

**DISEÑO DE UN MODELO MULTIOBJETIVO DE VRP PICK-UP AND DELIVERY
SIMULTÁNEO (VRPSPD) PARA EL APROVISIONAMIENTO DE LA LECHE EN LA
CADENA DE SIMUNISTROS DE LÁCTEOS**

JOSÉ LUIS RUIZ MEZA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARTAGENA

2018

**DISEÑO DE UN MODELO MULTIOBJETIVO DE VRP PICK-UP AND DELIVERY
SIMULTÁNEO (VRPSPD) PARA EL APROVISIONAMIENTO DE LA LECHE EN LA
CADENA DE SIMUNISTROS DE LÁCTEOS**

JOSÉ LUIS RUIZ MEZA

Tesis para optar por el título de Magíster en Logística Integral

MARIA FERNANDA RAMOS

Directora de Tesis

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARTAGENA

2018

Nota de Aceptación

Primer Jurado

Segundo jurado

Cartagena de Indias, enero de 2018

Agradecimientos

Agradezco a Dios por que llena mi corazón, alumbrando mis sueños como el sol del mediodía, guía mis pasos hacia las metas que él pone delante de mí, justo a la distancia correcta y en el tiempo exacto, porque todo lo que viene de él es perfecto.

A mi madre, Arelis Meza Ramos, mujer valiente, que me ha impulsado a estar y ser lo que soy actualmente.

A mi padre, José Luis Ruiz Paternina, por su apoyo incondicional en todos mis proyectos.

A mi sobrina, Sofía Colon Crespo, una luz en mi vida; mi novia, Kary, “gracias cielo, gracias por hacerme mejor persona cada día, por brindarme tu gran apoyo, tu amor y compañía”; mi hermana, Sandra Crespo Meza, por brindarme su apoyo.

A mi abuela Nerys, quien a su avanzada edad se preocupa y cuida de mí.

Asimismo, quiero mostrar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de uno u otra manera han contribuido a la realización de este proceso de investigación, que afortunadamente, no han sido pocas. En especial a Moisés Hernández, la profe Luty Gomezcáceres, Andrés Vergara, Jhon Víctor Vidal, Jahir Pérez y todos los pequeños empresarios que me abrieron las puertas de sus negocios y suministraron la información necesaria para este proyecto.

A mi directora de tesis, María Fernanda Ramos, quien fue una persona vital para poder alcanzar este logro, gracias por su tiempo y dedicación.

A todos ustedes, muchas gracias.

“Pidan, y se les dará; busquen y encontrarán; llamen y se os abrirá. Porque todo el que pide, recibe; el que busca, encuentra; y al que llama, se le abre”. Mateo 7:7-8.

Resumen

Debido al aumento del flujo de bienes y recursos, el transporte juega un papel fundamental dentro de las cadenas de suministro, siendo los modelos de ruteo una herramienta que permiten llegar a la solución óptima en la asignación de rutas para el transporte, considerando un gran número de variables acordes a la realidad y generando soluciones eficientes. En este trabajo se desarrolla un modelo de VRP multi-objetivo que considera entregas y recogidas simultáneas, flota heterogénea, capacitado, ventanas de tiempo y multi-depósito, que busca la disminución de los costos del proceso en términos de uso del vehículo y de las emisiones de CO₂ equivalentes. Fueron llevados a cabo estudios computacionales con múltiples instancias reales, construidas y adaptadas de la literatura, considerando entre 10 a 72 nodos, 2 a 6 depósitos y de 2 a 7 vehículos. Para la resolución de las instancias del problema inicialmente el modelo fue resuelto de forma exacta, llegando a alcanzar reducciones en los costos totales de hasta un 18,12% con respecto al escenario actual, generándose tiempos computacionales elevados para alcanzar soluciones óptimas o próximas al óptimo. Dado el alto consumo de tiempos computacionales, se adaptó la heurística de Clark and Wright para obtener soluciones de calidad en tiempos reducidos, haciéndose una comparación entre los costos de utilización del vehículo en la ruta, la adición de los costos por CO₂ emitidos, los costos por violaciones de tiempo y el consumo en ralentí. Se obtuvieron resultados favorables para los objetivos de costos de utilización del vehículo en la ruta y costos por CO₂ emitidos, no así con los costos por violación de ventanas de tiempo.

Palabras clave: *Optimización, heurística, multiobjetivo, leche*

Abstract

Due to the increase in the flow of commodities and resources, transport plays a fundamental role within the supply chains, with routing models being a tool that allows us to reach the optimum solution in the allocation of transport routes, considering a large number of variables according to reality and generating efficient solutions. In this work, a multiobjective VRP model is developed that considers simultaneous deliveries and pick-ups, heterogeneous fleet, capacitated, time windows and multi-depot, which seeks to reduce the costs of the process in terms of vehicle use and CO₂ equivalent emissions. Computer studies were carried out with multiple real instances, built and adapted to literature, considering 10 to 72 nodes, 2 to 6 depots and 2 to 7 vehicles. For the resolution of the problem initially, the model was solved exactly, reaching reductions in total costs of up to 18.12% with respect to the current scenario, generating high computational times to achieve optimal or near optimal solutions. Given the high consumption of computational times, Clark and Wright's heuristics were adapted to obtain quality solutions in reduced time, making a comparison between the costs of using the vehicle on the road, adding the CO₂ costs emitted, costs for time violations and idle consumption. Favorable results were obtained for the vehicle utilization cost objectives on the route and CO₂ costs emitted, not with the costs for violation of time windows.

Keywords: *Optimization, heuristics, multiobjective, milk*

Contenido

Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
Índice de tablas	11
Tabla de figuras.....	13
Introducción	16
1. Descripción del problema	19
2. Justificación	21
3. Objetivos.....	23
3.1 Objetivo general	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
4. Capítulo I: Revisión literaria.....	24
4.1 Cadena de suministro	24
4.2 Cadena de suministros lácteos: contexto mundial.....	27
4.3 Cadena de suministro de lácteos en Colombia.....	29
4.3.1 Cadena de valor del sector lácteo en Colombia	30
4.3.2 Normatividad del sector lácteo en Colombia.....	35
4.4 Proceso de aprovisionamiento.....	36
4.5 Problemas de ruteo de vehículos en el transporte	38
4.6 Ruteo de vehículos con pickup and delivery.....	41
4.6.1 VRP con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD).....	44
4.6.2 VRPSPD con minimización de energía y dióxido de carbono CO ₂	46
4.6.3 Métodos de Solución para Ruteo de Vehículos con Pickup and Delivery	47

4.6.4	Modelos multi-objetivos	50
4.6.5	Método de sumas ponderadas	53
5.	Capítulo II: Caracterización de la red de aprovisionamiento de la leche cruda dentro de la cadena de suministros lácteos del departamento de sucre	55
5.1	Generalidades del Departamento de Sucre.....	55
5.2	Aspectos económicos	57
5.3	Sector ganadero del Departamento de Sucre.....	59
5.4	Producción de leche cruda.....	63
5.4.1	Higiene y seguridad alimentaria de la leche	66
5.4.2	Condiciones de almacenamiento y transporte de la leche	68
5.5	Cadena de suministro de lácteos del Departamento de Sucre	68
5.5.1	Eslabones de la Cadena de Lácteos del Departamento de Sucre	69
5.6	Red de aprovisionamiento de la leche cruda en el Departamento de Sucre.....	78
5.6.1	Delimitación del Estudio.....	79
5.7	Sistema actual de ruteo.....	82
5.7.1	Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de San Marcos	84
5.7.2	Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Galeras	90
5.7.3	Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Buenavista	96
5.7.4	Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Sincelejo	100
6.	Capítulo III: Problemas de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea y capacitado.....	104
6.1	Modelo conceptual	104
6.2	Modelo matemático para el problema de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea y capacitado.....	115
6.2.1	Índices y Conjuntos.....	115
6.2.2	Parámetros.....	116

6.2.3	Escalares	117
6.2.4	Variables de decisión	117
6.2.5	Funciones objetivo	118
6.2.6	Restricciones	120
7.	Capítulo IV: Solución del modelo de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea capacitada	126
7.2	Frontera de Pareto aplicada al modelo construido	126
7.3	Solución exacta con instancias de prueba	133
7.4	Solución con método aproximado para instancias medianas y grandes.....	135
7.4.1	Heurística de Clarke and Wright para soluciones factibles	136
8.	Capítulo V: Evaluación del modelo con los datos del aprovisionamiento de la leche cruda en Sucre	144
8.1	Resultados óptimos con el Solver CPLEX en GAMS para el aprovisionamiento de leche en Sucre	144
8.1.1	Resultados comparación de costos del municipio de San Marcos.....	145
8.1.2	Resultados comparación de costos del municipio de Buenavista.....	150
8.1.3	Resultados comparación de costos del municipio de Sincelejo.....	155
8.1.4	Resultados comparación de costos del municipio de Galeras	161
8.2	Resultados obtenidos con la heurística adaptada de Clarke and Wright.....	167
8.2.1	Soluciones prueba del algoritmo C&W	167
8.2.2	Soluciones C&W para la matriz general.....	170
9.	Conclusiones	173
10.	Recomendaciones	176
11.	Referencias.....	177
	APÉNDICE A.....	190
	APÉNDICE B	192



APÉNDICE C 197

APÉNDICE D 199

Índice de tablas

Tabla 1 Principales autores de las variantes comunes del VRP	39
Tabla 2 Principales aportes al VRP antes del VRPPD	42
Tabla 3 Metodologías de solución para el VRPSPD	49
Tabla 4 Técnicas de optimización multiobjetivo	52
Tabla 5 Nutrientes y Componentes de la Leche	67
Tabla 6 Tipos de Pastos predominante en cada municipio del Departamento de Sucre, 2015	71
Tabla 7 Empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016	80
Tabla 8 Continuación de empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016	81
Tabla 9 Empresas procesadoras de lácteos a las cuales se le aplicaron las respectivas encuestas	84
Tabla 10 Datos recolectados para el modelo de ruteo – San Marcos	85
Tabla 11 Costos de ruta para San Marcos	90
Tabla 12 Datos recolectados para el modelo de ruteo – Galeras	91
Tabla 13 Costos de ruta para Galeras	95
Tabla 14 Datos recolectados para el modelo de ruteo - Buenavista	96
Tabla 15 Costos de ruta para Buenavista	99
Tabla 16 Datos recolectados para el modelo de ruteo - Sincelejo	100
Tabla 17 Costos de ruta para Sincelejo	103
Tabla 18 Ponderaciones asignadas a cada objetivo	127
Tabla 19 Valores dados a los pesos agrupados por soluciones	129
Tabla 20 Comparación de costos para las soluciones	132
Tabla 21 Conjunto de variaciones de la solución D	132
Tabla 22 Datos de entrada para instancia de 11 nodos	134
Tabla 23 Resultados para instancias pequeñas	135
Tabla 24 Comparación de costos para las soluciones de San Marcos	146
Tabla 25 Comparación de costos municipio de San Marcos	147
Tabla 26 Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en San Marcos	149
Tabla 27 Comparación de costos para las soluciones de Buenavista	151
Tabla 28 Comparación de costos municipio de Buenavista	152
Tabla 29 Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Buenavista	154
Tabla 30 Comparación de costos para las soluciones de Sincelejo	157

Tabla 31 Comparación de costos municipio de Sincelejo	158
Tabla 32 Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Sincelejo.....	160
Tabla 33 Costos totales de los 26 resultados del municipio de Galeras	163
Tabla 34 Comparación de costos municipio de Galeras	164
Tabla 35 Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Galeras.....	166
Tabla 36 Mejor solución para instancia de la literatura.....	168
Tabla 37 Soluciones eficientes para San Marcos con algoritmo C&W	170
Tabla 38 Mejor solución de 50 iteraciones matriz de distancias	172
Tabla 39 Mejor solución de 50 iteraciones matriz de tiempos	172

Tabla de figuras

<i>Figura 1. Configuración de la cadena de suministro.</i>	25
<i>Figura 2. Red de Suministro.</i>	26
<i>Figura 3. Cadena de Suministros Lácteos en América Latina.</i>	28
<i>Figura 4. Principales Productores de leche en Latinoamérica a 2011.</i>	29
<i>Figura 5. Representación Gráfica los eslabones de la Cadena de Suministro Láctea.</i>	30
<i>Figura 6. Relación de actores en los eslabones de la cadena de suministros lácteos en Colombia.</i>	35
<i>Figura 7. Sistemas Logísticos.</i>	37
<i>Figura 8. Representación Gráfica del problema de VRP.</i>	39
<i>Figura 9. Representación Gráfica de la ruta del VRP Pickup and Delivery Simultáneo, Capacitado, con Flota Heterogénea, Multi-Depósito, Ventanas de Tiempo y Emisiones (G-MDHFVRPSPDTW).</i>	44
<i>Figura 10. Métodos de solución para el VRP.</i>	47
<i>Figura 11. Representación gráfica de un problema multiobjetivo de minimización.</i>	51
<i>Figura 12. Mapa Político del Departamento de Sucre.</i>	56
<i>Figura 13. Tasa de crecimiento económico de Colombia y Sucre años 2001 – 2011.</i>	57
<i>Figura 14. Aportes al PIB por ramas de actividad económica. Comparación Sucre – Colombia, 2016.</i>	58
<i>Figura 15. Conflicto del uso del suelo rural.</i>	59
<i>Figura 16. Macrocuencas o Regiones Lecheras de Colombia.</i>	61
<i>Figura 17. Número total de Bovinos por departamentos en Colombia, Censo Pecuario Nacional 2016.</i>	61
<i>Figura 18. Porcentaje y número total de bovinos por municipios del departamento de Sucre.</i>	62
<i>Figura 19. No de vacas en ordeño de Sucre a 2015 y promedio de producción lechera.</i>	63
<i>Figura 20. Producción diaria de leche y No de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) en Colombia.</i>	64
<i>Figura 21. Producción de leche en litros diaria y anual por municipios del Departamento de Sucre, 2015.</i>	65
<i>Figura 22. Porcentaje de producción de leche diaria por municipios del Departamento de Sucre, 2015.</i>	66
<i>Figura 23. Cadena de Suministros de Lácteos del Departamento de Sucre.</i>	69
<i>Figura 24. Total Hectáreas sembradas de pasto por municipios del Departamento de Sucre, 2015.</i>	72
<i>Figura 25. Hectáreas sembradas de cada área de pasto por municipios del Departamento de Sucre, 2015.</i>	73
<i>Figura 26. Producción Histórica 2010-2016 de Leche del Departamento de Sucre.</i>	74
<i>Figura 27. Histórico de producción 2010-2015 de Leche por municipios del Departamento de Sucre.</i>	75
<i>Figura 28. Red de Aprovisionamiento de leche cruda del departamento de Sucre priorizada en el estudio.</i>	79
<i>Figura 29. Ruteo para la recolección de leche de las empresas E_1 y E_2 de San Marcos, 2017.</i>	86
<i>Figura 30. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_1 de la empresa E_1.</i>	87
<i>Figura 31. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_2 de la empresa E_1.</i>	88

Figura 32. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_3 de la empresa E_2	88
Figura 33. Ruteo para la recolección de leche de las empresas E_3 y E_4 de Galeras, 2017.....	92
Figura 34. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_1 de la empresa E_4	93
Figura 35. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_2 de la empresa E_4	93
Figura 36. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R_3 de la empresa E_3	94
Figura 37. Ruteo para la recolección de leche de la empresa E_5 de Buenavista, 2017.	97
Figura 38. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta $R1$ de la empresa $E5$	98
Figura 39. Ruteo para la recolección de leche de la empresa E_6 de Sincelejo, 2017.	101
Figura 40. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta $R1$ de la empresa $E6$	102
Figura 41. Representación del MDVRPSPD.....	105
Figura 42. Cargue y descargue simultáneo de la Leche.	106
Figura 43. Velocidad del vehículo en el arco i, j	109
Figura 44. Pérdidas de energía del combustible en un vehículo.....	111
Figura 45. Calculo del Seno y Coseno del ángulo θ de los nodos.....	112
Figura 46. Gráfica en 3D de los resultados obtenidos en las funciones objetivo.	128
Figura 47. $f_3(x)$ vs $f_2(x)$. Frontera de Pareto.	130
Figura 48. $f_1(x)$ vs $f_2(x)$. Frontera de Pareto.	130
Figura 49. $f_1(x)$ vs $f_3(x)$. Frontera de Pareto.	131
Figura 50. Ruta calculada para instancias de 11 nodos.	135
Figura 51. Gráfica de rutas iniciales de la heurística de Clarke and Wright.	136
Figura 52. Flujograma de proceso del algoritmo C&W aplicado al modelo matemático..	139
Figura 53. Flujograma de la evaluación de la capacidad con la del vehículo en el cargue y descargue en cada nodo.	141
Figura 54. Código en R para el cálculo de las violaciones de ventanas de tiempo y costos asociados.....	142
Figura 55. Adición de constantes y parámetros para la función para consumo de combustible y costos asociados.	143
Figura 56. Frontera de Pareto construida con los resultados del municipio de San Marcos.....	145
Figura 57. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en San Marcos.	148
Figura 58. Frontera de Pareto para las soluciones del municipio de Buenavista.	150
Figura 59. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Buenavista.	153
Figura 60. Diagramas de pareto de soluciones del municipio de Sincelejo.....	156

<i>Figura 61. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Sincelejo.....</i>	<i>159</i>
<i>Figura 62. Diagrama de pareto de soluciones del municipio de Galeras.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 63. Pareto Galeras con las 26 soluciones con GAP menor del 5%.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 64. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Galeras..</i>	<i>165</i>
<i>Figura 65. Transporte en moto de leche cruda.</i>	<i>190</i>
<i>Figura 66. Transporte de leche cruda en vehículo de estaca.</i>	<i>190</i>
<i>Figura 67. Transporte de leche cruda en vehículos de tracción animal.</i>	<i>191</i>
<i>Figura 68. Medición de la leche.....</i>	<i>191</i>

Introducción

Con el alto índice de interdependencia económica que se está presentando en el mundo, efecto del aumento de las transacciones y el comercio mundial, las empresas han tenido que hacer más eficientes sus procesos para poder dar respuesta a un mercado cambiante y lleno de nuevos retos, en donde el flujo de bienes y recursos aumenta considerablemente, por lo que el traslado o movimiento de éstos, sigue siendo un proceso fundamental en cualquier cadena de suministro. La particularidad de cada cadena y producto, define las variables que demarcan las condiciones del transporte que se debe realizar ya sea para el aprovisionamiento o distribución de las materias primas, productos en procesos y/o de los productos terminados.

Ante lo mencionado, el proceso de transporte presenta un gran número de características tales como, la capacidad de carga de los vehículos, las distancias recorridas, frecuencias de viajes, costos asociados, la asignación de vehículos, etc., que deben ser consideradas si se quiere alcanzar la eficiencia operativa. Tales características pueden ser modeladas a través de formulaciones matemáticas que representen las decisiones involucradas en la configuración de la operación de transporte, y que a su vez sirvan como herramientas de apoyo para los tomadores de decisión. Particularmente los problemas de ruteo de vehículos (*Vehicle Routing Problem – VRP*), cuyo objetivo es atender las demandas de un conjunto específico de clientes con una flota de vehículos, se caracterizan por ser complejos y poseer excelentes aplicaciones prácticas en el campo de la logística y del transporte (Castillo & Bermeo, 2013) .

Los problemas de VRP generalmente incluyen restricciones particulares, como la capacidad limitada del vehículo (CVRP), distancia de viaje limitada por vehículo (DVRP) o ventanas de tiempo (VRP-TW). También hay algunas variantes con más de una característica (DCVRP, CVRP-TW, etc.). Los criterios comunes para VRP son: minimización de costos, distancia total, distancia máxima, lead-time o maximización del uso de los vehículos.

Dentro del proceso de aprovisionamiento de la leche cruda como materia prima en la cadena de suministro de lácteos, los aspectos de ruteo y más concretamente las variables de tiempo y costos, juegan un papel fundamental debido que se considera un producto altamente perecedero, (Jaramillo & Areiza, 2012). Lo que hace necesario establecer las medidas de protección

alimentarias que permitan mantener la calidad del producto para que conserve sus propiedades de acuerdo al uso industrial que será sometido, (Grocery Manufacturers Associations, 2005).

Cabe resaltar que dentro de esta cadena los costos de transporte representan un 12% del total de costos de producción, (CONPES, 2010). Por lo que el modelo que se propone en este trabajo, luego de una amplia revisión literaria que permitió identificar todas las variantes de los modelos de VRP y los posibles enfoques con la problemática identificada, prioriza la disminución de estos costos, sumado a la eficiencia del tiempo por el tipo de producto con el que se trabaja.

Adicionalmente, se conoce que el transporte genera más de una cuarta parte de la emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), (Sotelo & Tolón, 2011), y que la contribución del ganado a las emisiones mundiales son del 7% al 18%, (FAO, 2013), haciendo importante la consideración de la disminución de estas emisiones en torno al cálculo de los costos generados según el mercado mundial de emisiones de CO₂.

En este sentido, el modelo de ruteo de vehículos que se diseñó en esta investigación, presenta tres objetivos, los cuales son la reducción de los costos por emisiones de CO₂, la minimización de costos por violación de ventanas de tiempo y el costo fijo y variable por distancia recorrida, además, presenta las siguientes variantes: entregas y recogidas simultáneas, ventanas de tiempos suaves, flota heterogénea, múltiples depósitos, al igual que la disminución de emisiones de CO₂. Adicionalmente, se tiene en cuenta el consumo de combustible tanto en la ruta, cuando el vehículo está en movimiento, así como durante el tiempo que éste se encuentra detenido realizando el servicio en los nodos (tiempo en ralentí).

Todas estas consideraciones que se aplicaron, robustecen el modelo propuesto considerándolo como NP- Hard, por lo cual el tiempo computacional se incrementa considerablemente al aumentar el número de nodos (ganaderías y centros de acopio) que se evalúan a partir de los datos obtenidos en la caracterización realizada al proceso de aprovisionamiento de la cadena de suministros lácteos del departamento de Sucre, haciendo necesaria la aplicación de métodos aproximados para poder obtener soluciones de calidad, tales como lo son las heurísticas y metaheurísticas.

Se consideró un algoritmo de Clarke and Wright, el cual es una de las heurísticas más flexibles y utilizadas en la literatura, (Martínez F. , 2008), cuyas matrices de ahorros se construyeron con

base en las matrices de distancia y de tiempo, tratando de abarcar todos los objetivos del modelo matemático (distancia recorrida por el vehículo, la minimización de las violaciones a las ventanas de tiempo y por último, la minimización de emisiones de CO₂), para poder calcular así el costo total que enmarca todas las variantes consideradas.

