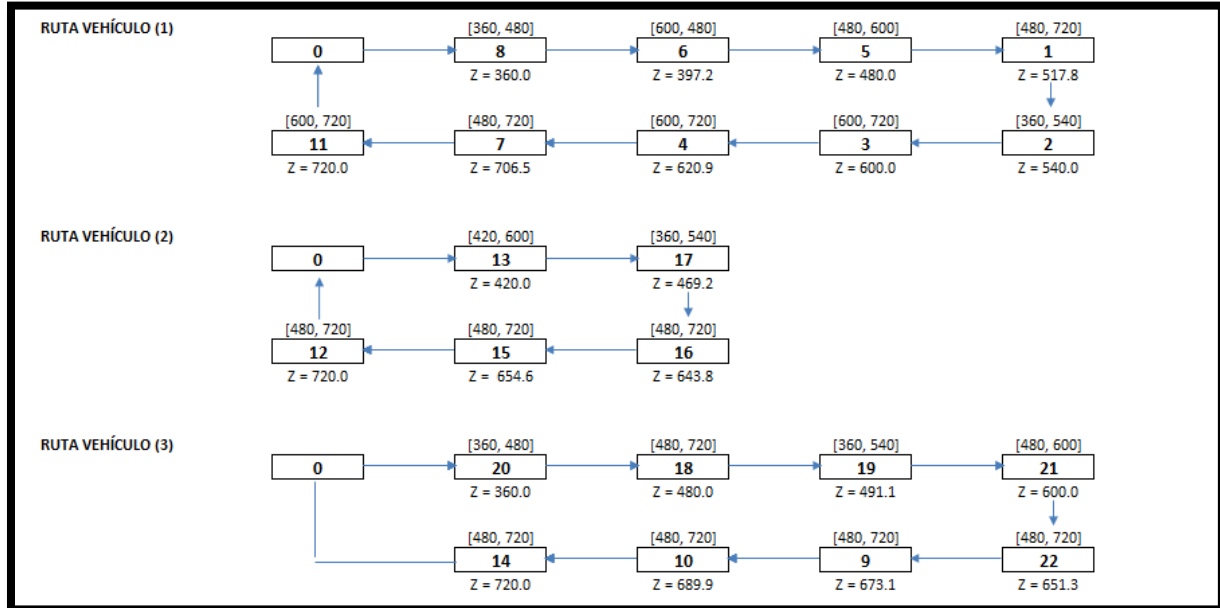
Fuente. Los Autores

Figura 32. Ventanas de Tiempo – Incremento 20%.



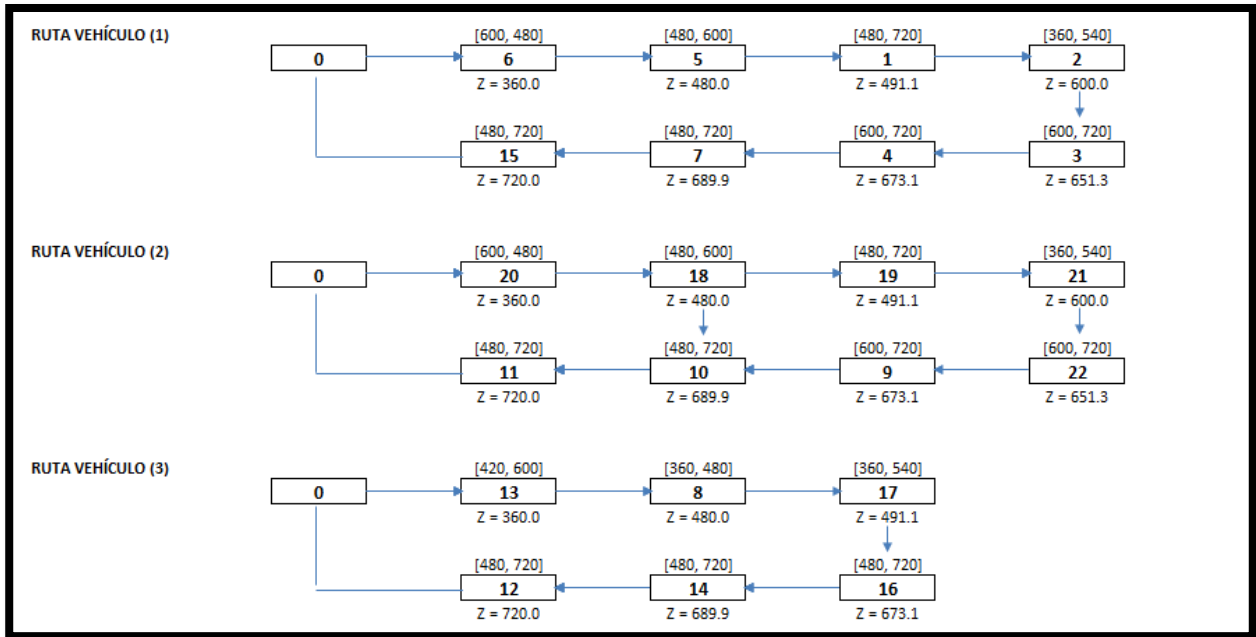
Fuente. Los Autores

Figura 33. Ventanas de Tiempo – Incremento 30%.