1. Descripción del problema

El transporte es uno de los problemas más habituales de las cadenas de abastecimiento, debido a los inconvenientes que se presentan con respecto al costo que se deriva del proceso, el estado de las rutas y su elección, manejos de tiempos, manejo de distancias, gestión de personal, problemas en el vehículo, recargas de combustible y demás aspectos de ruteo, (Castillo & Bermeo, 2013). En consecuencia, las entidades se mantienen en un proceso de evolución que busca de manera permanente estrategias o metodologías que le permitan ofrecer un mejor servicio, haciéndolas más competitivas y eficientes en el mercado, (Quintero, 2013), dado que estos problemas representan un fuerte impacto económico en la actualidad, (Cepeda, San Lucas, & Delgado, S.F.).

La cadena de suministros de lácteos que comprende desde las unidades productivas, centros de acopio, industria, comercialización, hasta los consumidores finales, (Mojica, Trujillo, Castellanos, & Bernal, 2007), no es ajena a esta realidad, debido que a diferencia de otras cadenas, existe una gran relevancia en cuanto a la calidad de los productos y la seguridad alimentaria por ser altamente perecederos, (Jaramillo & Areiza, 2012).

Uno de los puntos más críticos de esta cadena es el proceso del aprovisionamiento de la leche cruda como materia prima, (Meneses, Estrada, Chantré, & López, 2015), el cual que se ve afectado por las demoras en los tiempos de recolección que atentan contra las propiedades microbiológicas y físico-químicas si no se brindan las condiciones necesarias para su conservación, (Castillo & Bermeo, 2013).

Los tiempos de espera que se derivan del tiempo de llenado de cada recipiente con el producto al momento de visitar el nodo, generan retrasos de tiempo en el proceso. Cabe resaltar que al iniciar la ruta, estos recipientes son llevados vacíos por vehículos como camiones, camionetas, motos que no cuentan con sistemas de refrigeración y que su capacidad, se ve limitada a la sumatoria de la capacidad de los recipientes, (Olivero, Aguas, & Cury, 2011).

Habitualmente, el aprovisionamiento de la leche cruda es un proceso que se ejecuta según la experiencia de las acopiadoras para programar la ruta de los vehículos, generando errores que afectan el servicio por no utilizar herramientas novedosas que optimicen el proceso y que permitan minimizar los tiempos, costos asociados, las distancias recorridas, (Berna, 2011) y con ello, el

consumo de combustibles derivados del petróleo y el consumo de energía, para disminuir las emisiones de gases contaminantes tales como el CO₂ (dióxido de carbono) que producen los vehículos y generan daños al ambiente y a la salud humana. (Pradenas, Oportus, & Parada, 2013). Por lo anteriormente descrito, el aprovisionamiento de la leche requiere medidas que mitiguen o minimicen las problemáticas evidenciadas, (Meneses, Estrada, Chantré, & López, 2015).

Una de las medidas a implementar sería la optimización de rutas y la energía en términos de consumo de combustible y la asignación de recipientes a cada unidad productiva de acuerdo a su producción, para que los vehículos solo descarguen recipientes vacíos y carguen los llenos reduciendo los tiempos de espera al realizar el servicio. La situación descrita puede ser modelada como un problema de ruteo de vehículos con recolección y entrega simultánea (*Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery – VRPSPD*). Este modelo de ruteo considera el cargue y descargue de productos en un mismo nodo y se ha utilizado para optimizar rutas de cadenas de abastecimiento que apuntan a una logística más ecológica, (Aravind, Deepak, & Brijesh, 2014). Siendo el más acorde a la realidad de las empresas del sector lácteo de Sucre, en donde se pretende desarrollar esta metodología de solución.

La implementación de este modelo de VRP permite el diseño y programación de rutas, creando ventajas competitivas, apuntando a la disminución de costos en el proceso y de igual modo, la reducción de los contaminantes emitidos, de tal manera que se puedan beneficiar cada uno de los eslabones que intervienen en la cadena de lácteos, (Gutierrez, Palacio, & Villegas, 2007).

2. Justificación

El proceso de transporte se convierte en un reto cada vez más grande para las empresas quienes se ven obligadas a innovar constantemente teniendo en cuenta una serie de factores tales como: recorridos, frecuencias, rutas, horarios, personal, tiempos de entrega y recolección, flota de vehículos disponibles e inventarios, para poder maximizar la calidad del servicio al mínimo costo, (Vidal & Goetschalckx, 1997; Quintero, 2013).

En el caso de la cadena de suministros de la lácteos, la recolección y transporte de la leche es un factor fundamental que se debe realizar de manera eficiente, debido que es un producto altamente perecedero que puede sufrir contaminación de manera muy fácil, (Castillo & Bermeo, 2013).

Con el desarrollo de modelos de VRP que se ajustan a los problemas reales, es posible generar un ruteo más eficiente que ayude a la regulación de los flujos de bienes entre los diferentes actores de la cadena para mejorar los indicadores de competitividad, y que en la actualidad, han apuntado hacia la protección del medio ambiente en términos de disminución de energía consumida, permitiendo una disminución de costos, (Lamos, Galvan, González, & Cruz, 2013).

El VRP Pickup and Delivery Simultáneo con ventanas de tiempo, capacitado y flota heterogénea, aplicado al aprovisionamiento de la leche en la cadena de abastecimiento de lácteos, considera los diferentes tipos de vehículos que integran la flota de transporte y su capacidad de carga según la capacidad de los recipientes que transportan, respetando las ventanas de tiempo para la atención de cada unidad productiva, bajo el enfoque que pretende que al momento de recolectar la leche, se descarguen los recipientes vacíos del vehículo los cuales quedarían a disposición de la unidad productora y se carguen los recipientes que ya se encontraban llenos con el producto y asignados con anterioridad a esa unidad, para efectos de disminuir tiempos de servicio y mantenerse en el tiempo estipulado de la recolección. Lo que proporcionaría soluciones que cumplan con los requerimientos del transporte de una manera eficiente, impulsando la competitividad del sector frente al crecimiento del mercado, (Rosales & Correa, 2014).

En este sentido, se lograrían los siguientes impactos: minimizaría el costo de recolección de la leche mediante la optimización de las rutas, el tiempo de recolección, tiempo de recorrido, el uso de vehículos, la energía utilizada en el proceso y el consumo de combustible, (Kara *et al*, 2007). Lo que generaría rentabilidad a las acopiadoras y toda la cadena en general, (González & Teran, 2010).

De igual modo, mejoraría las relaciones entre acopiadores, transportistas y productores brindando mayor asociatividad al sector y mejores oportunidades financieras; aumentaría la competitividad generando así mejores condiciones de vida para los empleados y sus familias, (Rebolledo, Duque, López, & Velazco, 2013).

Por otra parte, con este proyecto se aporta una herramienta que permita ampliar el conjunto de soluciones existentes en la literatura especializada, ofreciendo una extensión de las variantes utilizadas en los modelos de VRP y más concretamente en los modelos VRPSPD que se direccionen a la disminución de costos, tiempos y emisiones nocivas para el ambiente, del cual se pueden esbozar investigaciones futuras a partir de los resultados obtenidos.

En el caso del Departamento de Sucre, este proyecto se ajusta al Plan de Desarrollo (2016 – 2019), el cual formuló como una de sus estrategias impulsar el desarrollo de las cadenas productivas identificadas en la Agenda Prospectiva de Ciencia y Tecnología y en el Plan Regional de Competitividad de Sucre, entre ellas, la láctea.

El diseño de un modelo multiobjetivo de VRP pick-up and delivery simultáneo (VRPSPD) para el aprovisionamiento de la leche en la cadena de suministros de lácteos, abarcaría tres objetivos. Inicialmente el costo por uso del vehículo y distancia recorrida, el costo por violaciones a ventanas de tiempo; las ventanas de tiempo serán restricciones suaves, por lo que los clientes pueden ser servidos antes o después de las ventanas de tiempo, pero incurriendo en costos de penalización.

El último objetivo, es la minimización de consumo de combustible y emisiones de CO₂, con lo que se proporcionaría una recolección del producto que promueve un consumo menor de combustible, energía y emisiones de GEI, procurando así el cuidado del ambiente, (Kazemian & Samin, 2015).

Adicionalmente, el modelo consideraría un número limitado de vehículos que pueden realizar una sola ruta, en donde cada cliente es visitado exactamente una vez y se debe hacer cargue y descargue satisfaciendo la demanda y oferta.

Todo lo anterior, justifica la construcción del modelo, para aportar al fortalecimiento de la competitividad y productividad del sector, impulsando el desarrollo económico, social y ambiental, articulándose en los objetivos de los planes de desarrollo y competitividad, y aportando un nuevo conocimiento al contexto científico.

3. Objetivos

A continuación se describe el objetivo general y los objetivos específicos de esta investigación.

3.1 Objetivo general

Proponer un modelo de programación matemática, al igual que técnicas de solución para el problema de ruteo de vehículos con recolección y entrega simultáneas, con flota heterogénea, ventanas de tiempo, inclusión de costos de operación y criterios ecológicos, aplicado al aprovisionamiento de la leche en la cadena de abastecimientos de lácteos en Sucre.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar una revisión literaria de los problemas de VRP direccionados al Pickup and Delivery.
- ✓ Caracterizar la red actual de aprovisionamiento de leche en la cadena de lácteos del Departamento de Sucre.
- ✓ Desarrollar un modelo matemático multiobjetivo de ruteo de vehículos considerando Pickup and Delivery Simultáneo, capacitado, flotas heterogéneas y ventanas de tiempos para el aprovisionamiento de la leche.
- ✓ Resolver el modelo matemático propuesto mediante un método exacto o aproximado según su complejidad y tamaño computacional, que permita obtener respuestas de calidad.
- ✓ Evaluar el modelo diseñado para el ruteo de vehículos en el proceso del aprovisionamiento de la leche, considerando instancias reales del departamento de Sucre.

4. Capítulo I: Revisión literaria

4.1 Cadena de suministro

La Cadena de Suministro (*Supply Chain - SC*), está conformada por un conjunto de actores interrelacionados que componen los eslabones y se ven involucrados en tres flujos específicos: el flujo de productos y/o servicios, el flujo del dinero y el flujo de información, integrando así, todos los procesos logísticos en un modelo conceptual que los ligan ya sea como proveedores, productores, almacenistas, distribuidores o detallistas, para cumplir con los niveles de servicio requeridos para satisfacer al consumidor final, produciendo los bienes con las especificaciones demandadas, entregándolos en las cantidades establecidas, en el tiempo y lugar correcto, y que sea rentable para todas los actores involucrados, (Castellanos, 2012).

Según Jiménez & Hernández (2002), definen a la SC como:

“El conjunto de empresas integradas por proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores (mayoristas o detallistas), coordinados eficientemente por medio de relaciones de colaboración en sus procesos clave, para colocar los requerimientos de insumos o productos en cada eslabón de la cadena en el tiempo preciso, al menor costo, buscando el mayor impacto en las cadena de valor de los integrantes, con el propósito de satisfacer los requerimientos de los consumidores finales”. (Figura 1).

La SC también se puede definir como el conjunto de actividades funcionales asociadas con el movimiento de bienes desde el suministro de materia prima incluyendo la selección, compra, programación de producción, procesamiento de órdenes, inventarios, transporte, almacenamiento y servicio al cliente, y que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, (Vélez, 2011). Ante esto, existe la necesidad de integrar todas estas actividades mediante un mejoramiento de las relaciones dentro los eslabones de la cadena, para alcanzar una ventaja competitiva y sustentable, por lo cual se habla de Gestión de la Cadena de Suministro (SCM - *“Supply Chain Management”*), (Handfield & Nichols, 1999; Ballou, 2004).

En este sentido, cuando se habla de SCM, hay que comprender que dentro de una organización, una buena gestión se basa en el ciclo (PHVA), debido que, se debe realizar la planeación de las

metas, ejecutar las estrategias para lograr los objetivos, medir los resultados y actuar de acuerdo con los resultados, lo que conlleva a una mejora constante del sistema, (Santamaría, 2012).

Según Ballou (2004), Una de las definiciones más amplias y generales de la SCM se expresa como: *“la coordinación sistemática y estratégica de las funciones tradicionales del negocio y de las tácticas a través de estas funciones empresariales dentro de una compañía en particular, y a través de las empresas que participan en la cadena de suministros con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo de las empresas individuales y de la cadena de suministros como un todo”*, (Mentzer, J., DeWitt, W., Keebler, J., Min, S., Nix, N., Smith, C., & Zacharia, Z., 2001).

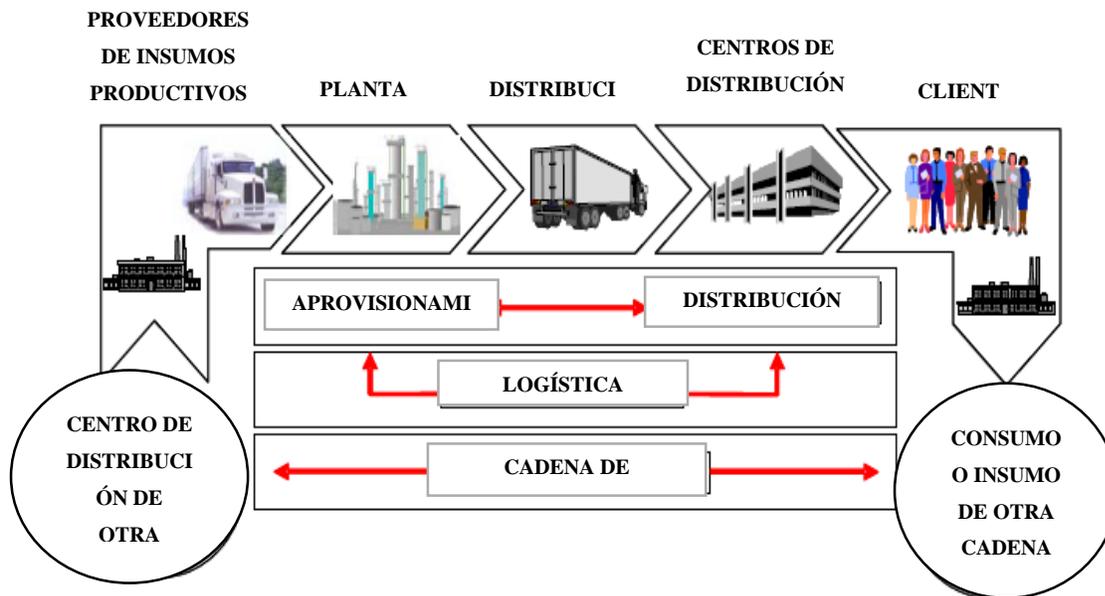


Figura 1. Configuración de la cadena de suministro. Fuente: (Jiménez & Hernández, 2002).

La introducción de los conceptos de SCM iniciaron a principios de los 80's, sin embargo su desarrollo, aplicación e importancia fueron creciendo en los 90's, debido a los cambios en la organización de la producción y la globalización de los mercados. Con la aplicación de estos conceptos, se empezaron a obtener resultados tangibles en términos de ahorros y la mejora de la calidad de respuesta hacia los clientes en el sector industrial, (Saucedo, 2001).

Cabe resaltar que cuando se habla de SC, se debe mirar como la conformación de una red empresarial, en donde una unidad productiva integra sus procesos logísticos de

aprovechamiento, producción y distribución con otra unidad productiva que le sirve como proveedor, convirtiéndose en “socios”, y esta última a su vez, es “socia” de otra unidad que le abastece. Esta asociatividad que se presenta tanto “aguas abajo” con el provechamiento, como “aguas arriba” con la distribución, visualizan a las empresas asociadas como eslabones de una cadena, (Jiménez & Hernández, 2002). (Figura 2).

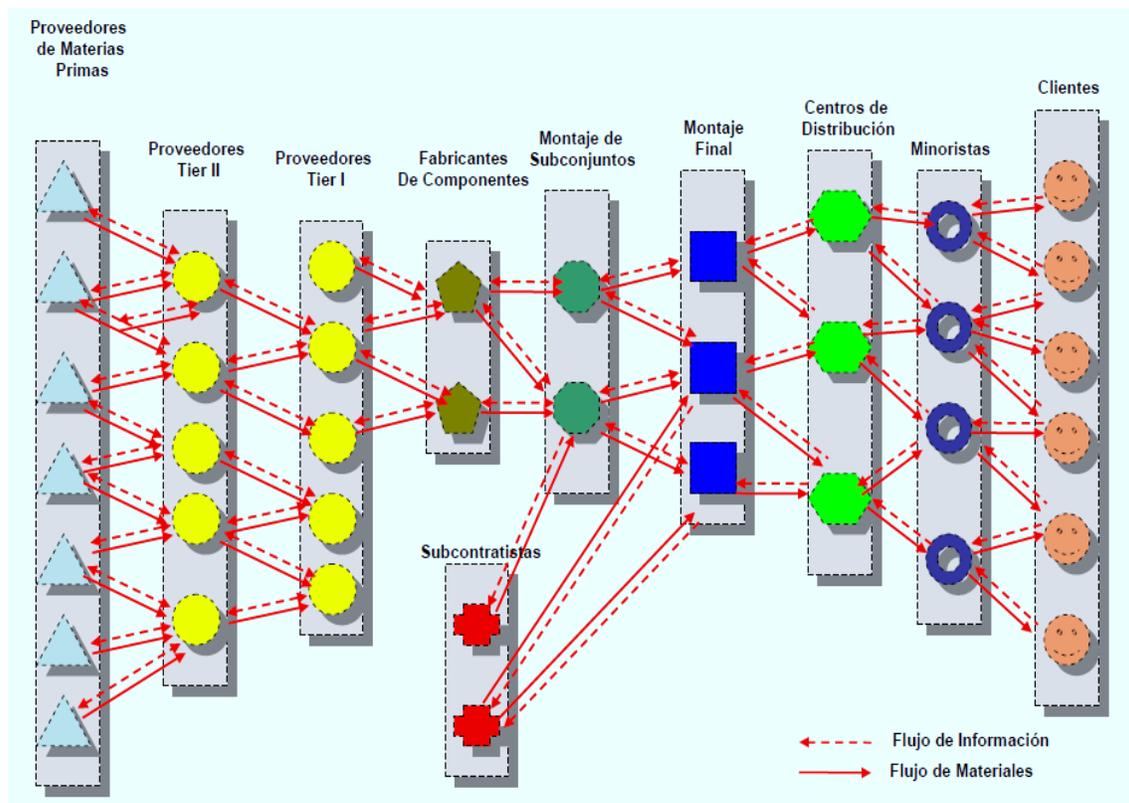


Figura 2. Red de Suministro. Fuente: (Jiao, Xiao, & Arun, 2006; Vilana, 2011).

En este sentido, la logística definida en 1998 por el *Council of Logistics Management* como la encargada de planear, implementar y controlar de manera eficiente todo el flujo de bienes, dinero e información desde los proveedores de los proveedores, hasta el consumidor final, (Jiménez & Hernández, 2002). Pasa a ser una fuente de ventaja competitiva para la cadena de suministro, aun cuando existe una necesidad para la integración de las operaciones de negocio que van más allá de logística como tal, (Vilana, 2011).

4.2 Cadena de suministros lácteos: contexto mundial

La cadena de suministro lácteos la integran el conjunto de agentes económicos interrelacionados y que añaden valor en el flujo del producto desde la producción primaria hasta el consumidor final, conformando así, los eslabones de la cadena, (Ministerio de Agricultura OGPA-DGPA, 2003).

Dentro de la cadena de suministro de lácteos, el eslabón de proveedores de la materia prima principal que es la leche cruda, juega un papel fundamental que determina la disposición del suministro para la elaboración de los productos lácteos a lo largo de toda la cadena. En este sentido, La producción de leche cruda en el contexto internacional, se realiza bajo dos tipos de metodologías o técnicas, las cuales son: las producciones industrializadas en las que se emplean avances tecnológicos y razas especializadas tipo lecheras, y la producción a pequeña escala que emplea razas variadas por lo general dedicadas al doble propósito (carne y leche), (Jaramillo & Areiza, Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012), 2012).

De igual modo, la dinámica del mercado internacional está dividida en dos grupos de países: los países altamente desarrollados los cuales necesitan amplios subsidios debido a las condiciones agroclimáticas que generan altos costos, como Canadá, Estados Unidos y la Unión Europea, y los países con bajos costos de producción como Nueva Zelanda, Australia, Argentina y Uruguay, que poseen condiciones agroclimáticas muy favorables para la producción y cuentan con la infraestructura necesaria, (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2010).

Según datos de la FAO (2015), la producción total de leche a nivel mundial correspondiente al año 2014 fue de 804,5 millones de toneladas métricas, siendo la Unión Europea, quien representa la mayor producción de leche en el mundo, con una producción estimada de 159 billones de litros, seguido de Estados Unidos con 93 billones, India con 58 y China con 42, (Comité Nacional Sistema Producto Bovino Leche, 2015).

En este sentido, los principales productos que hacen parte de la cadena de lácteos que se comercializan en el mundo son: leche esterilizada, leche pasteurizada, leche concentrada, leche UHT (Ultra High Temperature), leche en polvo, mantequilla, crema de leche, lactosuero, queso, yogurt y cuajada, (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007).

En el marco de América Latina y el Caribe, conformada por países con potencial lechero como Brasil, Argentina, México, Colombia y Ecuador; presentó el año 2011 una producción de 68 millones de toneladas para Sudamérica, 14.4 millones para América Central (incluyendo México) y 1.9 millones para la región del Caribe.

En este sentido, para América Latina y el Caribe, la cadena láctea representa un sector muy importante en la economía de los países, y se proyecta como el conjunto de segmentos anidados que van desde la provisión de insumos y materias primas, hasta todos los consumidores, sean nacionales y/o extranjeros, (FAO & FEPALE, 2012). (Figura 3).



Figura 3. Cadena de Suministros Lácteos en América Latina. Fuente: Elaboración propias a partir de (FAO & FEPALE, 2012).

Según la revista Contexto Ganadero (2013), a 2011 el país con mayor producción de estas zonas es Brasil, seguido por Argentina, México y Colombia ocupando el cuarto lugar, tal como se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 4).

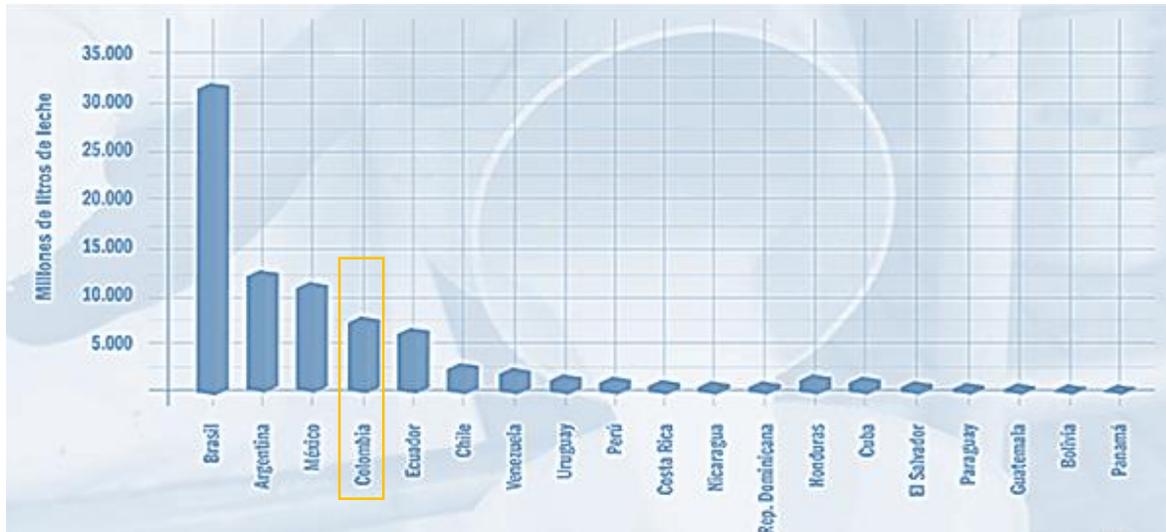


Figura 4. Principales Productores de leche en Latinoamérica a 2011. Fuente: FAO, Tomado de (*Contexto Ganadero*, 2013).

4.3 Cadena de suministro de lácteos en Colombia

La cadena de suministros de lácteos es un sector fundamental y estratégico para el desarrollo del país, debido al grado de importancia en la generación de empleo, la seguridad alimentaria y la productividad. Este sector, promedia una participación de 1,5% del PIB nacional, dividido en un 1,1% originado en la producción primaria de leche, y el restante 0,4% en la elaboración de productos lácteos, además de un consumo per cápita en promedio del producto durante los últimos años de 143 litros por habitante/año, (Consejo Nacional Lácteo, 2011).

Gracias a esta participación, el sector lácteo genera aproximadamente 618.000 empleos en el país, de los cuales 452.000 corresponden a sistemas de doble propósito y 118.000 a sistemas de lechería especializada, mientras que el procesamiento industrial de productos lácteos genera alrededor de 16.000 empleos, (Consejo Nacional Lácteo, 2011).

En este sentido, la ganadería en Colombia se ha convertido en un sector realmente importante, superando 2,5 veces el sector avícola, 3,3 veces el sector cafetero, 3,2 veces el sector floricultor, 4,9 veces el sector porcícola y 5,7 veces el sector bananero, (FEDEGAN, 2012). Presentando un portafolio amplio de empresas dedicadas a la producción, transformación y comercialización de lácteos, las cuales están ubicadas en diferentes zonas del país y poseen un gran conocimiento del consumo y las redes de distribución nacionales.

4.3.1 Cadena de valor del sector lácteo en Colombia

La cadena de suministros de la leche en Colombia, denominada como un “conjunto de actividades que se articulan técnica y económicamente, desde el inicio de la producción y elaboración de un producto agropecuario, hasta su comercialización final”, (FUNDACIÓN ALPINA, 2012), presenta seis (6) eslabones específicos, los cuales son: producción primaria, acopio de leche cruda, procesamiento, comercialización de productos lácteos, el consumidor final, y un eslabón transversal para toda la cadena constituido por los proveedores de insumos y servicios, (Consejo Nacional Lácteo, 2011). Tal como se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 5).

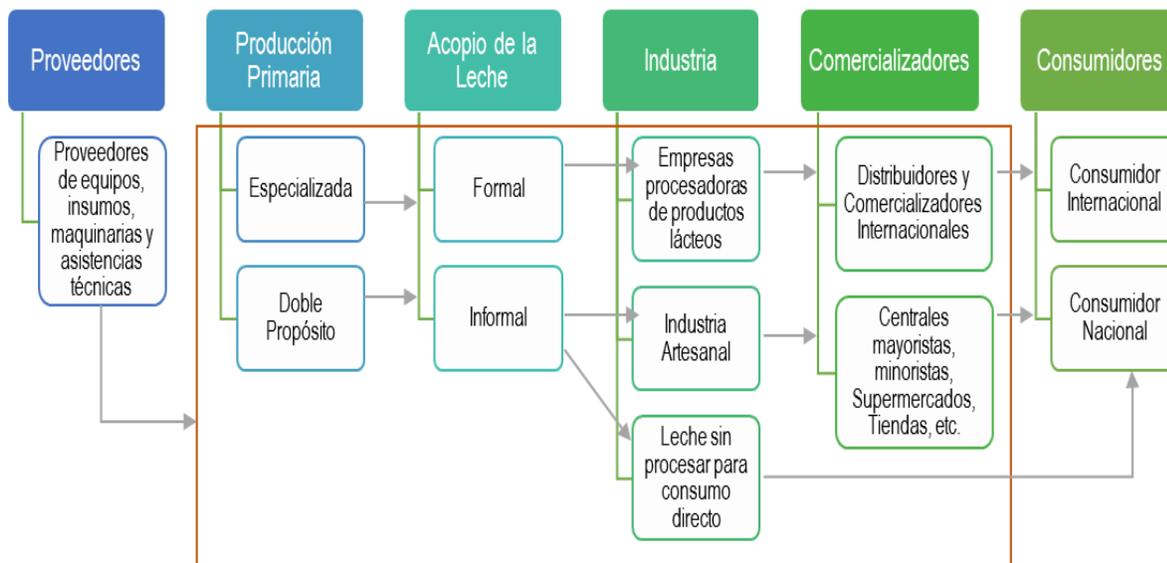


Figura 5. Representación Gráfica los eslabones de la Cadena de Suministro Láctea. Fuente: Adaptada de (Consejo Nacional Lácteo, 2011).

4.3.1.1 Primer eslabón: Producción primaria.

Este eslabón enmarca las actividades netas de producción de leche, la cual es realizada por pequeños, medianos y grandes ganaderos que pueden llevar a cabo el proceso productivo bajo dos tipos de sistemas, los cuales son: el sistema especializado y el doble propósito.

El sistema especializado, es desarrollado por empresas o unidades ganaderas que se dedican de forma exclusiva a las razas lecheras tipo Holstein, Jersey, entre otras. Esta actividad se concentra en el altiplano o trópico alto y sus principales cuencas son las de Nariño, el Altiplano Cundiboyacense y el Suroriente Antioqueño, debido al clima que favorece la alta producción. Este sistema, es el responsable de cerca del 40% de la producción nacional de leche, (FEDEGAN, 2009).

Por otra parte en el sistema doble propósito, los ganaderos explotan un sistema de producción basado en razas adaptadas al trópico tal como la Gyr, Brahaman, Guzerá y sus cruces con razas lecheras obteniendo ganados tipo Gyrolando, Bramhol, entre otros; la actividad principal es la producción de leche, con la venta de terneros como actividad subsidiaria. Este sistema existe en todos los pisos térmicos, pero se concentra en el trópico bajo y es el responsable del 60% de la producción nacional de leche, (FEDEGAN, 2009).

En Colombia, la producción de leche se encuentra enfocada en 22 departamentos del país, ubicados en las regiones Caribe, Pacífica, Occidental y Central; la región Caribe, conformada por los departamentos de Sucre, Magdalena, Córdoba, Cesar, Atlántico, Bolívar y La Guajira, y la región Pacífica conformada por Nariño, Cauca, Valle del Cauca y Putumayo, ambas enmarcadas en el trópico bajo, generan el 40% y 9% de la producción total de leche respectivamente. Por otra parte, la región Central conformada por Boyacá, Cundinamarca, Santander, Meta y Norte de Santander, y la región Occidental conformada por Caquetá, Quindío, Antioquia, Huila, Caldas y Risaralda, ambas pertenecientes al trópico alto, contribuyen con el 34% y el 17% respectivo de la producción de leche del país, (Departamento Nacional de Planeación, 2007).

En el 2014, Colombia presentó una producción diaria de 19.352.463 litros de leche, de los cuales aproximadamente el 10% fueron procesados en finca, el 8% fueron de autoconsumo, el 45% en acopio formal y 37% en sector informal, (DANE, 2015); esta producción proviene en un 48% de razas bovinas de doble propósito como lo son las pardo suizo, normando y cebú, a las que pertenece un 95% de la población de bovinos en Colombia, (Bohorquez, Buitrago, Joya, Montaña, & Rivera, 2012).

4.3.1.2 Segundo eslabón: Centros de acopio.

Según el Consejo Nacional Lácteo (2011), en el eslabón del acopio de la leche cruda correspondiente a las actividades posteriores a la obtención de la leche en la cual se pueden identificar cinco (5) agentes:

- ✓ Acopiadores, quienes concentran varias cantidades de leche, que luego serán transportadas a industrias procesadoras.
- ✓ Intermediarios, que se encargan de recoger la leche en las fincas, transportarla y venderla a los procesadores.
- ✓ Cruderos, cuya actividad es la comercialización directa de la leche cruda proveniente de las ganaderías o unidades productivas, al consumidor final.
- ✓ Transportadores, quienes son contratados por el procesador para cumplir con este servicio. Cabe resaltar, que el proceso de transporte representa el 7% y 12% del total de costos de producción de la leche para las ganaderías especializadas y doble propósito respectivamente, (CONPES, 2010).
- ✓ Procesadores, quienes hacen parte de este eslabón cuando se encargan directamente de hacer el acopio de leche en las fincas, pero que generalmente, se encuentran relacionados en el proceso de industria-procesamiento.

4.3.1.3 Tercer eslabón: Industria-Procesamiento.

Está constituido tanto por las empresas que realizan los procesos industriales a la leche, como por procesadores informales que llevan a cabo su actividad sin el cumplimiento de la normatividad vigente (Consejo Nacional Lácteo, 2011).

En este eslabón, se obtienen una amplia gama de productos lácteos o derivados de la leche, tales como la leche pasteurizada, leche ultrapasteurizada, leche evaporada, leche condensada, leche en

polvo, leche maternizada, leche instantánea, leches ácidas o fermentadas, crema acidificada, leches saborizadas, dulces de leche, mantequilla, y quesos.

Las empresas procesadoras formales representan una importante participación de inversión extranjera acaparando la mayoría del mercado, (FEDEGAN, 2009). Se estima que 25 del total de las empresas formales alcanzan el 79% del acopio nacional, (Consejo Nacional Lácteo, 2011); de estas 25, las primeras tres empresas que realizaron mayor acopio de leche en el 2012, fueron: COLANTA, ALPINA y ALQUERÍA, (Jaramillo & Areiza, Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012), 2012).

En cuanto a la informalidad, que quiere decir, leche que no se procesa a través de los canales formales, varía a nivel regional y está asociada al aumento de la población rural, por lo que se evidencia con mayor puntualidad en departamentos predominantemente rurales y poco urbanizados, en donde los principales actores se caracterizan por ser pequeños productores, con altos índices de desempleo o de subempleo, quienes realizan las operaciones de una manera “invisible”, sin ceñirse a las medidas establecidas por los entes de control, (Jaramillo & Areiza, Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012), 2012).

4.3.1.4 El cuarto eslabón: Comercialización.

Se enmarcan las actividades de comercialización y distribución de leche y productos lácteos interceptando la oferta del producto con su demanda, y llevando los productos terminados hasta el consumidor final.

En este sentido, los comercializadores se dedican a la venta directa e indirecta de los productos lácteos y sus derivados; si la venta es indirecta, puede pasar por intermediarios antes de llegar al consumidor final, mientras que en la venta directa llega de manera inmediata al consumidor.

En cuanto a los distribuidores, se encargan del transporte y la distribución de los productos, ya sean mayoristas, o minoristas, (Orjuela, 2013).

Los canales de comercialización y distribución dentro de este eslabón son tres: el canal tradicional (tiendas de barrio en todo el territorio nacional), las grandes superficies (cadenas de supermercados) y el canal institucional (las compras públicas para programas asistenciales,

instituciones armadas, hospitales, etc.), (Consejo Nacional Lácteo, 2011). Cabe resaltar que existe un gran índice de informalidad en este eslabón, que corresponde al 44% de la comercialización de la leche cruda, (Jaramillo & Areiza, Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012), 2012).

Para poder llevar a cabo este eslabón, hay que ceñirse al Decreto Número 1880 del 2011 del Ministerio de la Protección Social de Colombia, que dicta a los comercializadores las medidas higiénicas y sanitarias necesarias para mantener la calidad del producto conservando sus propiedades físicas y químicas, (Ministerio de Salud y Protección Social, 2011).

4.3.1.5 El quinto eslabón: Consumidores.

Los consumidores constituidos por el mercado en general o los consumidores específicos de los productos, ya sea leche cruda o derivados lácteos, a nivel nacional o internacional (Orjuela, 2013).

4.3.1.6 El sexto eslabón (transversal): Proveedores.

Se establece como un eslabón transversal a los eslabones 1, 2, 3 y 4, y está conformado por todas aquellas empresas o personas que brindan los insumos, productos, maquinaria y asistencia necesaria, es decir, productos y servicios para asegurar la producción de lácteos y éstos, puedan ser entregados al consumidor final.

Dentro de los insumos más usuales, se encuentran las semillas de pasto, sales mineralizadas y concentrados/balanceados. Estos últimos, son utilizados en un 70% para mejorar la producción lechera en las grandes ganaderías, y son mínimamente empleados en las pequeñas, (FEDEGAN, 2012).

4.3.1.7 Relación de actores en los eslabones de la cadena

Atendiendo al esquema de la cadena de suministros lácteos en Colombia, se establece una relación entre los actores que integran cada eslabón y que fueron definidos anteriormente, de

modo que un actor puede participar en varios eslabones dependiendo el rol que asuma. (Figura 6).

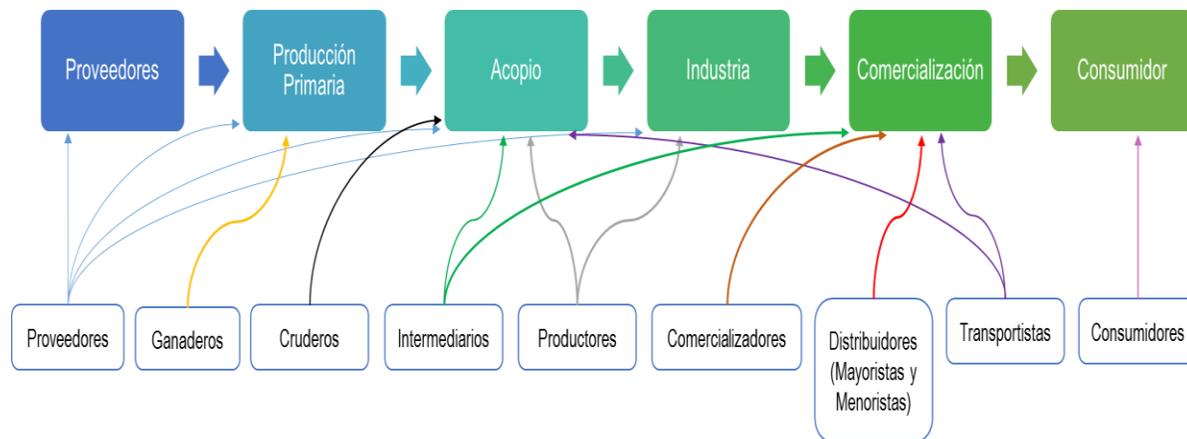


Figura 6. Relación de actores en los eslabones de la cadena de suministros lácteos en Colombia. Fuente: Elaboración propia.

Acorde a lo anterior, los actores de la cadena son: Proveedores, Ganaderos, Cruderos, Intermediarios, Productores, Comercializadores, Distribuidores, Transportistas y Consumidores.

Tal como se mencionó, los proveedores impactan los eslabones de producción, acopio e industria; los intermediarios por otro lado, hacen parte proceso de acopio y comercialización. De igual modo, los productores o transformadores, están ligados directamente a dos eslabones, el de acopio e industria.

Otros actores que tienes más de una relación con los eslabones, son los transportadores, quienes hacen parte de la cadenas en los eslabones de acopio y comercialización.

4.3.2 Normatividad del sector lácteo en Colombia

En Colombia, se han establecidos nomas y políticas enmarcadas en los artículos 64, 65 y 66 de la Constitución Política de 1991, para el desarrollo del sector agropecuario que apuntan a: brindar acceso a los campesinos a la propiedad de tierras, comercialización de los productos, asistencia técnica y empresarial, entre otros y otorgándole prioridad al desarrollo integral de las actividades

agrícolas, pecuarias, pesqueras, forestales, agroindustriales y desarrollo de tecnologías para incrementar la productividad.

Dentro del marco normativo colombiano, se consolida el Documento CONPES 3675 de 2010: Política Nacional para Mejorar la Competitividad del Sector Lácteo Colombiano, estableciendo los compromisos de los recursos de la Nación para la financiación de la política de mejoramiento de la competitividad del sector lácteo colombiano, con tal de disminuir los costos de producción, promover asociaciones, aumentar la competitividad de la cadena, ampliar y abastecer los mercados interno y externos, y fortalecer la gestión institucional del sector.

Asimismo, el Documento CONPES 3676 de 2010 se establecen las políticas sanitarias que pretenden el mejoramiento de la competitividad de las cadenas lácteas y cárnicas mediante la calidad e inocuidad de la carne, la leche y sus derivados.

Mediante la Resolución 076 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR del 7 de julio de 1999 se crea el Consejo Nacional Lácteo – CNL, dándole espacio al primer Acuerdo de Competitividad de la Cadena Láctea (1999). Posteriormente, a través de la Resolución 082 del 24 de marzo de 2011 del mismo MADR, se le da reconocimiento al CNL como la Organización de Cadena del Sector Lácteo Colombiano, constituida por 5 gremios de la cadena láctea (Analac, Andi, Asoleche, Fedecooleche y Fedegán) y 3 Ministerios, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Comercio, Industria y Turismo-MinCIT, y Ministerio de Salud y Protección Social-MinSalud.

Por otra parte, se establecen reglamentos técnicos para la producción primaria, acopio, transporte y comercialización de la leche y los derivados lácteos, tales como el Decreto 3075 de 1997 de MinSalud y el Sistema de Pago de Leche Cruda al Productor, establecido por el MADR, a través de la Resolución 012 de 2007.

4.4 Proceso de aprovisionamiento

Según *the Supply-Chain Council (SCC)*, las cadenas de suministros presentan cinco procesos principales de gestión para satisfacer la demanda de un cliente, los cuales son: planificación (*plan*), aprovisionamiento (*source*), manufactura (*make*), distribución (*deliver*) y devolución (*return*), (Calderon & Lario, 2005).

Dentro de la cadena de suministros, el proceso de aprovisionamiento se encarga de realizar la identificación y análisis de las fuentes de suministro de bienes y servicios esenciales para el proceso, y así, evaluar y seleccionar a la red de proveedores, ya sea locales, nacionales o internacionales. De igual modo, se encarga de la programación de los procesos de acopio, gestión de inventario, bienes y la administración de datos, (Castellanos, 2012). Todo esto, con el objetivo de tener siempre a disposición un suministro de materias primas correctas en las cantidades y tiempos necesarios, al mínimo costo, (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, s.f.).

En este orden de ideas, se puede hablar de la logística de aprovisionamiento, que agrupada con la logística de planta, conforman la logística de producción, y ésta a su vez se agrupa con la logística de distribución, para conformar todo el sistema logístico que, mediante la articulación de sus componentes, genera un flujo que permite dar respuestas veloces a una demanda cambiante y cada vez más exigente. (Figura 7).

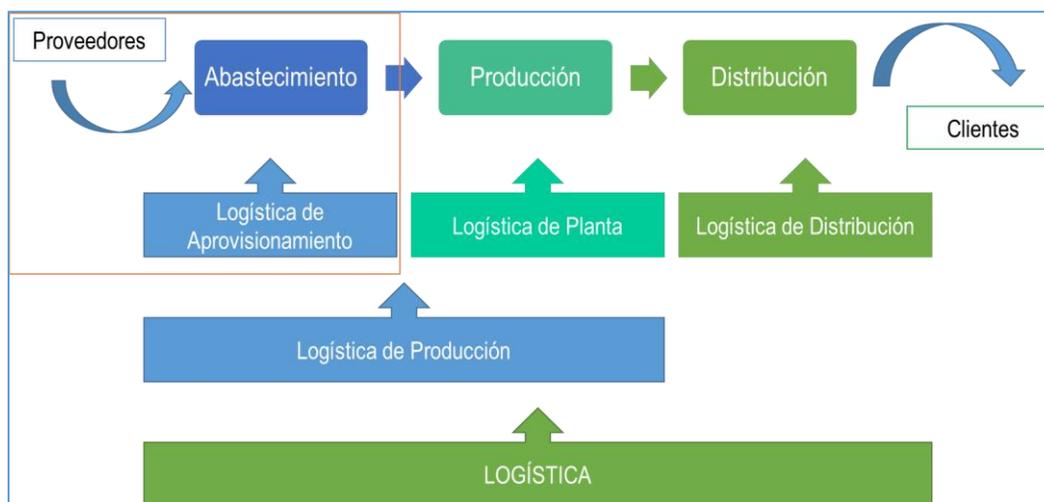


Figura 7. Sistemas Logísticos. Fuente: Elaboración propia a partir de (Monterroso, s.f.).

En este sentido, la logística de aprovisionamiento comprende la planificación, ejecución y control del flujo eficiente y rentable de las materias primas necesarias para el funcionamiento de la organización, (Govindan, Soleimani, & Kannan, Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future, 2014).

Una buena gestión de aprovisionamiento impacta directamente en los costos del producto, su calidad y el servicio al cliente, con lo que se genera una importante disminución de gastos y costos aportando una considerable maximización del beneficio logístico. Esto se logra gracias a una mejora el flujo continuo de materiales, la aplicación de las normas de calidad adecuadas, la adquisición de productos de acuerdo a las especificaciones o necesidades dadas y una buena relación con proveedores competentes y confiables, manteniendo una relación gana-gana con ellos, (Universidad Nacional Abierta y a Distancia, s.f.).

Dentro de la cadena de suministros de lácteos, el proceso de aprovisionamiento se encarga del suministro y acopio de las materias primas y en caso esencial de la leche cruda, obtenida y transportada desde las unidades productivas/ganaderías; para poder lograr los objetivos planeados en este proceso, se debe abordar una problemática que se traduce en la planeación y ejecución de las entregas desde la red de proveedores, a la unidad acopiadora y/o procesadora, debido a limitaciones dadas entre otros factores, por aspectos de transporte, (Chauhan, Eremeev, Romanova, Servakh, & Woeginger, 2005).

El transporte es uno de los elementos más críticos e importantes, pero de los menos entendidos en la cadena de suministro, el cual requiere ser un servicio de calidad en términos de seguridad, regularidad, oportunidad, entregas a tiempo y costos, y más aún en la cadena láctea, debido que la leche cruda es un producto altamente perecedero, (Jiménez & Hernández, Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico, 2002).

Una de las variables fundamentales del transporte terrestre es el estado de las vías. En Colombia solo el 8,5% de las vías están pavimentadas y de estas, el 13% está en buen estado, el 51% regular estado y el 36% mal estado, (FEDEGAN, 2012). Además, los costos promedios de transporte para la producción lechera en ganaderías colombianas con sistemas doble propósitos a 2009 representan en promedio el 12% del total de costos de producción, (CONPES, 2010).