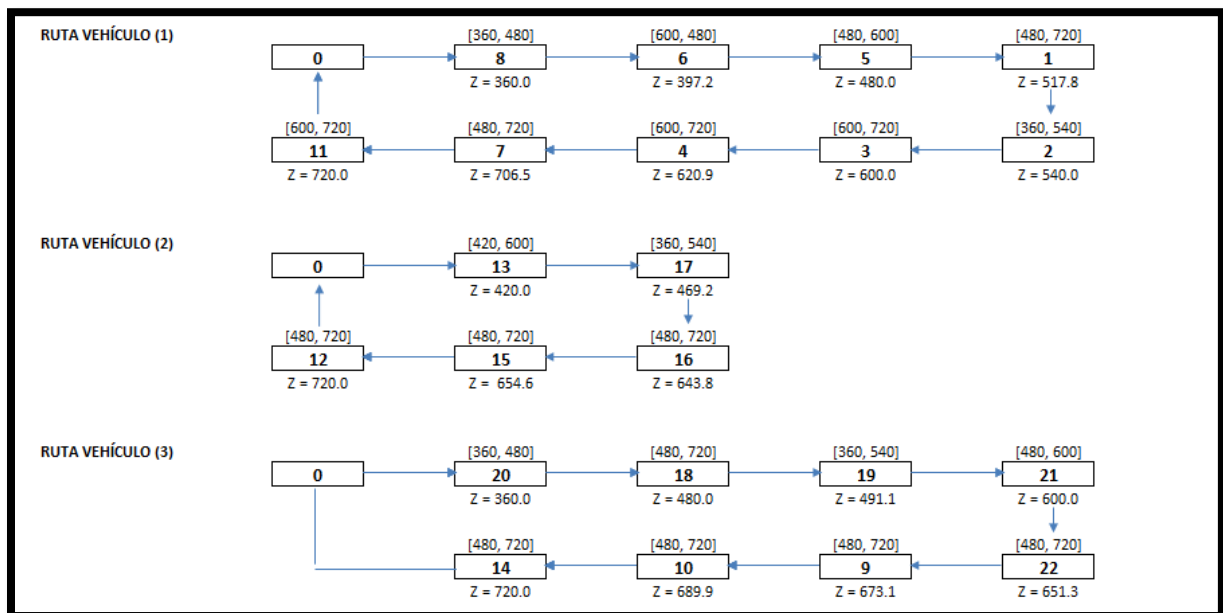
Fuente. Los Autores

Figura 34. Ventanas de Tiempo – Incremento 40%.



Fuente. Los Autores

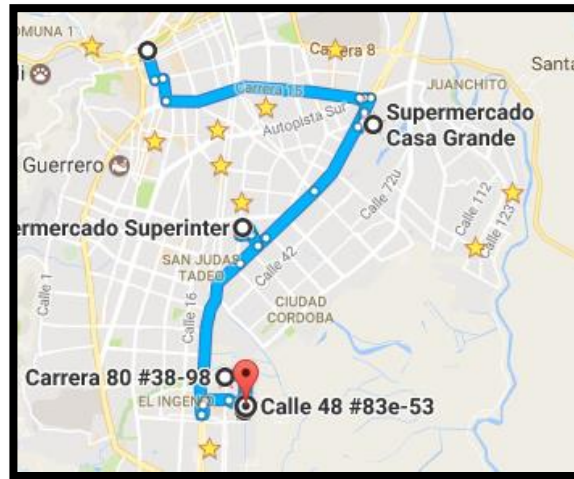
Figura 35. Ventanas de Tiempo – Incremento 30%.



Fuente. Los Autores

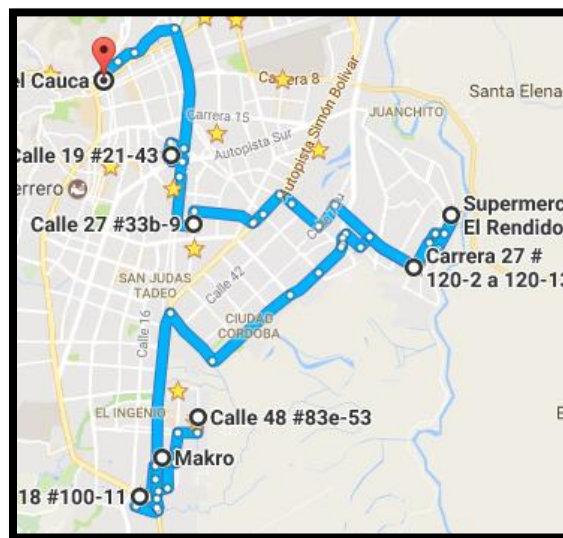
De igual forma, de la Figura 36 a la 47, se muestran las rutas óptimas que deben de realizar los vehículos en cada escenario de incremento en la demanda.

Figura 36. Ruta Óptima 1 – Incremento 10%.



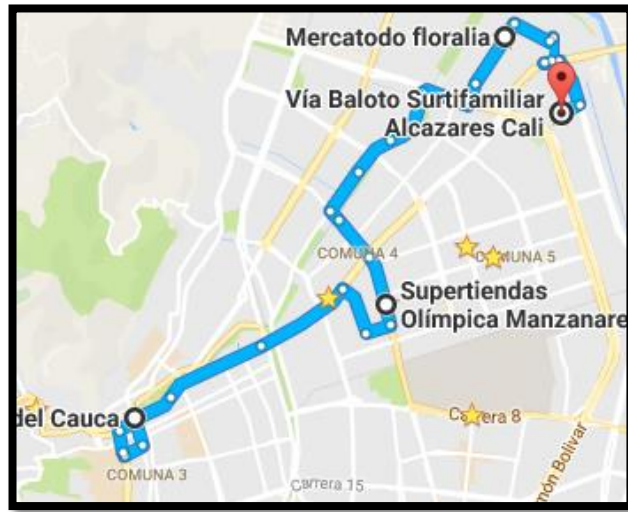
Fuente. Google Maps.

Figura 36. Ruta Óptima 1 – Incremento 10% (Continuación).



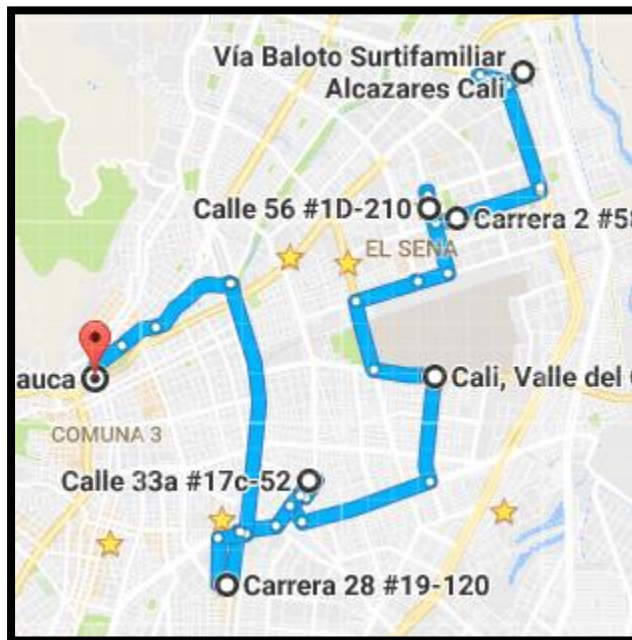
Fuente. Google Maps.