4.5 Problemas de ruteo de vehículos en el transporte

El ruteo de vehículos es uno de los problemas más usuales de la cadena de suministros, debido a los inconvenientes que se presentan en el transporte de un producto con respecto al estado de las

rutas y su elección, manejos de tiempos, manejo de distancias, gestión de personal, problemas en el vehículo, recargas de combustible y demás aspectos de ruteo, (Castillo & Bermeo, 2013).

Este gran número de variables permiten desarrollar modelos de VRP (*Vehicle Routing Problem*), los cuales son muy aplicados por su relevancia práctica en la búsqueda de obtener resultados óptimos o aproximados en la minimización de distancias y costos de transporte, (Toth & Vigo, 2002).

El VRP tiene como objetivo principal la asignación de rutas a vehículos para que cumplan la demanda de clientes que se encuentren dispersos en un área partiendo de un punto o depósito específico y regresando a él al final del periodo, (Herazo, 2012). (Figura 8).

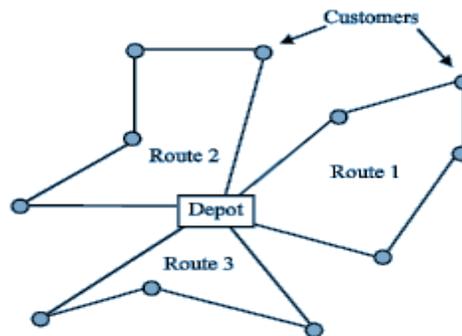


Figura 8. Representación Gráfica del problema de VRP. Fuente: Tomada de (Ghoseiri & Ghannadpour, 2009).

A lo largo del tiempo el VRP ha ido aumentando su complejidad debido al gran número de variantes que se pueden presentar, tales como: Flotas Heterogéneas (HF, *Heterogeneous Fleet VRP*), Ventanas de Tiempo (*VRP Time Windows, TW*), Multi Depósitos (MD, *Multiple Depots VRP*), Capacidad del vehículo (C, *Capacited VRP*), Entregas Divididas (SD, *Split Delivey VRP*), Tiempos Estocásticos (S, *Stochastic VRP*), Recogida y Entrega (*VRP Pickup and Delivery PD*), Periodicidad (P, *Periodic VRP*), entre otras divisiones, cada una trabajada por diversos autores quienes realizaron valiosos aportes a la literatura y problemas reales.

Según Montoya, López, Nieto, Felizzola & Herazo, (2015), entre los principales autores que desarrollaron trabajos en las variantes más comunes del VRP, se encuentran en la siguiente tabla. (Tabla 1).

Tabla 1

Principales autores de las variantes comunes del VRP

HF, Heterogéneos Fleet VRP (HFVRP)	C, Capacited VRP (CVRP)	TW, Time Windows VRP (VRPTW)	PD, Pickup and Delivery (VRPPD)	D, Dynamic VRP (DVRP)	P, Periodic VRP (PVRP)	MD, Multiple Depots VRP (MDVRP)	S, Stochastic VRP (SVRP)
Baldacci, Toth, & Vigo (2007)	Laporte & Nobert (1987) Toth & Vigo (2002)	Solomon & Desrosiers (1988)	Wilson, Sussman, Wang & Higonnet (1971)	Psaraftis (1995) Gendreau & Potvinm (1988)	Mourgaya & Vanderbec k (2006)	Renaud, Laporte, & Boctor (1996) Crevier, Cordeau, & Laporte (2007)	Laporte, Louveaux & Mercure (1992)

Nota: Principales autores de trabajos con variantes comunes del VRP. Adaptado de (Montoya-Torres, López, Nieto, Felizzola, & Herazo-Padilla, 2015).

Por otra parte, algunos autores iniciaron la inclusión de otra variante muy llamativa al VRP teniendo en cuenta las implicaciones medioambientales que generan las actividades de transporte; según Kramer, Subramanian, Vidal, & Cabral (2015), un primer autor en incluir al VRP variables ambientales fue Palmer (2007), en su trabajo doctoral cuya finalidad fue calcular las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2) teniendo en cuenta el tiempo y trayecto recorrido del vehículo.

Esta nueva variante se enmarca dentro de la denominada logística verde o Green Logistic, la cual tiene como principales actividades medir el consumo de energía durante el transporte de productos y disminuirlo, al igual que las contaminaciones de suelo, aire y agua para minimizar así el impacto ambiental, (Reyes, Zabala, & Gálvez, 2008).

A esta tendencia, se suma el trabajo sobre *Energy Minimizing Vehicle Routing Problem* (EMVRP) de Kara, Kara, & Yetis (2007), pretendiendo la minimización de la energía en el trabajo total de los vehículos asignados mediante una nueva función de costo basado en la distancia recorrida y la carga del vehículo.

Para esta relación entre distancia recorrida y carga, se tiene en cuenta el peso inicial del vehículo (tara) y el consumo de combustible del por cada kilómetro recorrido, siendo necesario incluir la carga del vehículo como indicador adicional del costo, debido que son variables que no se pueden representar por la distancia entre dos nodos y además, que sus gastos no se pueden

asimilar como constantes (Kara *et al.*, 2007). En este sentido se trabaja bajo el enfoque que relaciona que al minimizar el trabajo realizado, se minimiza la energía en términos de consumo de combustible. Lo que conlleva a una reducción de los costos operativos y de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de los vehículos, (Bektas & Laporte, 2011).

Al establecer la carga del vehículo como una variable fundamental en el modelo, se analiza otra extensión del VRP, el CVRP, debido que la capacidad del vehículo al ser limitada, juega un papel fundamental en el proceso de acopio de la cadena de suministros, (González & González, 2006). Pero, con la minimización de energía se define una función de costos de viajar de un nodo a otro de manera más realista, teniendo en cuenta las implicaciones económicas y ambientales que genera los altos consumos de combustible, (Kara *et al.*, 2007).

4.6 Ruteo de vehículos con pickup and delivery

Tal como se mencionó anteriormente, el VRP por su riqueza y complejidad, presenta un gran número de variantes que emergen al tratar de aterrizar el problema a contextos reales. Pero para poder hablar de las variantes en específico, es necesario conocer los primeros aportes y sus autores antes de las primeras propuestas del VRPPD.

En este sentido, se puede identificar como un primer aporte a la literatura del VRP, el trabajo de Dantzig, Fulkerson & Jhonson (1954), quienes realizaron un método de solución para un TPS (Travelling Salesman Problem) de gran escala. De igual modo, Clarke & Wright (1964), quienes incorporaron más de un vehículo en su trabajo, generando así el VRP tal como se conoce hoy, (Eksioglu, Volkan, & Reisman, 2009).

Posterior a esto, se realizaron diversos trabajos en torno a esta temática robusteciendo poco a poco el objetivo para ofrecer mejores soluciones. (Tabla 2).

Autores como Golden, Magnanti & Nguyan (1972), fueron uno de los primeros en publicar un trabajo con la frase “Vehicle Routing”, en el cual desarrollaron algoritmos heurísticos de ruteo de vehículos modificados y ampliados comparados con las técnicas de Clarke & Wright, para solucionar problemas que afectan a cientos de puntos de demanda de una manera más rápida.

Tabla 2
Principales aportes al VRP antes del VRPPD

Solution of a large-scale travelling salesman problem	Danzing, Fulkerson & Jhonson (1954)	Se determinó el camino más corto para recorrer 49 ciudades en 48 estados de USA.
The truck dispatching problem	Dantzig & Ramser (1959)	Se asignan vehículos a cada estación de servicio de tal manera que se pueda cumplir la demanda de gasolina con un mínimo recorrido en distancia.
Scheduling of vehicles from a depot to a number of delivery points	Clarke & Wright (1964)	Se hallaron las rutas óptimas para que una flota de camiones de diferentes capacidades partiera de un punto central a diferentes puntos de entrega

Años 50s y

A sequential deletion algorithm for the design of optimal transportation networks	O'Connor & De Wald (1970)	Desarrolló un algoritmo para hallar las rutas óptimas en una red de transporte
Routing for public service vehicles	Marks & Stricker (1970)	Desarrolló un algoritmo basado en el problema del cartero chino para solucionar un problema de ruteo para un vehículo quita
Distribution management: Mathematical modelling and practical analysis	Eilon, Watson-Gandy & Christofides (1971)	Describe diferentes tipos de enfoques del VRP, evalúa su utilidad relativa para problemas prácticos y proporciona algunas pistas en cuanto a qué tipo de soluciones son
Scheduling algorithms for dial-a-ride systems	Wilson, Sussman Wang & Higonnet (1971)	Solucionó un problema VRPPD para una ruta de autobuses como un procedimiento de búsqueda dinámica

Inicios de los 70s

Nota: Principales trabajos y autores del VRP en la literatura hasta el VRPPD (Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery). Adaptado de (Eksioglu, Volkan, & Reisman, 2009).

El VRP a lo largo del tiempo ha ido aumentando su complejidad para tratar de dar soluciones a problemas reales dentro de la cadena de suministros; uno de estos problemas es cuando el vehículo debe recoger productos (Pickup), pero además, debe hacer entregas (Delivery) en la misma ruta, lo que genera una variante del VRP denominada Pickup and Delivery (VRPPD).

Esta variante, pretende satisfacer un conjunto de solicitudes de transporte enmarcadas en una o varias rutas dentro de una cadena, las cuales se definen por puntos de recogidas, puntos de entregas y una demanda establecida para ser transportada entre estos puntos, ya sea bienes o personas, (Desaulniers, Desrosiers, Erdmann, Solomon, & Soumis, 2000); si el transporte es direccionado a personas, se denomina *dial-a-ride*.

Bajo este último concepto se desarrollaron los primeros trabajos de esta variante, los cuales fueron iniciados por Wilson, Sussman, Wang, & Higonnet (1971), quienes formularon un problema en la ruta de uno de los autobuses, como un procedimiento de búsqueda dinámica, teniendo en cuenta el origen y destino de los pasajeros. Continuando con Wilson & Weissberg (1976) quienes se enfocaron en los algoritmos y los procedimientos de control realizados bajo el Proyecto CARS, cuyo propósito fue desarrollar procedimientos de control de línea-a-ride avanzadas, basadas en la experiencia adquirida en Haddonfield e investigar el problema del control de acceso telefónico a servicios a-ride integrada/fija.

Esta variante fue tomando fuerza gracias a diversos aportes y trabajos realizados durante los años 90, en donde Desrosiers, Dumas, & Soumis (1991) presentaron un algoritmo con el fin de resolver un problema de Pickup and Delivery para mercancías mediante un esquema de generación de columnas, dividiéndolo en subproblemas, para hallar una ruta más corta. Savelsbergh & Sol (1995), refuerzan esta variante evidenciando las características que la distinguen de otras variantes del VRP mediante un estudio de los tipos de problemas y métodos de solución que se encuentran en la literatura.

Gendreau, Laporte & Vigo (1999), diseñan dos heurísticas, una basada en solución exacta de un caso especial y la otra basada en búsqueda tabú para dar solución al problema del viajero con la particularidad de recogidas y entregas, generando así un Travel Salesman problem Pickup and Delivery (TSPPD).

Irnich (2000), trabajó en un modelo que además de tener pickup and delivery, agregaba otras variantes tales como ventanas de tiempo duras y multi-depósito con la particularidad de presentar un pequeño número de nodos. Este modelo se podía aplicar a varios problemas de la logística de transporte entre ellos el transporte público y estaciones de autobuses o trenes interurbanos.

Un trabajo de gran aporte a esta variante fue el de Nagy & Salhi (2005), quienes desarrollaron una serie de heurísticas que permitían infactibilidades mientras se guiaba la búsqueda hacia una fuerte viabilidad capaz de resolver los modelos VRPPD multi-depósitos. Asimismo, caracterizó el Pickup and Delivery en tres categorías: Pickups and Deliveries simultáneos, Pickups and Deliveries Mixtos y Pickups después de los Deliveries (Delivery-first, pickup-second). (Figura 9).

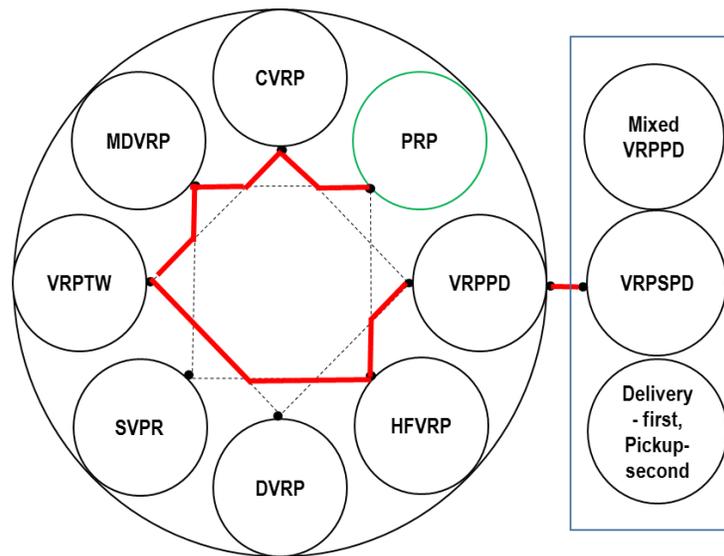


Figura 9. Representación Gráfica de la ruta del VRP Pickup and Delivery Simultáneo, Capacitado, con Flota Heterogénea, Multi-Depósito, Ventanas de Tiempo y Emisiones (G-MDHFVRPSPDTW). Fuente: Construcción propia a partir de (González & González, 2006).

4.6.1 VRP con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD)

Con el avance de la tecnología y teniendo pleno conocimiento acerca del impacto ambiental generado por los bienes que no reciben un tratamiento eficiente para su disposición final, y que en vez de ser desechados, podrían ser reutilizables, reciclados y/o reprocesados, para minimizar el impacto generado haciendo énfasis en la denominada logística inversa, (Reyes *et al.*, 2008). El Ruteo de Vehículos Pickup and Delivery Simultáneo, representa un papel fundamental dentro del proceso de transporte, cuyo objetivo es que los clientes pueden recibir un producto y devolver bienes al mismo tiempo, (Nagy *et al.* 2005).

Con esta variante, se establece que los bienes que serán reciclados, reutilizados o reprocesados, puedan ser recogidos y transportados en la dirección inversa, al mismo tiempo en que se entreguen otros bienes al cliente. Ejemplo de esto, se evidencia en el trabajo de Dethloff (2001), quien elaboró un modelo matemático resuelto mediante una heurística de inserción, para el VRP con entregas y recogidas simultáneas (VRPSPD), aplicado a un problema de la vida real.

Según Tang & Diéguez (2002), existen pocos aportes en la literatura que consideran problemas de VRPSPD. Lo que se mantiene a la fecha en comparación con los aportes realizados por autores a las demás categorías del VRP.

Luego de los aportes de Nagy *et al.* (2005), uno de los primeros autores que utilizaron metaheurísticas para solucionar un VRPSPD fue Crispim & Branda (2005), quienes diseñaron un algoritmo híbrido basado en búsqueda tabú (TS) y Búsqueda de Vecindarios (VNS), (Aravind, Deepak, & Brijesh, 2014).

Asimismo, un aporte importante al VRPSPD fue el de Gajpal & Abad (2009), quienes resolvieron el modelo a través de otra metaheurística, la cual fue un Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas empleando la heurística del vecino más cercano para generar las soluciones iniciales.

Wang & Chen (2012), trabajaron un modelo VRPSPDTW que buscaba minimizar el costo de despacho y de viaje total de los vehículos, empleando como método de solución un Algoritmo Genético. Los autores tuvieron en cuenta la importancia del tiempo en la determinación para la toma de decisiones rápidas por parte de las administraciones, por lo que le agregó la variante de Ventanas de Tempo al modelo, orientándolo un poco más al contexto real.

Por otra parte, Kececi, Altiparmak & Kara (2014), desarrollaron un modelo VRPSPD, agregando la variante de Flota Heterogénea (HVRPSPD), el cual fue resuelto a través de un Algoritmo Híbrido, compuesto por un Recocido Simulado y una Búsqueda Local, siendo computacionalmente eficiente para encontrar soluciones de buena calidad.

Li, Pardalos, Sun, Pei & Zhang (2015), incluyeron la variante de Multidepósito al VRPSPD (MDVRPSPD), debido que es un problema frecuente en los escenarios de la vida real de la logística del transporte, pero que había recibido poca atención hasta la fecha. La solución fue obtenida a través de un Algoritmo Híbrido con base en Búsqueda Local y el Método de Barrido.

El modelo VRPSPD es considerado como un problema NP-hard, (Nagy *et al.* 2005; Gajpal & Abad, 2009), que requiere un mayor tiempo y esfuerzo computacional para poder ser resuelto y que aumenta exponencialmente teniendo en cuenta el número de nodos que se visitan, (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009).

4.6.2 VRPSPD con minimización de energía y dióxido de carbono CO₂

El problema de la contaminación ambiental ha tenido una gran trascendencia en los problemas de VRP debido que, las emisiones de CO₂ de los vehículos pueden generar problemas en la salud de las personas directamente y también de forma indirecta, a causa del impacto degenerativo que se produce en la capa de ozono, (Bektas & Laporte, 2011).

En este sentido, el VRPSPD aplicado en la logística verde que busca la minimización de impactos ambientales, (Reyes *et al.*, 2008), también puede pretender la minimización de las emisiones de contaminantes (polución). Con lo cual, se obtiene una herramienta que permita establecer rutas más amigables con el ambiente sin escarificar mucho en la distancia total y costos de viaje, (Huang, Shi, & Zhao, 2012).

Uno de los trabajos más importantes del VRP verde, fue el de Bektas & Laporte (2011) denominado: “The Pollution Routing Problem (PRP)”, en el cual se amplió el objetivo del VRP en función no solo de la distancia de viaje, sino también por la cantidad de emisiones, combustible, tiempos de viaje y los costos relacionados.

En 2012, Huang, Shi, & Zhao desarrollaron un modelo de VRPSPD verde (g-VRPSPD) que buscaba minimizar los costos por emisiones de CO₂ debido a la importancia que requería la disminución de las emisiones en el transporte en China. Este trabajo consideró una flota de vehículos homogénea y un solo depósito.

Por otra parte, Tajik, Tavakkoli-Moghaddam, Vahdani & Mousavi (2014), desarrollaron un modelo de VRPPD con ventanas de tiempo (TWPDPRP) que presenta un nuevo enfoque de programación lineal entera mixta (MILP) bajo incertidumbre, considerando la minimización de la distancia, el número de vehículos y los costos de las emisiones y consumo de combustible.

Esta variante verde, se ha convertido en casi una obligación para las industrias, de tal forma que en 2016 se firmó el histórico acuerdo para combatir el calentamiento global con una

participación de 175 países, que pretenden disminuir el uso de energías fósiles y emisores de gases de efecto invernadero. Lo que direcciona a que los nuevos modelos de VRP incluyan en sus objetivos, la reducción de contaminación, (Ballesteros & Zuluaga, 2016).

4.6.3 Métodos de Solución para Ruteo de Vehículos con Pickup and Delivery

Para la solución de problemas de VRP en general, se utilizan métodos exactos o métodos aproximados. Los métodos exactos generan soluciones factibles (enteras), y los aproximados generan soluciones buenas, pero que no aseguran la optimalidad, (Lüer *et al.* 2009). (Figura 10).

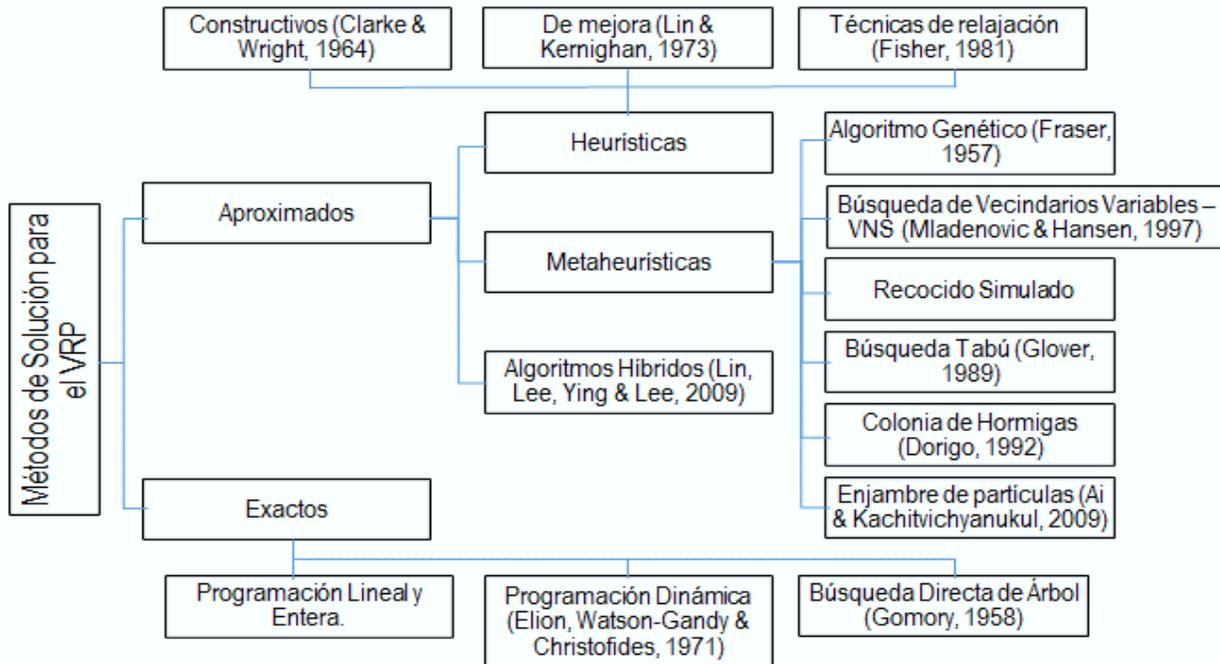


Figura 10. Métodos de solución para el VRP. Fuente: Adaptado de (Laporte, 1991; Lüer et al. 2009; Rocha, González, & Orjuela, 2011).

Para la solución de problemas de VRPSPD, se aplicaron diferentes metodologías, entre ellas heurísticas constructivas utilizadas por Dethloff (2001) y heurísticas de inserción utilizadas por Nagy *et al.* (2005).

Posteriormente a ello, se inició la implementación de metaheurísticas de acuerdo a la complejidad de los modelos. Estas metodologías de solución con métodos aproximados, se ha mantenido tal como se evidencia en la siguiente tabla. (Tabla 3).

En este sentido, los métodos aproximados que se han utilizado con mayor frecuencia para la solución de problemas de ruta VRPSPD son los métodos híbridos, los cuales son una combinación de aspectos de varias heurísticas, metaheurísticas o algoritmos exactos para obtener lo mejor de ellos, (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009). Estas estrategias se proponen cada vez más, debido que suelen dar buenos resultados al ser capaces de explotar simultáneamente las ventajas de ambos tipos de métodos, (Jourdan, Basseur, & Talbi, 2009).

Tabla 3
Metodologías de solución para el VRPSPD

AUTOR (ES)	AÑO	METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN		MODELO
		EXACTOS	APROXIMADOS	
Dethloff	2001		Heurística	VRPSPD
Nagy & Salhi	2005		Heurística	VRPSPD
Crispim & Brandao	2005		Algoritmo Híbrido	VRPSPD
Dell'Amico, Righini, & Salani	2006		Algoritmo de Generación de Columnas	VRPSDC
Gajpal & Abad	2009		Colonia de Hormigas	VRPSPD
Sombuntham & Kachitvichyanukul	2010		Enjambre de partículas	VRPSPDTW
Goksal, Karaoglan & Altiparmak	2012		Enjambre de partículas	VRPSPD
Tasan & Mituo	2012		Algoritmo Genético	VRPSPD
Wang & Chen	2012		Algoritmo Genético	VRPSPDTW
Huang, Shi, & Zhao	2012	Solver Xpress - MP		g-VRPSPD
Subramanian, Uchoa & Satoru	2013		Algoritmo Híbrido	VRPSPD
Liu, Xie, Augusto, & Rodríguez	2013		Algoritmo Genético y Búsqueda Tabú	VRPSPDTW
Kececi, Altiparmak, & Kara	2014		Algoritmo Híbrido	HVRPSPD
Acvi & Topaloglu	2015		Recocido Simulado	VRPSPD
Polat, Kalayci, Kulak, & Günther	2015		Búsqueda de Vecindarios	VRPSPDTL
Li, Pardalos, Sun, Pei, & Zhang	2015		Algoritmo Híbrido	MDVRPSPD
Wang, Mu, Zhao, & Sutherland	2015		Recocido Simulado	VRPSPDTW
Yu & We-qin	2015		Colonia de Hormigas	HVRPSPD
Acvi & Topaloglu	2016		Algoritmo Híbrido	HVRPSPD

Nota: Métodos de solución para el VRPSPD. Construcción propia a partir de (Aravind, Deepak, & Brijesh, 2014) y (Acvi & Topaloglu, 2016).

4.6.4 Modelos multi-objetivos

Los problemas de optimización pueden estar direccionados a la búsqueda de una solución o conjunto de soluciones que satisfagan la minimización o maximización de un objetivo. Cuando es un solo objetivo el que se optimiza, se denomina mono-objetivo, pero cuando hay más de un objetivo en un mismo problema los cuales pueden tender a minimizar, maximizar y haber combinaciones de minimización de unos y maximización de otros según sea el problema estudiado, este tipo de problema se denomina multi-objetivo, (Mendoza, 2010).

En este sentido, al haber varios objetivos que pueden estar en conflicto entre sí, puede existir un conjunto de soluciones denominadas óptimos de pareto o soluciones no-dominadas o pareto-eficientes, sobre la cual el investigador debe hacer la selección de “*la mejor solución*” a su criterio, (Coello, 2006; Mendoza, 2010). Dado que todo el conjunto de soluciones encontradas son buenas, en al menos un objetivo, pero que al mejorar uno de los objetivos de la función, puede conllevar al empeoramiento de otro, (Cristóbal, Guillén-Gosálbez, Jiménez, & Irabien, 2012).

La representación matemática de esta función se es de la siguiente manera:

$$\min x = \{f_1(x), f_2(x) \dots f_p(x)\} \quad p \geq 2$$

s. t.

$$h(x)[h_1(x), h_2(x) \dots h_p(x)] = 0$$

$$g(x)[g_1(x), g_2(x) \dots g_p(x)] \geq 0$$

donde $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad \forall i = 1, 2, \dots, p$

$$f: X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$$

$$h_i, g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

Siendo $x \in X$ el vector de las variables de decisión y $f_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad \forall i = 1, 2, \dots, p$ son las funciones objetivo.

En este tipo de problemas se deben emplear métodos de mayor complejidad para poder obtener soluciones, y las soluciones pueden representarse en una gráfica siendo cada eje, una función objetivo. (Figura 11).

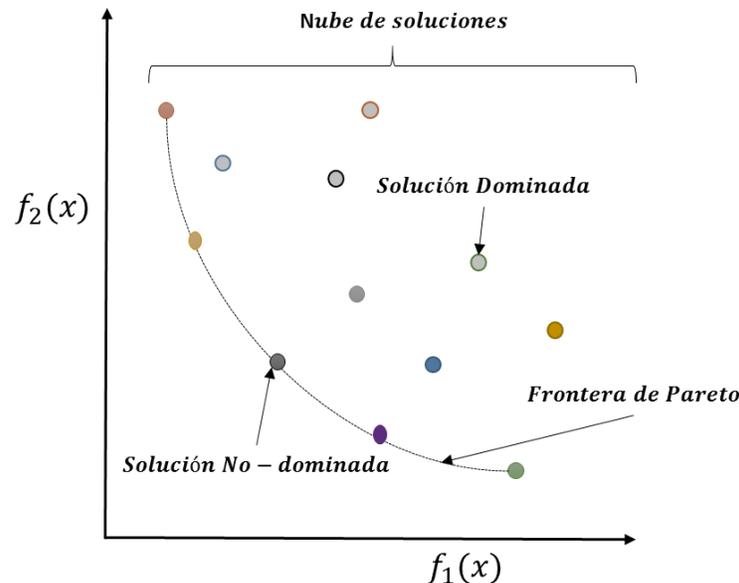


Figura 11. Representación gráfica de un problema multiobjetivo de minimización. Fuente: construcción propia.

La línea denominada frontera de pareto puede presentar forma lineal, cóncava, convexa, continua o discontinua y esto, va a depender del comportamiento de los resultados de los objetivos que se estén optimizando, (Aranda & Orjuela, 2015).

4.6.4.1 Técnicas de solución para modelos de VRP multi-objetivos

Existen varios métodos para solucionar los modelos que consideran más de un objetivo a la vez, la escogencia del método dependerá del modelo y el comportamiento de las funciones objetivo de éste. Tales métodos pueden dividirse en tres grupos: los que utilizan técnicas de agregación de los objetivos, los que consideran los objetivos separadamente y los basados en la dominancia de pareto, (Castro, 2001). Los métodos más habituales se pueden evidenciar en la siguiente tabla. (Tabla 4).

Tabla 4
Técnicas de optimización multiobjetivo

Tipología	Métodos
Métodos de agregación	Método de suma ponderada
	Min-Máx.
	ε - constraint
Métodos de no agregación, basados en Pareto	Programación por metas
	VEGA
Técnicas de enumeración	Lexicográfico
	Simple enumeración
Técnicas de búsqueda vecinal	Branch and Bound
	Recocido Simulado
Técnicas evolutivas	Búsqueda Tabú
	Estrategias Evolutivas
Métodos basados en Pareto	Algoritmos Genéticos
	No elitistas
	- MOGA
	- NSGA
	- NPGA
	Elitistas
	- SPEA
	- PAES
	- PESA
	- NSGA II
- MICRO-GA	

Nota: Resumen de las técnicas de optimización aplicadas a modelos multiobjetivo. Tomado de (Mendoza, 2010).

4.6.4.2 Dominancia de pareto

El concepto de la dominancia de pareto es una de las técnicas utilizadas en los problemas de VRP multiobjetivo, dado que permite realizar una comparación de todo un conjunto de soluciones entre sí, considerando dos o más objetivos de manera simultánea, (Mendoza, 2010).

En la figura 10, se puede observar una frontera de pareto para un caso de minimización teniendo en cuenta dos objetivos (este tipo de funciones se denominan bi-objetivo), en donde se hace posible evidenciar las soluciones que se denominan *dominadas* y otras que se denominan *no-dominadas*.

Según Deb (1999), para que se evidencie el principio de dominancia entre dos soluciones $x(1)$ y $x(2)$, (para el caso de que $x(1)$ domine a $x(2)$), se deben cumplir de que el resultado alcanzado por $x(2)$ no sea mejor en ninguno de los objetivos f_i , que los dados por $x(1)$. Adicionalmente, $x(1)$ es mejor que $x(2)$ en al menos uno de los objetivos (Mendoza, 2010).

La representación de la dominancia de pareto está dada por los símbolos ($<$, $>$ y \sim) de la siguiente manera:

- ✓ $x(1) < x(2)$ La función objetivo 1 es dominada por la función objetivo 2.
- ✓ $x(1) > x(2)$ La función objetivo 1 dominada a la función objetivo 2.
- ✓ $x(1) \sim x(2)$ ninguna función domina a la otra.

4.6.5 Método de sumas ponderadas

El método de sumas o pesos ponderados permite convertir el modelo de multi-objetivo a mono-objetivo, dándole unos coeficientes (pesos) a cada objetivo, lo cuales se irán variando paramétricamente para ir encontrando un conjunto de soluciones, de las cuales el investigador o decisor podrá analizar y seleccionar a juicio, la mejor solución para el problema, (Marler & Arora, 2010).

Este método se puede representar matemáticamente de la siguiente forma, (Mendoza, 2010):

$$\min_x f_{sum} = \sum_{i=1}^n w_i * f_x(x)$$

$$x \in X$$

$$\text{donde } w_i \geq 0 \text{ y } \sum_{i=0}^n w_i = 1$$

Por lo que se tiene que: f_x es el conjunto de funciones objetivos y w_i es el peso ponderado que se le asigna a cada función.

La toma de decisión de la solución obtenida con este método, se puede realizar a priori o a posteriori, en donde la primera es la decidida por preferencia del investigador según los objetivos que incluye en su función. La segunda, permite una variación paramétrica de los pesos combinada con algoritmos de optimización, es decir, se obtiene un conjunto de soluciones con la variación de los pesos de cada objetivo y posteriormente otro algoritmo ayuda a calcular la solución denominada óptima, (Torres, 2015).

5. Capítulo II: Caracterización de la red de aprovisionamiento de la leche cruda dentro de la cadena de suministros lácteos del departamento de sucre

5.1 Generalidades del Departamento de Sucre

El departamento de Sucre hace parte de la Región Caribe Colombiana, conformada además por los departamentos de Atlántico, Bolívar, Cesar, Córdoba, La Guajira y Magdalena. Esta región, aportó a 2012 un 14,9% del PIB nacional, el 21,36% de la población total colombiana y generó a 2013 el 23% de las exportaciones del país, (FUNDESARROLLO, 2014); para el año 2014 Sucre aportó el 0,80% del PIB nacional, (DANE, 2015).

Está dividido en cinco (5) subregiones: Golfo de Morrosquillo, Sabanas, Montes de María, San Jorge y La Mojana, a las que corresponden una división administrativa de veintiséis (26) municipios que presentan doscientos treinta y cuatro (234) corregimientos. Tales municipios son: San Marcos, Caimito, La Unión, San Benito Abad, Majagual, Sucre, Guaranda, Corozal, San Luis de Sincé, Galeras, Santiago de Tolú, Tolviejo, Coveñas, San Antonio de Palmito, Morroa, San pedro, Buenavista, San Onofre, Ovejas, Chalán, Colosó, Sincelejo, Sampués, Los Palmitos, El Roble y San Juan de Betulia. (Figura 12).

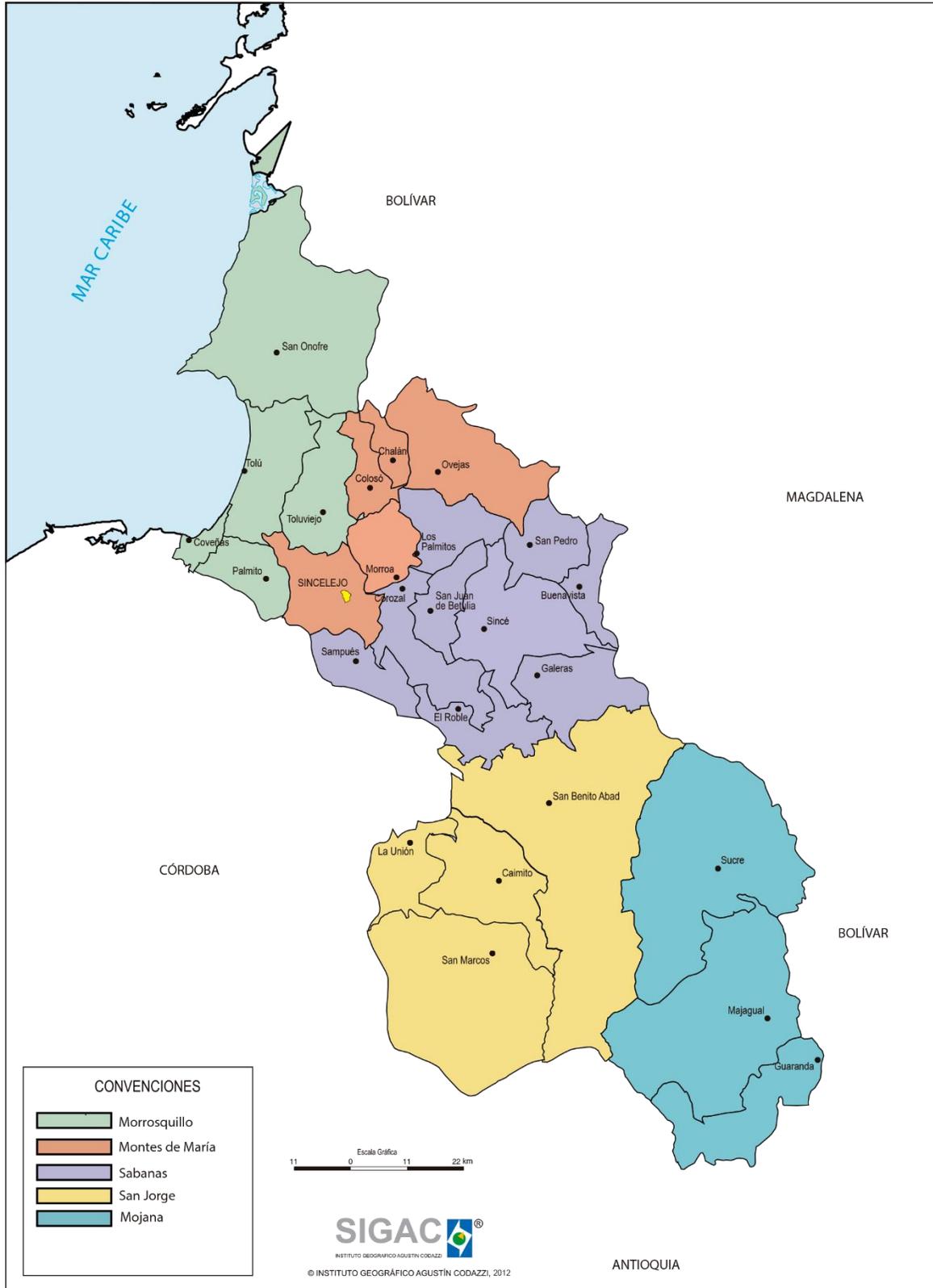


Figura 12. Mapa Político del Departamento de Sucre. Fuente: adaptado a partir de SIGAC, 2012.

5.2 Aspectos económicos

El entorno económico del departamento de Sucre ha tenido en los últimos años un comportamiento un tanto irregular con respecto al nacional. (Figura 13.) La actividad económica del Departamento de Sucre se basa en la producción agropecuaria, con poco valor agregado y orientada al mercado interno, (Gaceta Departamental de Sucre, 2010). Lo que repercute en ser una de las economías más pobres del país, ocupando el lugar número 23 de los 32 departamentos de Colombia según las cifras del DANE 2013, (Ministerio de Trabajo, 2014).

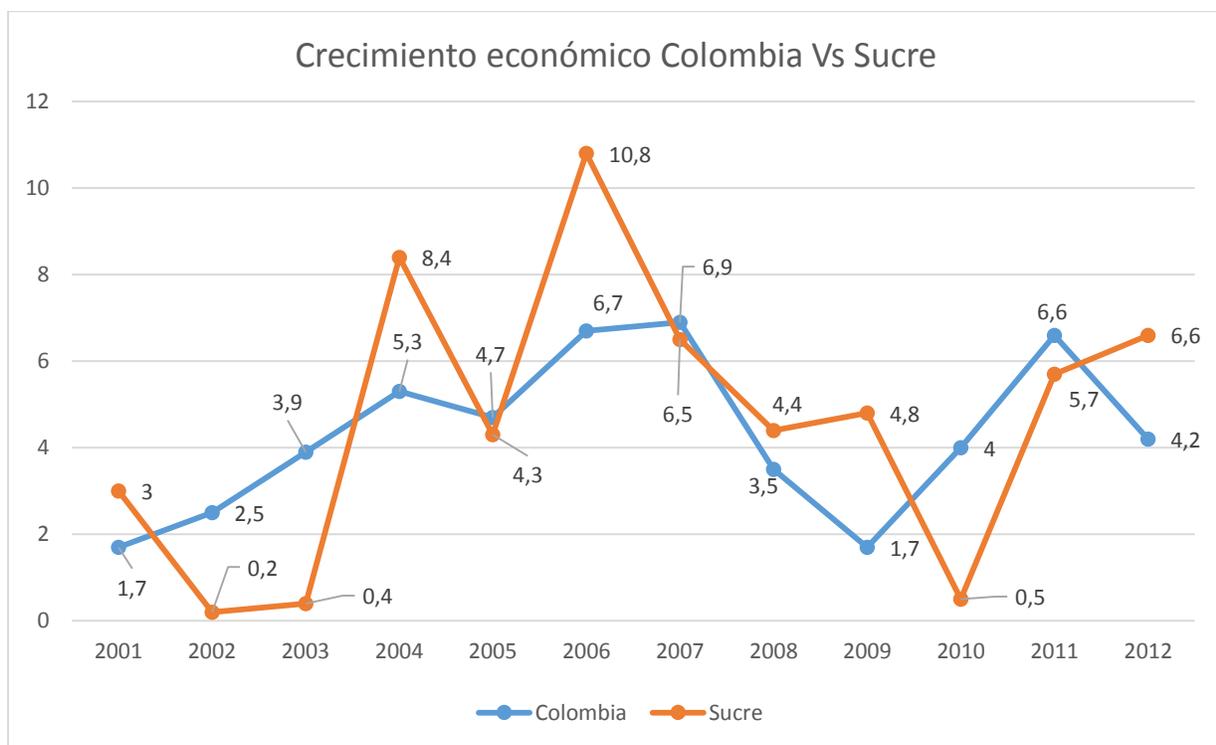


Figura 13. Tasa de crecimiento económico de Colombia y Sucre años 2001 – 2011. Fuente: DANE, cuentas departamentales 2013.

El aporte del PIB del departamento frente al nacional fue de 0,78% en el año 2015. En relación a las ramas de actividad económica, la mayor participación dentro del PIB departamental al segundo trimestre de 2016 son los servicios sociales, comunales y personales con el 33,5%, seguido del agropecuario con el 10,8% y en último lugar el de minas y canteras con el 1%, (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2016). (Figura 14).

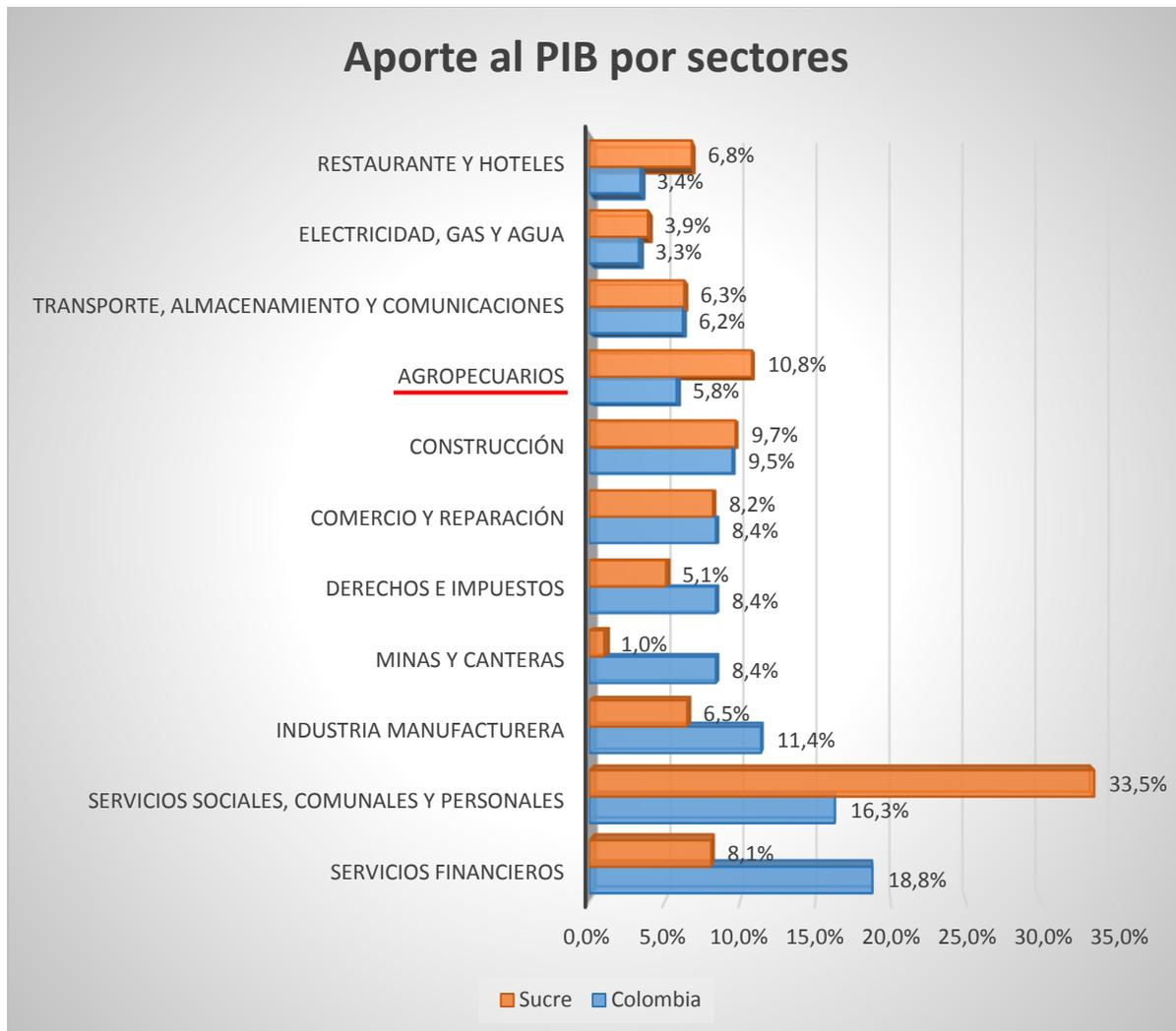


Figura 14. Aportes al PIB por ramas de actividad económica. Comparación Sucre – Colombia, 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de DANE, cuentas Departamentales.