Figura 37. Ruta Óptima 2 – Incremento 10%.



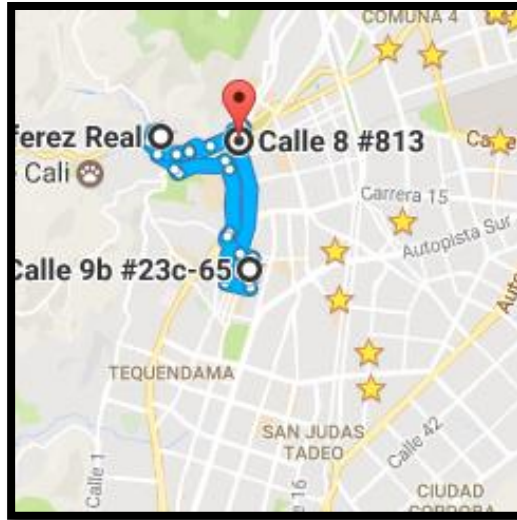
Fuente. Google Maps.

Figura 37. Ruta Óptima 2 – Incremento 10% (Continuación).



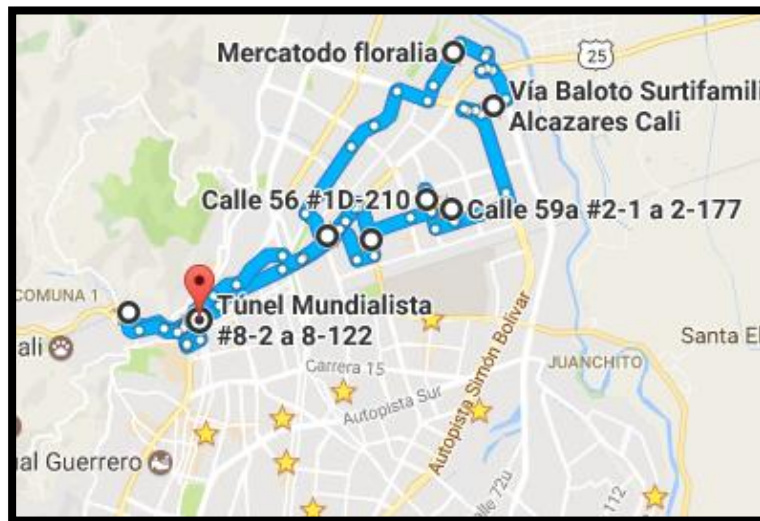
Fuente. Google Maps.

Figura 38. Ruta Óptima 3 – Incremento 10%.



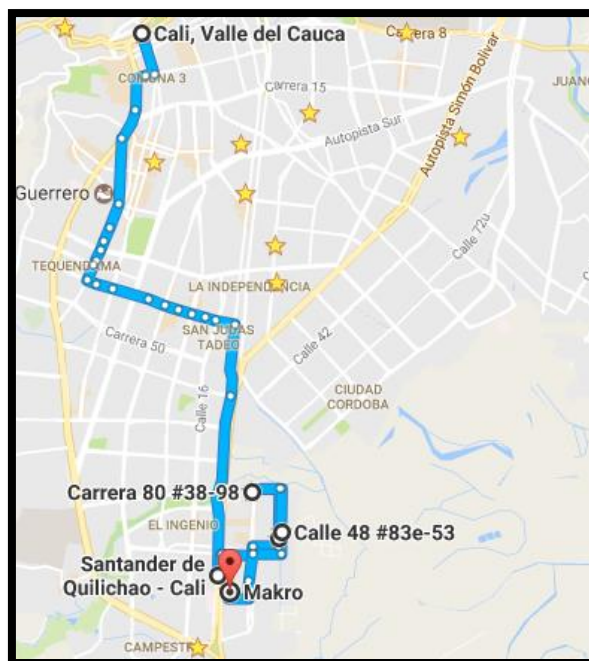
Fuente. Google Maps.

Figura 39. Ruta Óptima 1 – Incremento 20%.



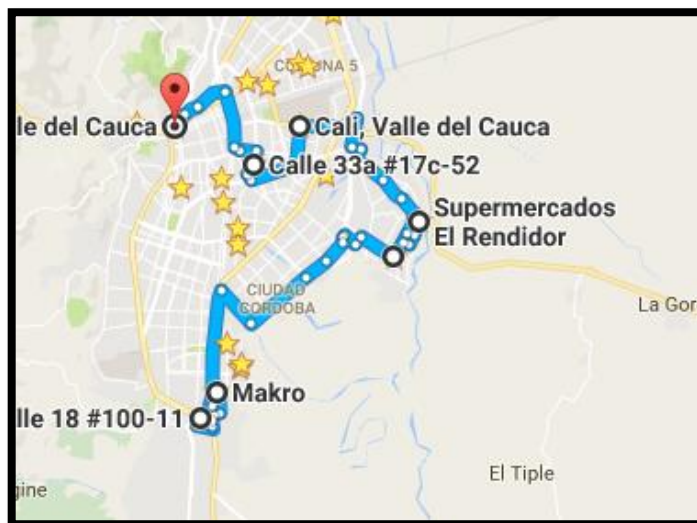
Fuente. Google Maps.

Figura 40. Ruta Óptima 2 – Incremento 20%.