A pesar de la buena ubicación geográfica y la gran vocación agropecuaria del departamento de Sucre, esta actividad ha mostrado una disminución en el total de su producción en los últimos años, pasando de representar el 16,44% del PIB en 2006 a ser el 13,3% en 2013, (FUNDESARROLLO, 2014), y al segundo trimestre del 2016, ha seguido disminuyendo representando un 10,8%; entre el año 2006 a 2011 la actividad agropecuaria, creció en promedio 6,9%, a pesar que tuvo desviaciones fuertes, específicamente en 2010 la variación negativa de 14,4%, relacionado al impacto que tuvo la ola invernal de ese mismo año, (Ministerio de Trabajo, 2014).

Dentro del sector agropecuario, la actividad económica más importante para el departamento de Sucre es la ganadera, la cual ocupa el primer lugar, reflejado por la incidencia en la distribución de los usos del suelo aptos para la actividad agrícola, pero utilizados en la explotación de ganado. (Figura 15).

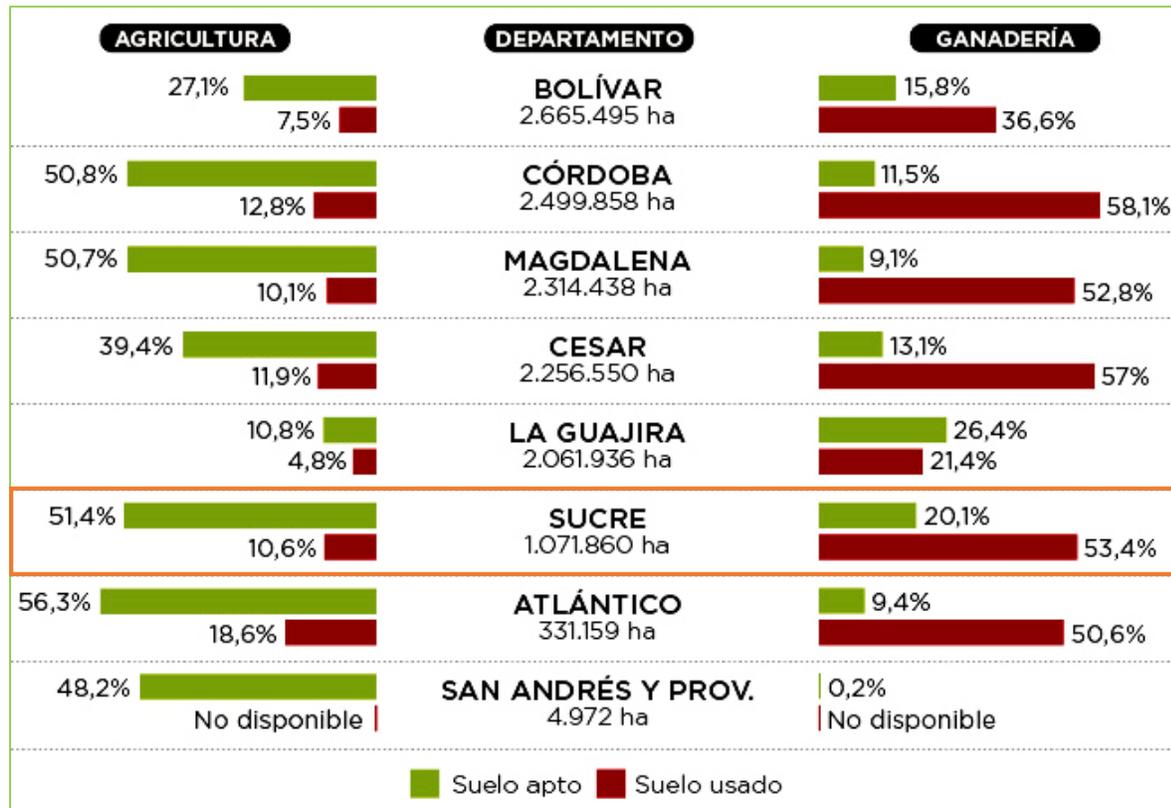


Figura 15. Conflicto del uso del suelo rural. Fuente: Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. Corporación PBA.

5.3 Sector ganadero del Departamento de Sucre

La actividad ganadera como renglón más importante del sector agropecuario de Sucre, se caracteriza por ser de tipo extensivo, por tener una escasa preparación tecnológica, un bajo nivel empresarial y baja productividad; la producción lechera proviene de ganado bovino, bufalino, entre otros, pero a pesar de la similitud de apariencia y estructura fisicoquímica del producto, independiente del tipo de animal, sus componentes poseen niveles de concentración nutricional diferentes. La explotación principal en Sucre, proviene del ganado bovino, (Jaramillo & Areiza, 2012).

Para la obtención de éste producto, el sistema de producción predominante es el doble propósito (obtención de carne y leche), debido que, se ajusta a las condiciones territoriales de la región utilizando de forma intensiva los recursos abundantes que en este caso son las tierras de bajo valor y la mano de obra familiar, (Jaramillo & Areiza, 2012).

Según el Censo Pecuario Nacional - 2016, el departamento de Sucre reporta 862.008 cabezas de ganado, que producen aproximadamente 170.994.379 litros de leche/año, (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2016). En donde, el 72% de la leche ordeñada es vendida, pero de ésta, sólo el 34% se vende directamente a la industria y el 66% a intermediarios y otros mercados informales, (Red Nacional de Agencias de Desarrollo Local, 2013). Cabe resaltar que el 66,2% del total de cabezas de ganado registradas, son dedicadas al sistema doble propósito, lo que ratifica que este sistema es el más utilizado, por encima de la producción de carne la cual representa el 32,4% del total de bovinos, y aún más por encima de la producción especializada de leche con ganados de raza, la cual registra solo el 1,4% del total de cabezas de ganado, (Red Nacional de Agencias de Desarrollo Local, 2013).

En ese sentido, Sucre ubicado el Caribe Húmedo según la división de macrocuencas lecheras establecidas por el Consejo Nacional Lácteo (CNL), acompañado por los departamentos de Córdoba y Bolívar, (Figura 16). A primer semestre de 2016, representaba cerca del 3,79% del total de cabezas de ganado nacional (22.689.420 reses en Colombia) y corresponde a la posición 12 del país. (Figura 17). Además, estos últimos 3 años, el hato ganadero de Sucre ha venido creciendo, al igual que los predios dedicados a la ganadería, (Gobernación de Sucre, 2016).

En lo correspondiente a la estacionalidad, Colombia presenta dos periodos, el verano y el invierno. Estos periodos afectan de manera diferente a cada una de las regiones, pero en general los primeros cuatro meses del año con la disminución del nivel de lluvias desde finales del año anterior genera un bajo volumen de producción de leche debido a la escasez de pastos, (Jaramillo & Areiza, 2012); una de las regiones más marcadas por estos procesos climáticos, es la macrocuenca del Caribe Húmedo, a la cual pertenece Sucre, en donde, la estacionalidad ocasiona una disminución en la cantidad y calidad de los pastos afectando la disponibilidad de nutrientes, originando pérdida en el peso del ganado y por ende disminución de la producción de leche.

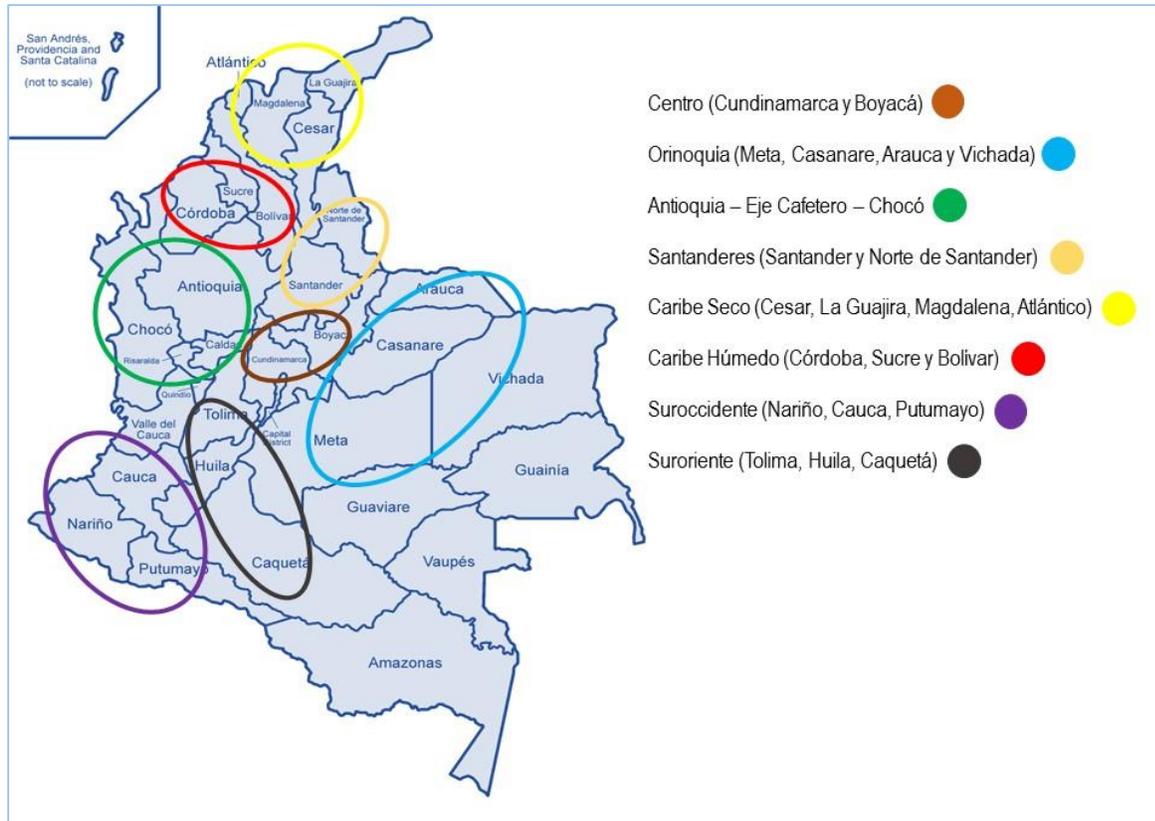


Figura 16. Macrocuencas o Regiones Lecheras de Colombia. Fuente: adaptado de (Jaramillo & Areiza, 2012), (Consejo Nacional Lácteo, 2011).



Figura 17. Número total de Bovinos por departamentos en Colombia, Censo Pecuario Nacional 2016. Fuente: adaptado de (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2016).

El número de bovinos del departamento varía en cada uno de sus 26 municipios. El 80,99% del total está concentrado en 14 municipios, siendo el municipio de Sucre el cual ostenta el mayor número con una cifra de 88.526 cabezas de ganado que representa el 10,27% del departamento. Seguido a éste, San marcos con 80.597 (9,35%), San Onofre con 77.887 (9,04%), Majagual con 73.530 (8,53%), San Benito Abad con 72.732 (8,44%), San Luis de Sincé con 63.334 (7,35%) y por último lugar en los 26 municipios, Chalan con tan solo 2.157 cabezas de ganado que representan solo un 0,25% del total departamental, (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2016). (Figura 18).

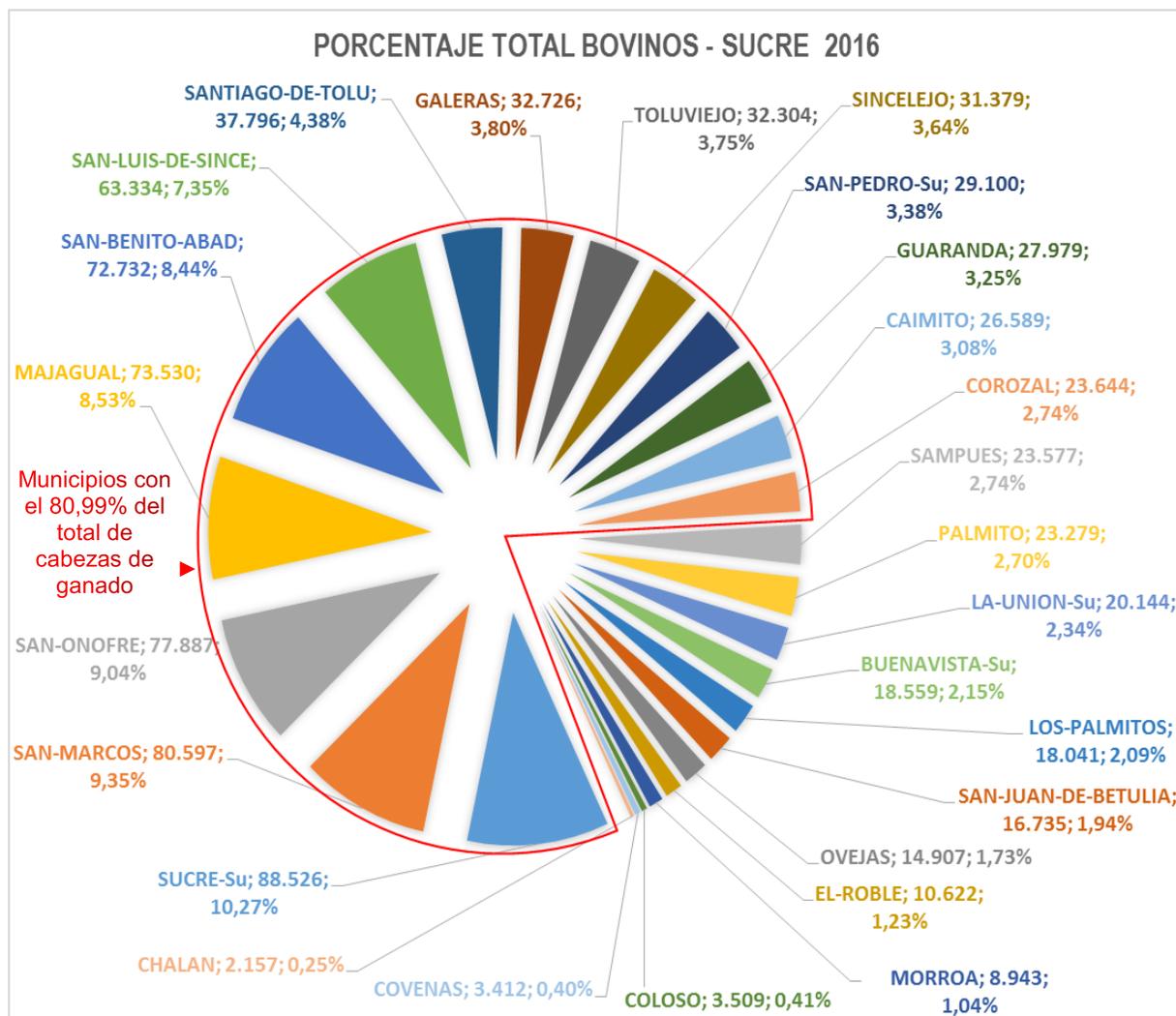


Figura 18. Porcentaje y número total de bovinos por municipios del departamento de Sucre. Fuente: Adaptado de (Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, 2016).

5.4 Producción de leche cruda

Tal como se mencionó anteriormente, el sistema predominante de producción lechera en Sucre es el doble propósito, el cual aporta el 99,63% del total de vacas en ordeño, muy por encima del tradicional y el especializado, los cuales aportan solo 0,24% y 0,13% respectivamente; el promedio de rendimiento de ordeño es de 2,7 litros por vaca al día. Cabe resaltar que el número total de cabezas de ganado a 2015 reportadas en ordeño es de 169.421, siendo el municipio de San Marcos quien aporta el mayor número de reses con una cifra de 18.171 correspondiente al 10,47% del departamento. Seguido a éste, están Sincé y Majagual con cifras de 15.814 (9,11%) y 15.500 (8,93%).

A pesar de que el municipio de Sucre presenta el mayor número de cabezas de ganado del departamento, se encuentra en el sexto puesto en cuanto al número de vacas en ordeño con un total de 9.800, que representa un 5,65% del total departamental; los municipios que se encuentran los últimos dos lugares son Chalan y Coveñas, con un total de 612 y 600 que representan el (0,353%) y (0,346%) respectivamente. (Figura 19).

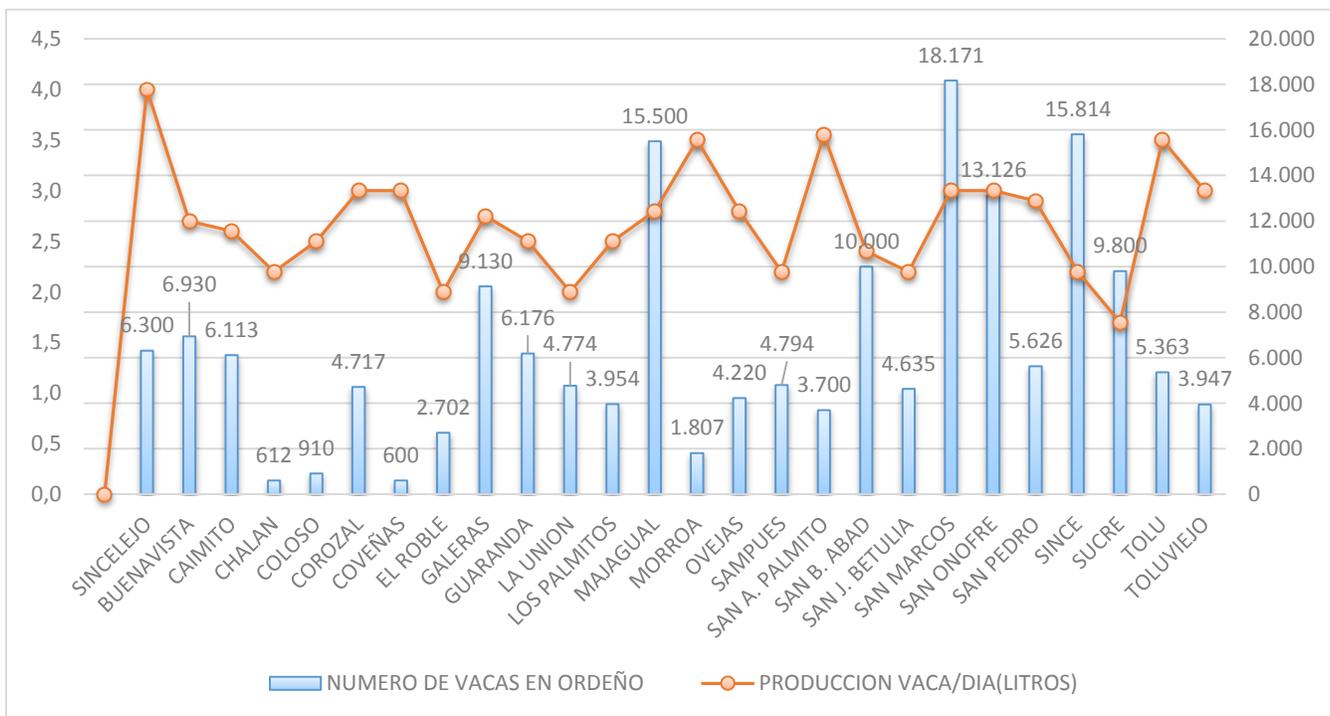


Figura 19. No de vacas en ordeño de Sucre a 2015 y promedio de producción lechera. Fuente: Secretaria de desarrollo económico y medio ambiente de Sucre

Según la Encuesta Nacional Agropecuaria – ENA 2014, Sucre ocupaba el puesto número 11 de los 32 departamentos del país y Bogotá, (DANE, 2015). (Figura 20).

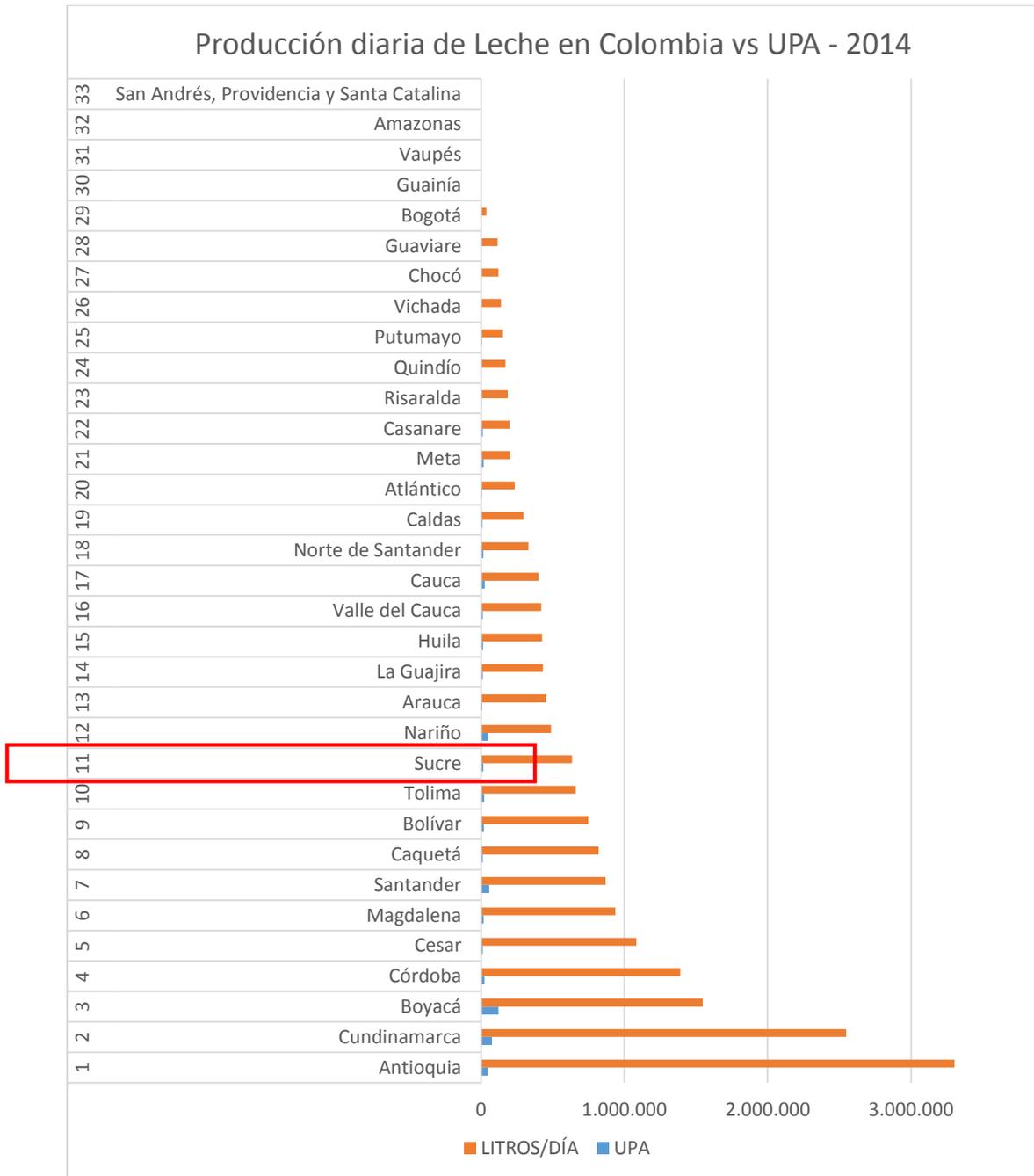


Figura 20. Producción diaria de leche y No de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) en Colombia. Fuente: adaptado a partir de DANE-ENA, 2014.

A 2015, entre los municipios más destacados por la producción de leche están: San Marcos, que es el mayor productor de los 26 municipios con 54.513 Lt/día y representa el 11,91% de la producción departamental. Majagual que produce 43.400 Lt/día con el 9,48%, San Onofre 39.378 Lt/día con el 8,60%, Sincé 34.791 Lt/día con el 7,602% y en último lugar está Chalán 1.346 Lt/día con el 0,294%. (Figura 21 y 22), (Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016).

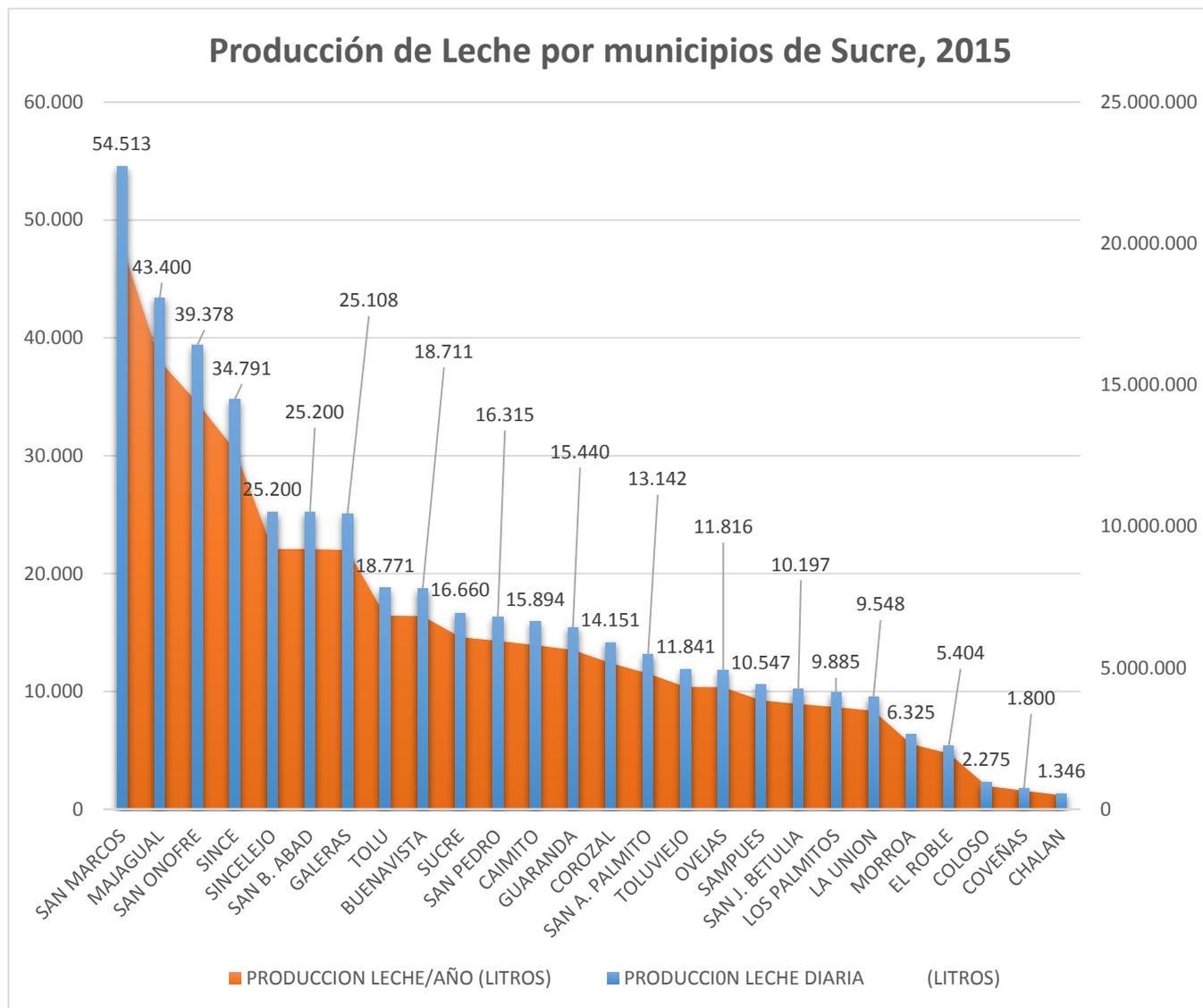


Figura 21. Producción de leche en litros diaria y anual por municipios del Departamento de Sucre, 2015. Fuente: Adaptado a partir de (Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016).

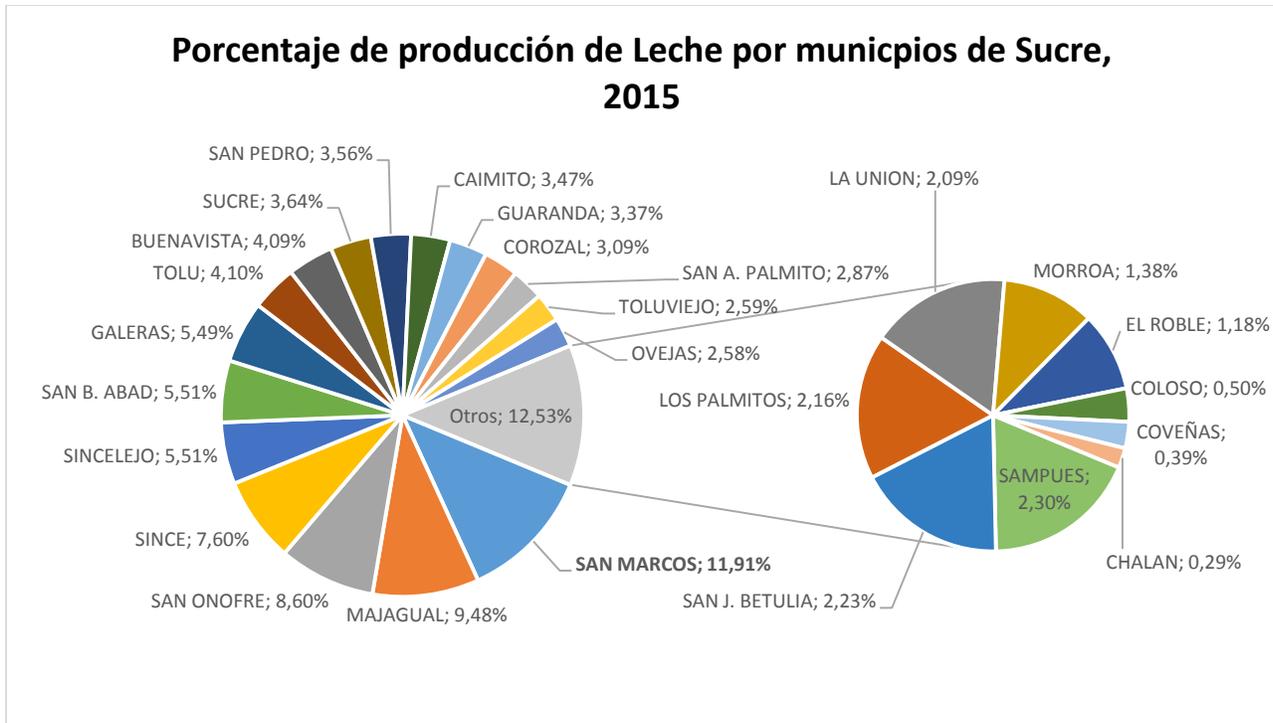


Figura 22. Porcentaje de producción de leche diaria por municipios del Departamento de Sucre, 2015. Fuente: Adaptado a partir de (Secretaría de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016).

5.4.1 Higiene y seguridad alimentaria de la leche

La leche es un producto altamente perecedero debido a las características de su composición, la cual puede sufrir contaminación de manera muy fácil, además de ser muy susceptible a los cambios de temperatura, (Castillo & Bermeo, 2013).

Al hablar sobre la calidad de la leche cruda, se debe hacer énfasis en dos aspectos: el carácter composicional y el higiénico-sanitario. En ese sentido, la calidad composicional está referida a los requisitos de “composición fisicoquímica” que debe cumplir la leche cruda y se evalúa mediante la medición del contenido de sólidos totales, grasa y proteína, parámetros que determinan su valor nutricional y su aptitud como materia prima para el procesamiento de derivados lácteos, además, de ayudar a determinar el precio de la misma, (Guzman, 2013; Martínez & Gómez, 2013).

En cuanto al carácter higiénico-sanitario, se determina con respecto al contenido microbiano de la leche, que por lo general se transfiere a través de los productores, del contacto con la ubre de

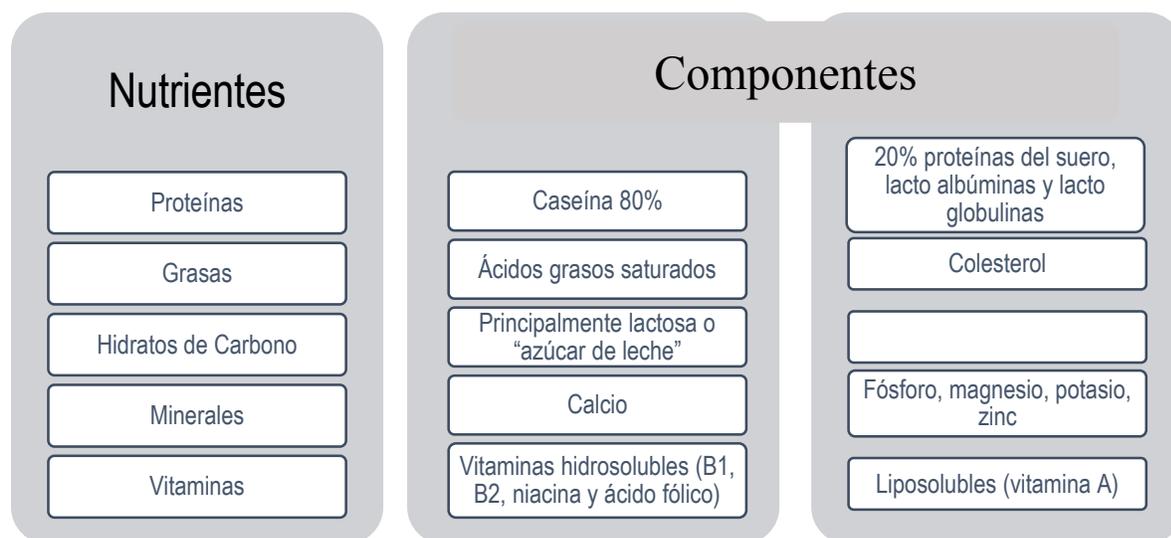
la vaca, a partir de las malas prácticas de desinfección de elementos y utensilios empleados en el ordeño, a través de la mala disposición y utensilios para el transporte, y así, a lo largo de la manipulación en toda la cadena si no se establecen las medidas necesarias para su buena preservación, (Kelly, Leitner, & Merin, 2011).

Gracias a sus características y aportes nutricionales, la leche es considerada como el alimento más completo e insustituible para el ser humano en el mundo, (FAO & FEPALE, 2012; Jaramillo & Areiza, 2012). (Tabla 5).

En el departamento de Sucre, gran proporción de la leche cruda recibida en las industrias lácteas, presenta alcohol y altos porcentajes de acidez, lo que es ocasionado por el crecimiento microbiano como consecuencia de la carencia de dispositivos para cadena de frío, los largos tiempos de transporte, el almacenamiento en recipientes inapropiados y la elevada temperatura ambiental que caracteriza al departamento y a la región caribe, (Martínez & Gómez, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario tener un énfasis en las medidas de protección alimentaria que permitan mantener una calidad del producto en lo largo de la cadena de abastecimiento y que este, conserve sus propiedades de acuerdo al uso industrial que será sometido, (Grocery Manufacturers Associations, 2005).

Tabla 5
Nutrientes y Componentes de la Leche



Fuente: GIE - Delegatura para la Protección de la Competencia – SIC basada en SAN (2013).

5.4.2 Condiciones de almacenamiento y transporte de la leche

El manejo del sistema de transporte es uno de los problemas más usuales de la cadena de suministros, debido a los inconvenientes que se presentan con respecto al estado de las rutas y su elección, manejos de tiempos, manejo de distancias, gestión de personal, problemas en el vehículo, recargas de combustible y demás aspectos de ruteo, (Castillo & Bermeo, 2013).

En el departamento de Sucre, el transporte de la leche presenta una serie de obstáculos debido al mal estado de las vías, lo que ha generado un delicado equilibrio entre productores y prestadores de servicios de transporte, puesto que el 80% de los servicios de transporte se realizan por el modo carretero afectando así los fletes y costos del transporte por el deterioro de los vehículos y la demora en la entrega de los productos, (Ministerio de transporte, 2010).

En este sentido el sistema de transporte de la leche se realiza a través de camiones, motos, hasta en vehículos de tracción animal, en recipientes inadecuados, difíciles de limpiar y desinfectar, por lo general de material plástico, incumpliendo con lo establecido en el Decreto 3075 de 1997 del ministerio de Salud de Colombia y atentando contra la calidad del producto (Olivero, Aguas, & Cury, 2011). (Apéndice A).

El transporte de la leche debe ser refrigerado a $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en cantinas o tanques diseñados para ese fin una vez obtenida en el ordeño y entregarse a los centros de acopio o empresas industriales en el menor tiempo posible, para poder garantizar la conservación e inocuidad del producto, (Ministerio de Salud y Protección Social, 2011).

5.5 Cadena de suministro de lácteos del Departamento de Sucre

La leche cruda es uno de los productos alimenticios más importantes, debido a sus grandes aportes nutricionales y a la gran variedad de subproductos que se pueden derivar de esta, tales como: leche pasteurizada, leche ultrapasteurizada, leche evaporada, leche condensada, leche en polvo, leche maternizada, leche instantánea, leches ácidas o fermentadas, queso, etc. constituyéndose como un bien de primera necesidad en la canasta familiar y la materia prima principal de la cadena láctea, (DANE, 2016).

La cadena de suministros de lácteos del departamento de Sucre, presenta una estructura de eslabones que inicia a partir de los proveedores de insumos, continúa con las granjas productoras o ganaderías donde se obtiene la leche, luego pasa a las unidades acopiadoras que en general son productoras de lácteos quienes realizan los procesos de transformación y sigue con la comercialización y distribución hasta los consumidores finales.

En este sentido, acorde a la cadena láctea nacional, la cadena de sucre sigue la siguiente línea. (Figura 23).

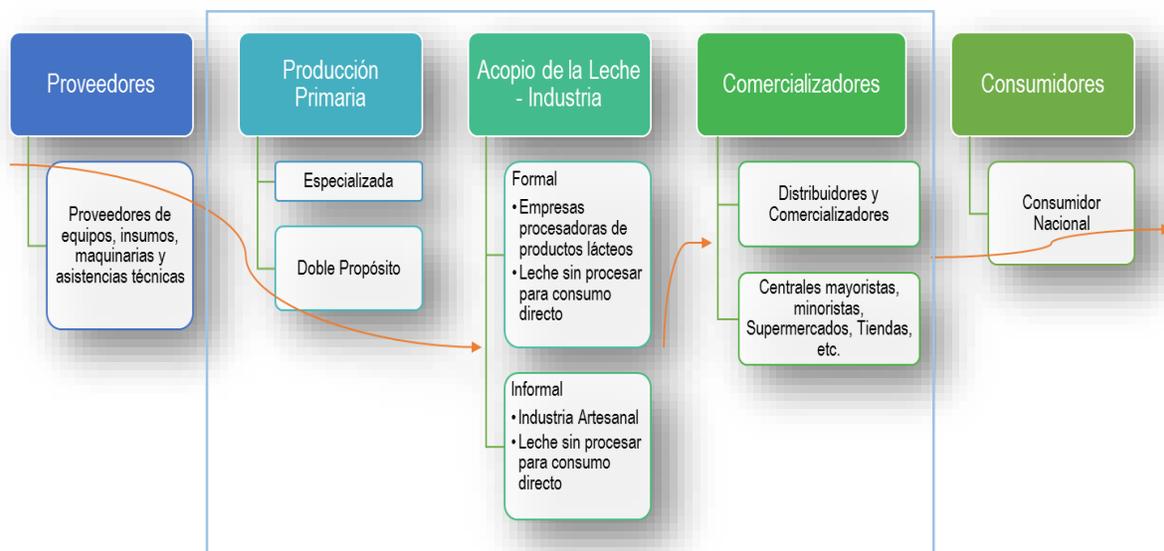


Figura 23. Cadena de Suministros de Lácteos del Departamento de Sucre. Fuente: Elaboración propia

5.5.1 Eslabones de la Cadena de Lácteos del Departamento de Sucre

La particularidad de la cadena de departamento de Sucre, en comparación con la nacional y la de otros departamentos, es que solo presenta cinco eslabones. Esto, debido a que en el departamento el número de centros de acopio son escasos, y el acopio es realizado en las empresas que elaboran productos lácteos tales como: queso doble crema, queso costeño, queso doble crema tipo mozzarella, suero, etc. A continuación se detalla el rol de cada eslabón.

5.5.1.1 Proveedores

Los proveedores constituyen un eslabón transversal a los eslabones de producción primaria, acopio-industria y comercialización, y está conformado por todas aquellas empresas o personas que brindan los insumos, productos, maquinaria y asistencia necesaria, es decir, productos y servicios para asegurar la producción de lácteos. Dentro de los insumos más usuales, se encuentran las semillas de pasto, concentrados, sales mineralizadas, etc.

En Sucre, se utiliza gran variedad de semillas de pasto dependiendo de los suelos de cada uno de los municipios, para proveer un alimento balanceado al ganado; las áreas de pasto utilizadas se clasifican en: pasto de corte, pradera tradicional, pradera mejorada, cultivo forrajero y sistema silvopastoril, (Secretaría de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016). (Tabla 6).

Tabla 6

Tipos de Pastos predominante en cada municipio del Departamento de Sucre, 2015

MUNICIPIOS	PASTO DE CORTE	PRADERA TRADICIONAL	PRADERA MEJORADA	CULTIVO FORRAJERO	SISTEMA SILVO PASTORIL
SINCELEJO	ELEFANTE	COLOSUANA	ANGLETOM		
BUENAVISTA	ELEFANTE MORADO	COLOSUANA	GUINEA	BOTON DE ORO	COLOSUANA
CAIMITO		LAMBE - LAMBE	BRACHIARIA BIZANTA		
CHALAN	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA	MOMBASA		
COLOSO	ELEFANTE	COLOSUANA	PANICUM		GUASIMO
COROZAL	KINGRAS	COLOSUANA	ANGLETON	MILLO - MAIZ	GUASIMO
COVEÑAS	MORALFALFA	COLOSUANA	BRACHIARIA	CENTROCEMA	
EL ROBLE	ELEFANTE	COLOSUANA			
GALERAS	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA			
GUARANDA		MINDACA	BRACHIPARA		
LA UNION	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA	BRACHIARIA		
LOS PALMITOS	ELEFANTE MORADO	COLOSUANA	GUINEA	MAIZ	MATARATON
MAJAGUAL	GUINEA	PANAMEÑA	ANGLETON		
MORROA	GUINEA	COLOSUANA	BACHIARIAS		GUACIMO
OVEJAS	KINGRAS	COLOSUANA	BRACHIARIAS	MAIZ	ROBLE
SAMPUES	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA	BRACHIARIA	SORGO	MATARATON
SAN A. PALMITO	ELEFANTE MORADO	COLOSUANA	ANGLETON	SORGO	TECA
SAN B. ABAD	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA	BRACHIARIA		
SAN J. BETULIA	MOMBASA	COLOSUANA	ANGLETON		
SAN MARCOS	KINGRAS	CANUTILLO	GUINEA	MAIZ	
SAN ONOFRE	KINGRAS	COLOSUANA	BRACHIARIAS	MAIZ	ROBLE
SAN PEDRO	KINGRAS	COLOSUANA	GUINEA		TOTUMO
SINCE	ELEFANTE MORADO	BRACHIARIAS	ANGLETON	MAIZ, SORGO	TOTUMO
SUCRE		CONUTILLO	BRACHIARIAS		
TOLU	KINGRAS	ANGLETON	BRACHIARIAS		
TOLUVIEJO	CAÑA FORRAJERA	COLOSUANA	ANGLETON	MAIZ V-109	CAMPANO

Nota: Tipos de pastos predominantes en cada municipio del Departamento de Sucre a 2015. Fuente: UMATA'S -SDEMA- CONSENSOS MUNICIPALES

En cuanto al número de hectáreas sembradas en estos tipos de pastos, el municipio con mayor área sembrada es Sucre-Sucre, con 85.000 Has, de los cuales 83.000 Has son de pradera tradicional y las 2.000 Has faltantes son de pradera mejorada. (Figura 24 y 25).

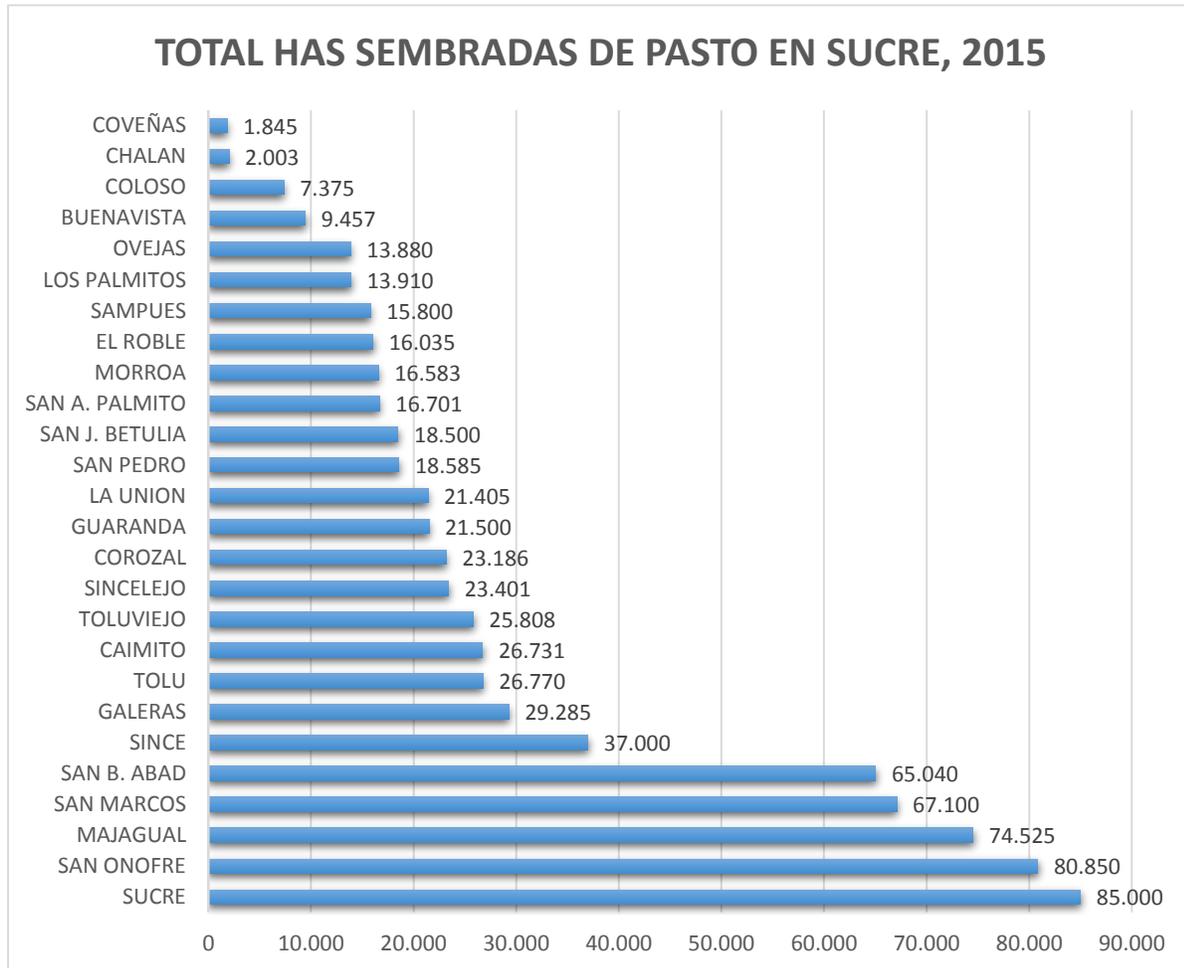


Figura 24. Total Hectáreas sembradas de pasto por municipios del Departamento de Sucre, 2015. Fuente: UMATA'S -SDEMA-CONSENSOS MUNICIPALES.