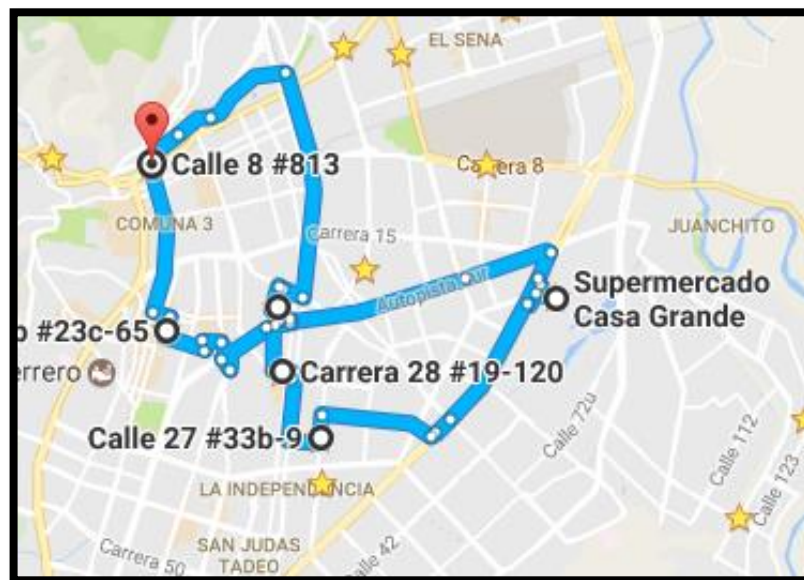
Fuente. Google Maps.

Figura 40. Ruta Óptima 2 – Incremento 20% (Continuación).



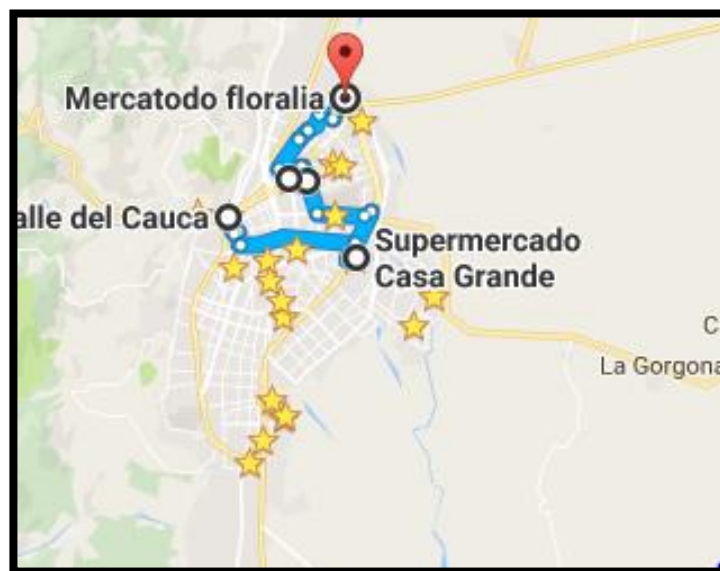
Fuente. Google Maps.

Figura 41. Ruta Óptima 3 – Incremento 20%.



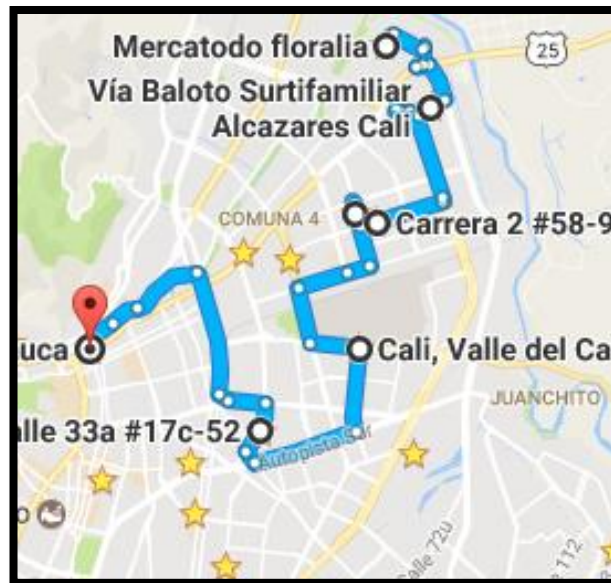
Fuente. Google Maps.

Figura 42. Ruta Óptima 1 – Incremento 30%.



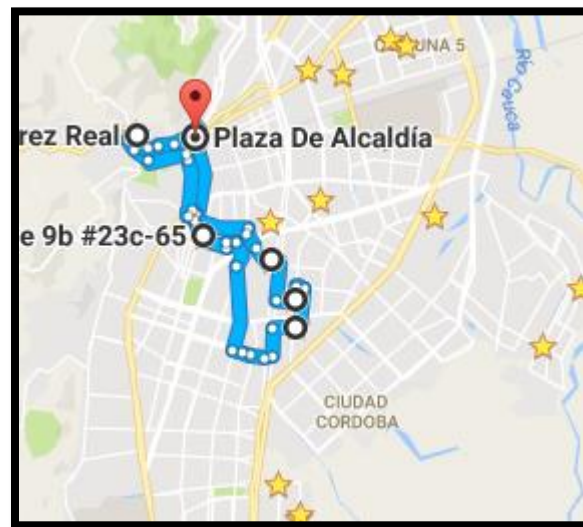
Fuente. Google Maps.

Figura 42. Ruta Óptima 1 – Incremento 30% (Continuación).



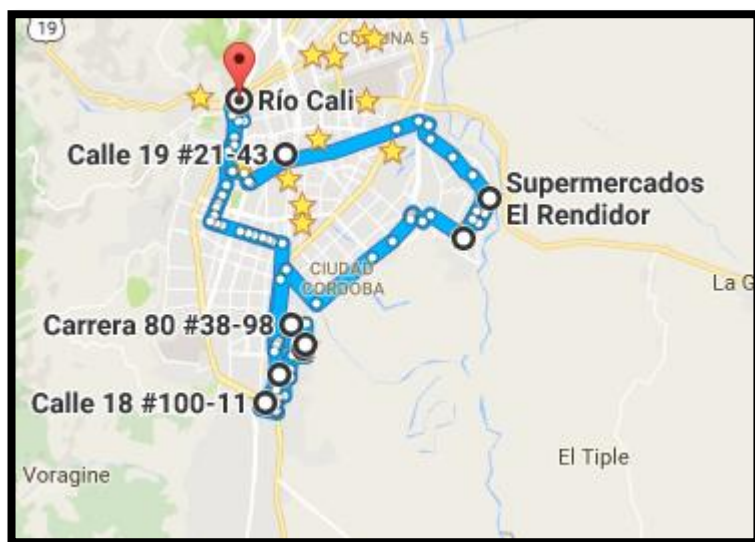
Fuente. Google Maps.

Figura 43. Ruta Óptima 2 – Incremento 30%.



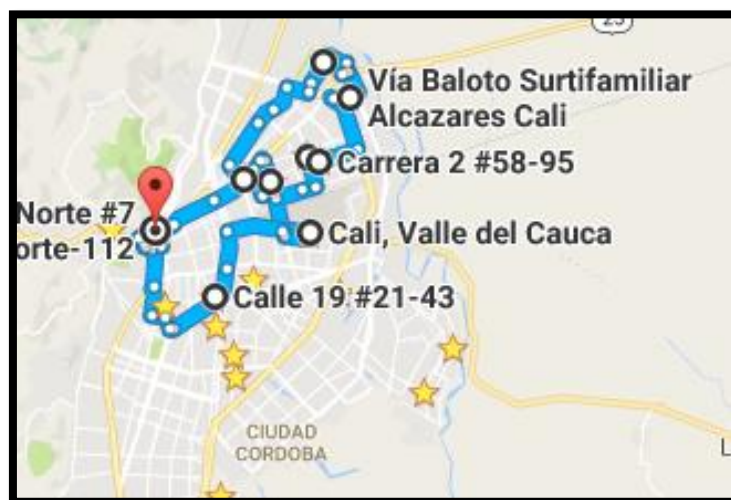
Fuente. Google Maps.

Figura 44. Ruta Óptima 3 – Incremento 30%.



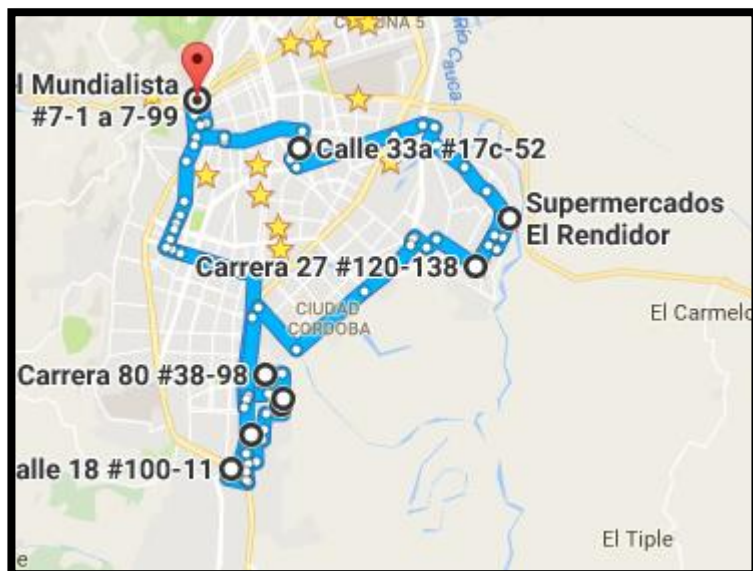
Fuente. Google Maps.

Figura 45. Ruta Óptima 1 – Incremento 40%.



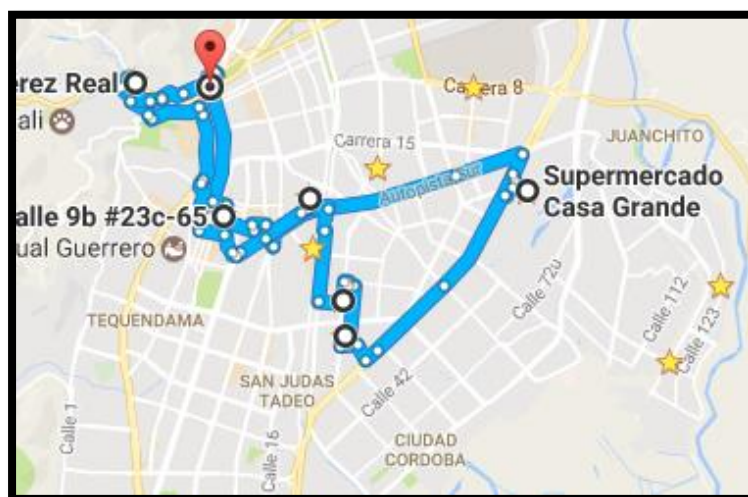
Fuente. Google Maps.

Figura 36. Ruta Óptima 2 – Incremento 40%.



Fuente. Google Maps.

Figura 47. Ruta Óptima 3 – Incremento 40%.



Fuente. Google Maps.

Para el caso de la disminución de la demanda del 10, 20, 30, 40 y 50%, las rutas óptimas son iguales, ya que la diferencia en las demandas no son significativas para el cambio de clientes dentro de la asignación de la ruta, de esta forma no se ve afectado el costo de la ruta de distribución que es de **\$112787.7** para las variaciones de este escenario. Para este caso se utilizan dos vehículos con capacidad homogénea de 5300 Kilogramos, que realizan el recorrido en un Total de 10 y 11 Horas respectivamente.

Los Datos de la Demanda fueron los Siguietes:

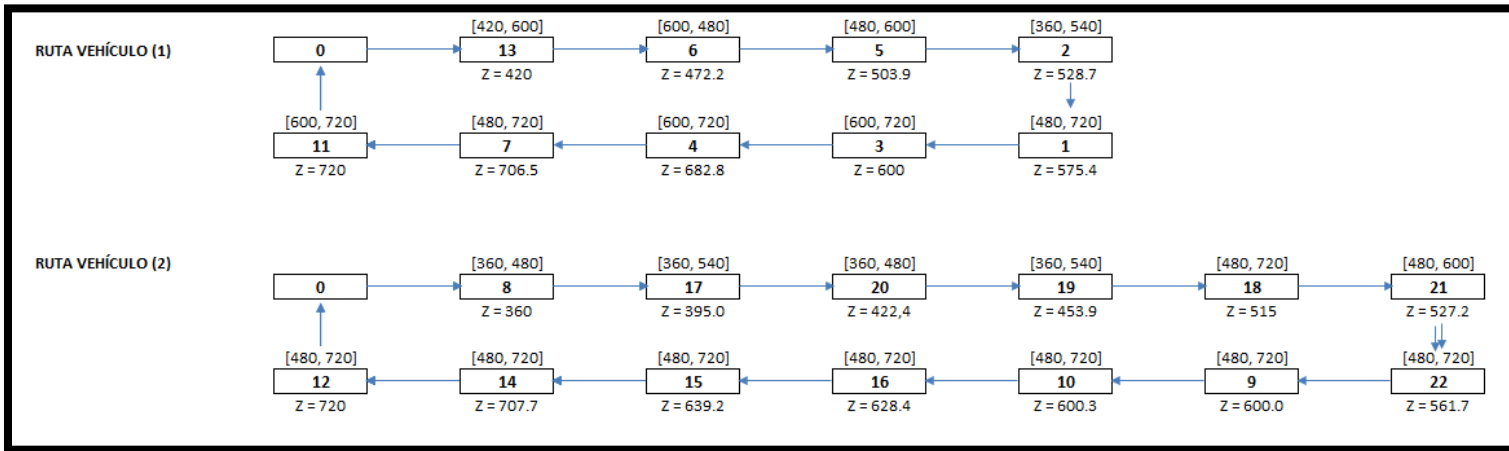
Tabla 48. Disminución en la Demanda - Escenario 3.

CLIENTE	DEMANDA ACTUAL	(-) 10%	(-) 20%	(-) 30%	(-) 40%
NODO 1	320	288	256	224	192
NODO 2	212	191	170	148	127
NODO 3	245	221	196	172	147
NODO 4	245	221	196	172	147
NODO 5	220	198	176	154	132
NODO 6	320	288	256	224	192
NODO 7	145	131	116	102	87
NODO 8	647	582	518	453	388
NODO 9	160	144	128	112	96
NODO 10	267	240	214	187	160
NODO 11	320	288	256	224	192
NODO 12	200	180	160	140	120
NODO 13	865	779	692	606	519
NODO 14	210	189	168	147	126
NODO 15	986	887	789	690	592
NODO 16	167	150	134	117	100
NODO 17	323	291	258	226	194
NODO 18	220	198	176	154	132
NODO 19	1022	920	818	715	613
NODO 20	210	189	168	147	126
NODO 21	311	280	249	218	187
NODO 22	268	241	214	188	161

Fuente. Los Autores

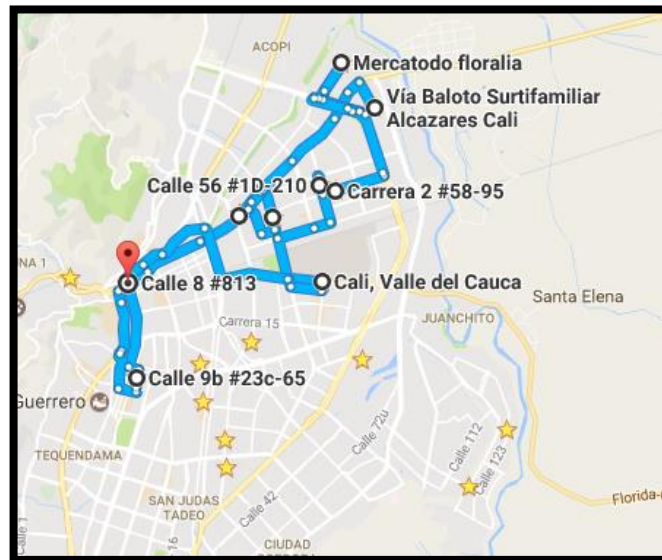
A continuación se muestran los tiempos de servicios que son aplicables a las 5 variaciones de la demanda (Ver Figura 48) y los recorridos óptimos que deben de seguir los vehículos asignados a cada cliente (Ver Figura 40, 50 y 51).

Figura 48. Ventanas de Tiempo – Disminución de la Demanda.



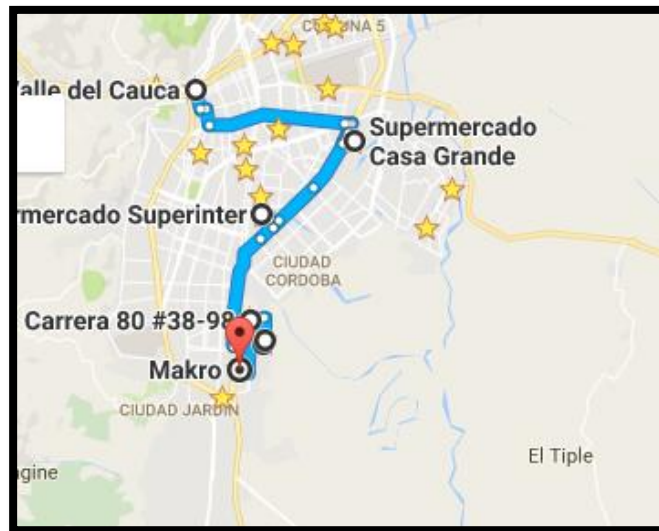
Fuente. Los Autores.

Figura 49. Ruta Óptima 1 – Disminución en la Demanda.



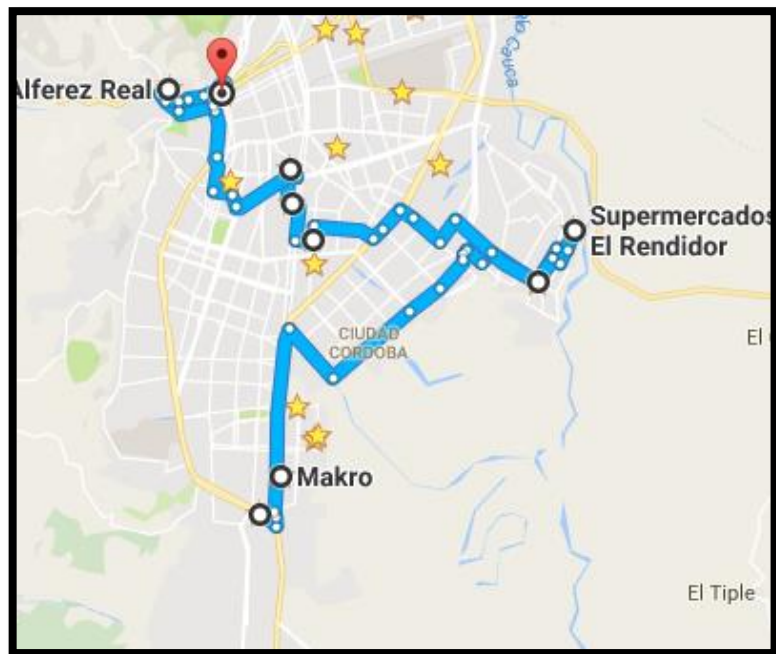
Fuente. Google Maps.

Figura 50. Ruta Óptima 2 – Disminución en la Demanda.



Fuente. Google Maps.

Figura 51. Ruta Óptima 2 – Disminución en la Demanda (Continuación).



Fuente. Google Maps.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se abordó el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, donde se consideraron restricciones de demanda, capacidad de los vehículos y tiempo de recibo de cada cliente. De acuerdo a los antecedentes encontrados en la revisión de la literatura, El Problema de Ruteo de Vehículos (Por sus siglas en inglés VRP) es uno de los principales temas de la Investigación de Operaciones y es catalogado como un problema complejo de optimización combinatorial.

Para dar solución al problema de asignación de rutas de la empresa caso de estudio, en primera instancia se realizó el diagnóstico del sistema actual de distribución, caracterizando la ubicación de los clientes con los que cuenta la empresa, la distancia entre ellos, los tipos de vehículos con los que realizan las rutas, las demandas asociadas a cada cliente, los tiempos de recibo y los costos totales de los recorridos, esto con el fin de comprender la problemática a la cual se está enfrentando la empresa.

Una vez comprendido el funcionamiento del sistema de distribución de la empresa caso de estudio, se propone formular un Modelo Matemático que ayude a minimizar los Costos Totales de la Ruta, cumpliendo con los horarios de recibo establecidos por los clientes, con el fin de resolver el problema de asignación de rutas a cada vehículo.

Durante la solución del modelo propuesto, se realizaron varias pruebas con el fin de analizar el desempeño de los tiempos computacionales; se realizaron corridas que contemplaban desde 5 hasta los 22 Nodos que son la mayor cantidad de clientes a visitar, obteniendo tiempos desde 0.01 hasta 400 Segundos.

Luego de analizar los resultados obtenidos por el modelo propuesto, se realizó la comparación con los costos actuales de distribución de la empresa caso de estudio, evidenciándose una disminución de \$489665.19, aproximadamente del 12% del

costo total de la ruta por semana, resultados que ratifica el buen desempeño del modelo propuesto, a la hora de aportar a la solución de la problemática de la empresa caso de estudio.

El modelo se replicó en 3 escenarios, con el fin de realizar en análisis de sensibilidad y así poder observar el comportamiento de las variables críticas del proceso de distribución, modificando parámetros como la cantidad y capacidad de los vehículos, aumentos y bajas en las demandas de cada uno de los clientes.

Se recomienda en Investigaciones Futuras, aplicar estrategias de solución alternativas como Heurísticas y Metaheurísticas, que aunque no garanticen los óptimos, ayudan a mejorar el desempeño del modelo en cuanto a la eficiencia de los tiempos computacionales, cuando se enfrenten problemáticas de mayor dimensión.

De igual manera, contemplar dentro de la definición del Modelo Matemático, Ventanas de Tiempo Duras, Flota de Vehículos Heterogénea, Múltiples Depósitos y Tiempos de Demora por Tráfico y Tiempos por Cola a la hora de realizar el descargue de mercancía.

BIBLIOGRAFÍA.

- Arturo, A. (2016). "Comparativa de modelos y Solvers para la optimización de variantes de problemas de rutas de vehículos".
- Acosta de Valencia, ZM (2004). Regulación de los servicios de transporte en Colombia y Comercio Internacional. Documento 265. ARCHIVOS DE ECONOMÍA. República de Colombia Departamento Nacional de Planeación. Dirección de Estudios Económicos.
- Alondra, Y (2011). "Un problema bi – objetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo". Recuperado https://f60f692e105f3d0f423418d9a2bcc94b56d3d63f.googleusercontent.com/host/0B92aE0wdpf7TcWhoemY3YjhOLWM/2011/tesis-2011-alondra_santiago.pdf
- Beasley, J. (1983). "Route first – cluster second methods for vehicle routing". Omega 11 pp. 403 – 408.
- Bullnheimer, B. et al. (1999). "An improved ant system for the vehicle routing problem". Annals of Operations Research 89 pp. 319 – 328.
- Barán, B., Schaerer, M. (2003). "A Multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows". Proceeding of the 21st LASTED International Conference APPLIED INFORMATICS, pp. 378 – 287.
- Ballou, R (2004). Logística, administración de la cadena de suministro. Quinta edición, México D.F, México: Pearson Educación.
- Bent y Hentenryck (2004). "A Two – Stage Hybrid Local Search for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", Transportation Science, vol 38, No 4, pp. 515 – 530.
- Benavente y Bustos (2005). "Estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (VRP)". [Figura]. Temuco: Ediciones Universidad La Frontera.
- Clarke, G. and Wright, W. (1964). "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points". Operations Research, No. 12 pp. 568-581.
- Coloni, A. et al. (1991). "Distributed optimization by ant colonies". In Varela, F., Bourgine, P., eds.: Proceedings of the European Conference on Artificial Life, Elsevier, and Amsterdam pp. 134 – 142.

- Cordone, R. y Wolfler, R. (2001). "A Heuristic for the Vehicle routing problem with time windows". *Journal of Heuristics* 7 pp. 107 – 129.
- Ciszár, S. (2005). "Route Elimination Heuristic for Vehicle for Routing Problem with Time Windows". *Acta Polytechnica Hungarica* vol 2, pp. 77 – 89.
- Chang, Y. y Chen, L. (2007). "Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows Via a Genetic Algorithm". Recuperado de <http://www.AIMSciences.org>, pp. 240 – 249.
- Cruz, M y Díaz, O (2008). "Un mecanismo de vecindad con búsqueda local y algoritmo genético para el problema de transporte con ventanas de tiempo". *Computación y sistemas*, Vol. 1n No 1.
- Cruz, M y Díaz, O (2008). "Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique". *Computación y Sistemas*, Vol.13, No.3, 2010, pág. 257 – 272.
- C. A. Martínez, (2011). "Metaheurística híbridas aplicadas al problema de ruteo de arcos capacitados," PhD. Tesis. Universidad de Buenos Aires - Universidad Nacional de Salta.
- Dantzing, B y Ramser, J (1959). "The Dispatching Problem. *Management Science*", vol. 6m No, 1, pp. 80 – 91.
- Dash, S. et al. (2009). "A time Bucket Formulation for the TSP with Time Windows".
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2010). Resultados PIB Nacional y Departamental. Recuperado <http://www.dane.gov.co/>.
- Díaz, C. et al. (2012). "Colonia de abejas para el problema de ruteo de vehículos heterogéneos multidepósito con ventanas de tiempo". Recuperado de https://compumat.uci.cu/sites/default/files/public/p1132-ponencia-1160_0.pdf
- Dhahri, A. et al. (2016). "A VNS-based heuristic for solving the vehicle routing problem with time windows and vehicle preventive maintenance constrains". *Procedia Computer Science*, Vol. 80, pp. 1212 – 1222, 2016.
- Ebensperger, M (2009). "Una formulación para el problema de ruteo de vehículos con tiempos de viaje dependientes del tiempo para la actualización de rutas con información en tiempo real". Recuperado de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1356>
- Fisher et al. (1981). "A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem". *Networks* 11, pp. 109–124.
- Glover, F. (1986). "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence". *Computers & Operations Research* 13 pp. 533–549.

- G. Dantzing, P. Wolfe. (1960). "Decomposition principle for linear programs", Oper. Res. 8 (1) (1960) 101 – 111.
- H. Zeng et al. (2007). "A hybrid Algorithm for Large-Scale Vehicle Routing Problem in Real Traffic Condition" IEEE International Conference on Automation and Logistics, pág. 2238 – 2242.
- Herazo, N (2012). "Modelación matemática del problema de ruteo de vehículos con restricciones de múltiples depósitos, flota heterogénea y ventanas de tiempo". Recuperado de <http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/bitstream/handle/11323/90/1129495709.pdf?sequence=1>
- J. Benders. (1962). Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems. Numerische Mathematik, 4:238 – 252.
- J. Gendreau et al. (1999). "A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem". Computers & Operations Research, 26, pp. 1153 – 1173
- Kirkpatrick, S. et al. (1983). "Optimization by simulated annealing". Science. Vol. 220, No. 4598, pp. 671 – 680.
- Kaligari, E. y Rueda, W. (2015). "Métodos de optimización para el problema de ruteo de vehículos con inventarios y ventanas de tiempo duras". Revista Ingeniería Industrial, Vol. 14, No 13, pp. 31 - 49, 2015.
- Lau, H. et al. (2003). "Vehicle Routing Problem with Time Windows and a Limited number of Vehicles". European Journal of Operational Research 148 pp. 559 - 569.
- Loor, L. et al. (2012). "Diseño de rutas de transporte de personal aplicando modelación matemática para resolver el problema de enrutamiento vehicular capacitado con ventanas de tiempo". Recuperado de http://www.cib.espol.edu.ec/digipath/d_tesis_pdf/d-93900.pdf
- Martello, S., Toth, P. (1990). "Knapsack problems: Algorithms and computer implementations". John Wiley and Sons. [Figura].
- Melián, B. et al. (2003). "Metaheurística: una visión global". Revista iberoamericana de inteligencia artificial, 19, pág .7 - 28.
- Mahmoudi, M. y Zhou, X. (2016). "Finding optimal solutions for vehicle routing problem with time windows: A dynamic programming approach based on state – space – time network representations". Procedia Computer Science, Vol. 89, pp. 19 – 42, 2016.

- N. Azi, M. Gendreau y J.Y. Potvin. (2010). "An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles". *European Journal of Operational Research*, 202:756 – 763.
- Olivera, A. (2004). "Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos", reporte de investigación, Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Pullen, H. y Webb, M. (1967). "A Computer application to a transport scheduling problem". Recuperado de <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/10/1/10.full.pdf+html>
- Russell, R. y Gribbin, D. (1991). "A multiphase Approach to the Periodic Routing Problem". *NETWORKS*, vol 21. (1995) pp. 747 – 765.
- Restrepo et al. (2008). "Un problema Logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)". *Scientia et a Technica* Año XIV, No 39. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Rocha L., et al. (2011). "Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución". *Ingeniería*, Vol. 16, No 2, pág. 35 -55.
- Ribas et al. (2011), "A Hybrid Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows", *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*.
- Stewart, W. y Golden, B. (1983). "Stochastic Vehicle Routing: A Comprehensive Approach". *European Journal of Operational Research* 12: 371 - 385.
- Solomon (1987). *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints*. Atlanta: HAM editors.
- Tolosa, J (2009). "Colonia de hormigas, fundamentación teórica y aplicación en la optimización de sistemas logísticos de ruteo con intervalos de recepción y tiempo de atención máximo". Recuperado de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/4664/2/117937.pdf>
- Toth, P y Vigo, D. (2002), "The Vehicle Routing Problem". *Society of Industrial and Applied Mathematics (SIAM) monographs on discrete mathematics and applications*, Philadelphia, USA, 2002, pp. 1 - 23, 109 - 149.

ANEXOS

Los Anexos de éste trabajo se presentan de forma digital, y se puede acceder a ellos con los siguientes links.

1. [Análisis de Resultados día lunes.](#)
2. [Análisis de Resultados día miércoles.](#)
3. [Análisis de Resultados día viernes.](#)
4. [Análisis de Escenario 1.](#)
5. [Análisis de Escenario 2.](#)
6. [Resultados Escenario 3 – Incremento de la Demanda.](#)
7. [Resultados Escenario 3 – Disminución de la Demanda.](#)