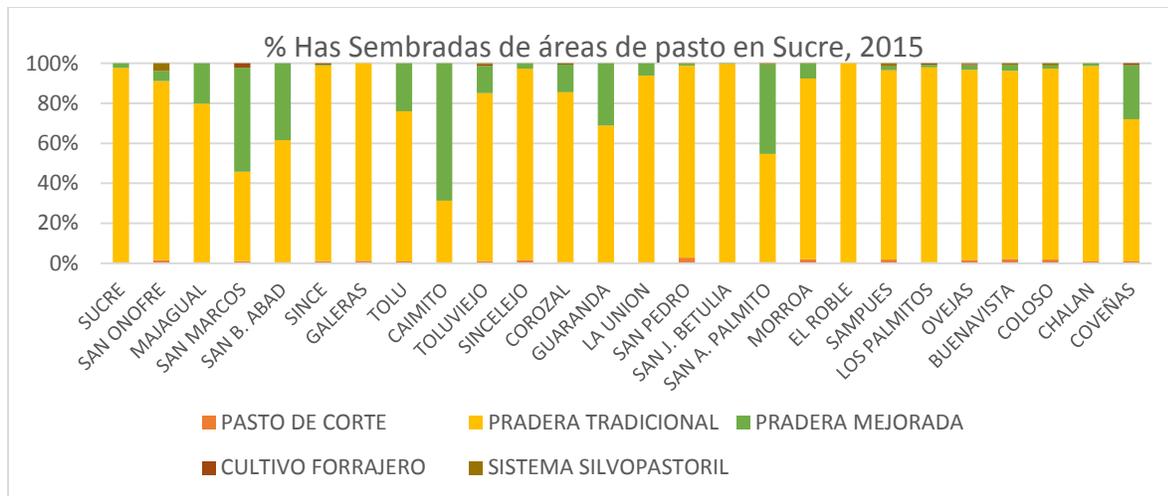


Figura 25. Hectáreas sembradas de cada área de pasto por municipios del Departamento de Sucre, 2015. Fuente: UMATA'S - SDEMA- Consensos Municipales.

5.5.1.2 Producción Primaria

En el departamento de Sucre, el eslabón de producción está conformado por pequeños, medianos y grandes ganaderos que producen la leche principalmente bajo el sistema doble propósito, que representa el 89,39% de la forma de producción, mientras que el sistema especializada solo alcanza el 0,61%. El 9,98% restante representa la obtención solo de carne, (Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016).

Tal como se mencionó anteriormente, a 2016 Sucre presentó una producción anual de 170.994.379 litros de leche, un poco mayor con respecto al año anterior, de los cuales según cifras del DANE, aproximadamente el 10% fueron procesados en finca, el 8% fueron de autoconsumo, el 45% en acopio formal y 37% en sector informal, (DANE, 2015). (Figura 26 y 27).

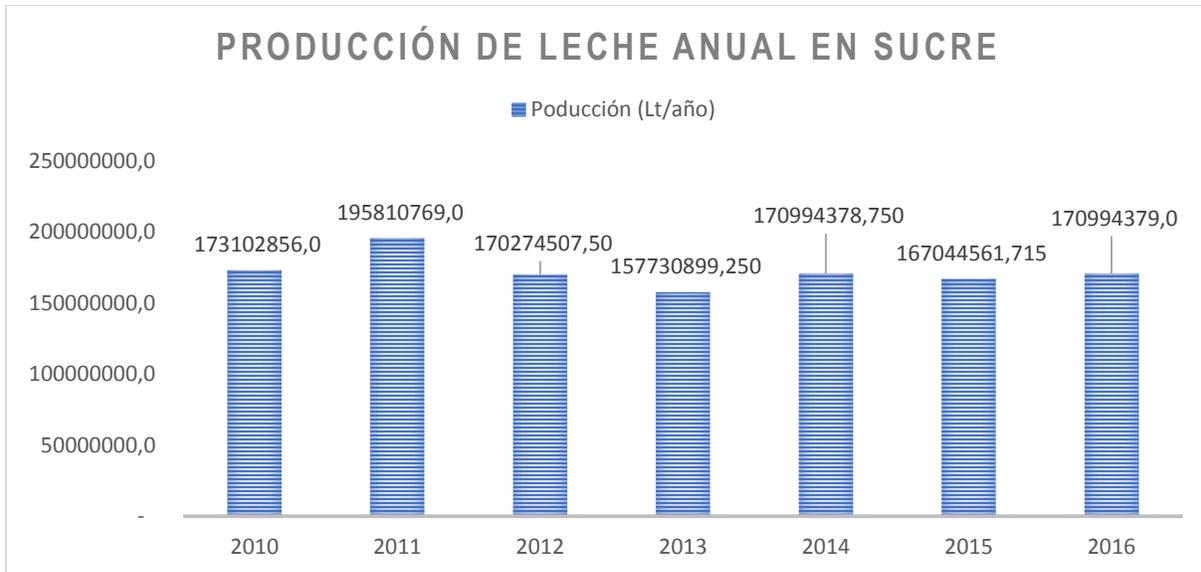


Figura 26. Producción Histórica 2010-2016 de Leche del Departamento de Sucre. Fuente: Adaptado de UMATA'S -SDEMA- Consensos Municipales.

Es de resaltar que es estos periodos, los municipios de Chalán, Coveñas y Colosó siempre ocuparon los últimos lugares por la escasa producción de leche anual, en donde, el menor registro de producción entre los periodos 2010 – 2015, lo tuvo Coveñas en el 2014 con solo 219.000 Lt/año. (La actividad económica principal de este municipio es el producto de sol y playa).

En el departamento de Sucre, se encuentran 17.296 Unidades productivas Agropecuarias (UPA), (DANE, 2016), los cuales presentan un desconocimiento generalizado acerca de la normatividad que los regula y la falta de asistencia técnica para alcanzar las certificaciones de buenas prácticas ganaderas. Pero esto puede ser ocasionado por el tipo de sistema empleado (doble propósito) y además, que la mayoría son pequeños y medianos ganaderos.

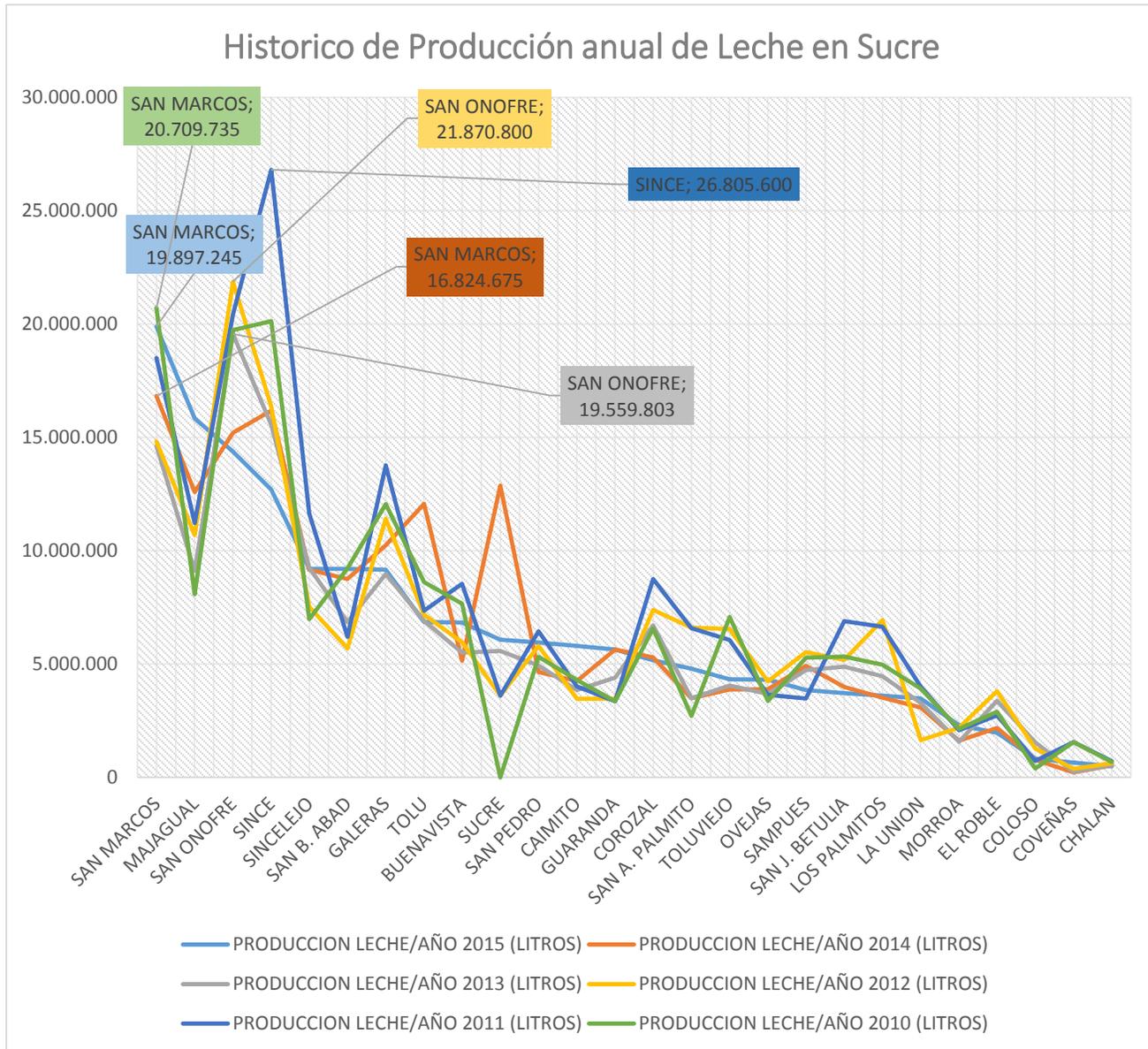


Figura 27. Histórico de producción 2010-2015 de Leche por municipios del Departamento de Sucre. Fuente: Construcción propia a partir de UMATA'S -SDEMA- Consensos Municipales.

5.5.1.3 Acopio-Industria

Para el acopio de la leche en el departamento de Sucre, al igual que en la cadena nacional, se evidencian cinco (5) agentes:

- ✓ *Intermediarios*, que representan un conjunto importante dentro de la cadena de lácteos del departamento y a 2012 obtenían el 62% del total de la leche dedicada a la venta, (Red Nacional de Agencias de Desarrollo Local, 2013). Los intermediarios sirven directamente a muchas empresas procesadoras de lácteos en los diferentes municipios encargándose de recoger la leche en las fincas, transportarla y venderla a los procesadores, por lo que el costo de la leche puede aumentar.

- ✓ *Cruderos*, quienes se encargan de la comercialización directa de leche cruda proveniente de las ganaderías, al consumidor final y que generalmente lo realizan en motocicletas y recipientes de plástico reutilizados (pimpinas de aceites).

- ✓ *Transportadores*, los cuales son contratados por las empresas procesadoras para que realicen la ruta de recolección de la leche en todas las unidades productivas que tienen contrato con el procesador. Los vehículos que se utilizan para esta actividad generalmente son camionetas de estacas, camiones 300 y motocicletas.

- ✓ *Procesadores-Acopiadores*, quienes generalmente se encargan directamente de hacer el acopio de leche en las fincas, debido a la escasez de acopiadores en el departamento. Los procesadores hacen parte de la industria de lácteos y son los encargados de producir una amplia gama de productos, tales como queso doble crema, queso costeño, queso fresco graso semiduro, queso doble crema tipo mozzarella, queso semigraso, queso fresco, leche entera en polvo azucarada, yogurt, leche entera pasteurizada, crema de leche, crema para untar, bolitas de leche y suero costeño.

Actualmente según datos del INVIMA, los productores localizados en el departamento de Sucre, que se encuentran inscritos con permisos sanitarios y cuyos datos reposan en la base de datos a enero 25 de 2016, son 46 empresas procesadoras pertenecientes a 14 municipios de los 26 del departamento, tales municipios son: Buenavista, Caimito, Corozal, Galeras, Los Palmitos, Majagual, Ovejas, Sampués, San Juan de Betulia, San Luis de Sincé, San Marcos, San Pedro, Sincelejo y Toluviéjo.

Cabe resaltar que a fecha 2016 según datos de la Cámara de Comercio, existen otros municipios que registraron matrícula comercial y que aportan otros 4 procesadores más, estos municipios son: Tolú, El Roble, San Benito Abad y San Onofre.

- ✓ *Productores Artesanales*, que se encargan generalmente de la elaboración de queso costeño y suero costeño. No cuentan con la infraestructura adecuada para realizar grandes producciones y están dados a la informalidad del proceso.

5.5.1.4 Comercializadores

En Sucre, los comercializadores se dedican a la venta directa e indirecta de los productos lácteos y sus derivados. La venta indirecta, generalmente pasar por intermediarios antes de llegar al consumidor final.

Los canales de comercialización y distribución dentro de este eslabón son tres: el canal tradicional (tiendas de barrio), las grandes superficies (cadenas de supermercados) y el canal institucional (las compras públicas para programas asistenciales, instituciones armadas, hospitales, etc.), (Consejo Nacional Lácteo, 2011).

En cuanto a la comercialización de la leche cruda realizada por los Cruderos, existe un alto grado de incumplimiento de las medidas higiénicas y sanitarias establecidas en el Decreto 3075 de 1997 del ministerio de Salud de Colombia, ya que no poseen certificación para la manipulación de alimentos y ningún tipo de indumentaria requerida, (Olivero, Aguas, & Cury, 2011).

Actualmente, las empresas procesadoras del departamento no cuentan con una hoja de ruta de exportación por lo que no se han realizado una incursión de los productos a mercados extranjeros aprovechando la ventajas que trae para Colombia los tratados de libre comercio con otros países, (Hernández, Bustamante, Porto, & De la Ossa, 2014). A 2015, Sucre realizó solo una exportación de 18858,77 Kg de Queso fresco a Curacao por un valor de \$3.000 USD, (Legiscomex, 2016).

5.5.1.5 *El quinto eslabón: Consumidores.*

Acorde a la falta de proyección para la exportación, los consumidores de productos lácteos producidos en el departamento de Sucre están constituidos por el mercado en general nacional o los consumidores específicos de los productos, ya sea leche cruda o derivados lácteos.

Cabe resaltar que el éxito de esta cadena y de todas las demás de departamento de Sucre, está directamente ajustada a la integración de cada uno de los actores, a través de una red de actividades logísticas que generen sinergia, posibilitando un conjunto de beneficios significativos a cada uno de ellos, entre los cuales está el conseguir una reducción de costos en los procesos, una mayor productividad gracias a la articulación de las actividades, mayor nivel de conocimiento y de información, que conlleva a saber cómo actuar frente a la incertidumbre de la dinámica impuesta por los mercados, (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007).

5.6 Red de aprovisionamiento de la leche cruda en el Departamento de Sucre

Tal como se mencionó en capítulos anteriores, dentro del proceso de aprovisionamiento se articulan todas aquellas actividades que permiten planificar, ejecutar y controlar eficientemente todo el flujo de materias prima que se requieren para la elaboración de uno o más productos dentro de una cadena de suministro, (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2014).

En el caso de la cadena láctea del departamento de Sucre, la materia prima fundamental es la leche cruda, la cual sigue una red articulada desde su obtención en las ganaderías y/o unidades productoras, hasta su disposición para ser acopiada o transformada; generalmente esta red se enmarca en las siguientes modalidades de recolección del producto, Ganaderías/unidades productivas – Unidad procesadora o Ganaderías/unidades productivas – Intermediarios - Unidad procesadora.

5.6.1 Delimitación del Estudio

Este trabajo delimitó su estudio a la logística de aprovisionamiento de la cadena de suministro del sector lácteo del Departamento de Sucre, comprendiendo las actividades de producción primaria, el transporte y acopio de la leche cruda, teniendo en cuenta el modelo a desarrollar. (Figura 28).

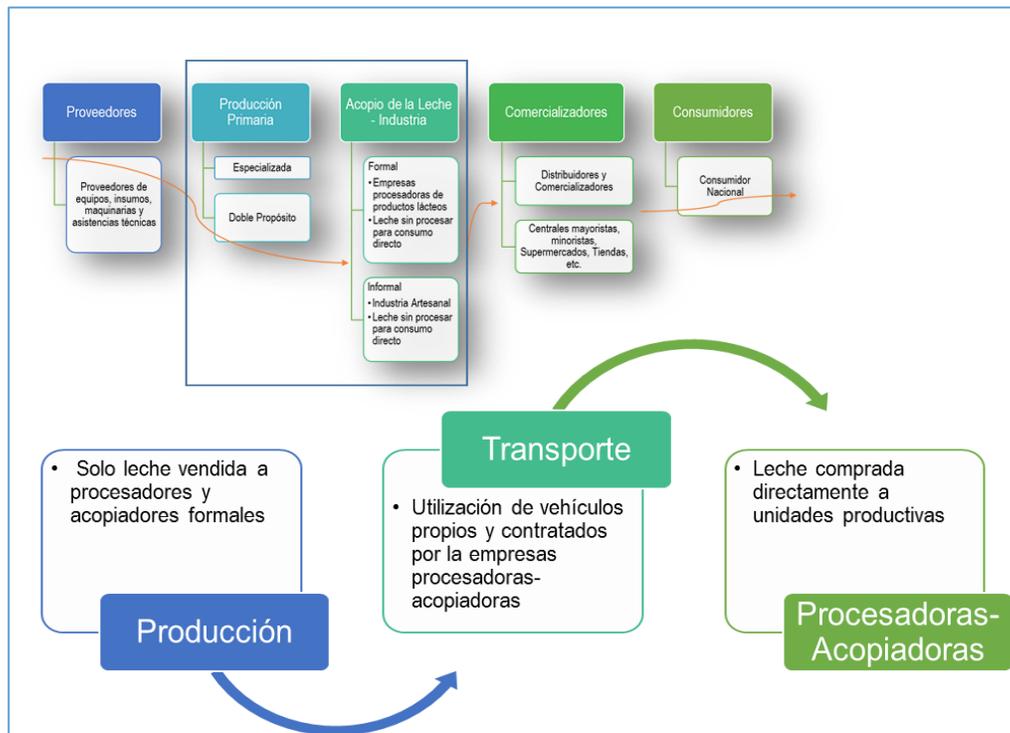


Figura 28. Red de Aprovisionamiento de leche cruda del departamento de Sucre priorizada en el estudio. Fuente: Elaboración propia

Acorde a la producción de leche por municipios del departamento de Sucre, se seleccionan los 8 municipios que a 2015 representaron el 62,29% de la producción total del departamento (1° **San Marcos**: 19.897.245 Lt/año, 2° **Majagual**: 15.841.000 Lt/año, 3° **San Onofre**: 14.372.970 Lt/año, 4° **San Luis de Sincé**: 12.698.642 Lt/año, 5° **Sincelejo**: 9.198.000 Lt/año, 6° **San Benito Abad**: 9.198.000 Lt/año, 7° **Galeras**: 9.164.237,5 Lt/año, 8° **Tolú**: 6851232,5 Lt/año y 9° **Buenavista**: 6.829.515 Lt/año), (Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016).

Posteriormente, se realizó un filtro con la base de datos de las empresas procesadoras de leche matriculadas ante cámara de comercio, con registro sanitario del INVIMA 2016 y los municipios

que representan el 62,29% de la producción de leche, identificándose los siguientes municipios productores: San Marcos, Majagual, Sincelejo, Galeras y Buenavista, que presentan empresas que cumplen el perfil. Por lo tanto son los municipios priorizados para este estudio.

Las empresas procesadoras ubicadas en estos municipios que cumplieron los requisitos son 23 y se evidencian en la siguiente tabla. (Tabla 7 y 8).

Tabla 7

Empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016

MUNICIPIO	RAZON SOCIAL	PRODUCTOS ELABORADOS
BUENAVISTA	COOPERATIVA DE PRODUCCION Y MERCADEO AGROPECUARIO - COOPROMA	QUESO FRESCO TIPO DOBLE CREMA
	DISTRIBUIDORA DE LACTEOS LA FE	QUESO DOBLE CREMA
	LACTEOS LOS CORRALES	QUESO DOBLE CREMA Y SUERO
	QUESERA LA BUENA FE	QUESO COSTEÑO
	QUESERA MANANTIAL	QUESO DOBLE CREMA
GALERAS	QUESERA DE PROPIEDAD DEL SEÑOR RAFAEL ANTONIO CASTRO GALVAN	QUESO FRESCO TIPO COSTEÑO
	QUESERA LARANDIA	QUESO COSTEÑO
MAJAGUAL	QUESERA PROPIEDAD DEL SEÑOR EDUARDO MACIAS	QUES FRESCO TIPO COSTEÑO
	QUESERA PROPIEDAD DEL SEÑOR FERNEY	QUESO FRESCO TIPO COSTEÑO
	QUESERA PROPIEDAD DEL SEÑOR JORGE LUIS MEDINA CUELLO	QUESO FRESCO TIPO COSTEÑO

Nota: Empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016. Fuente: Construcción propia a partir de INVIMA, 2016 y (*Secretaría de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016*).

Tabla 8

Continuación de empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016

	LACTEOS CLARY	QUESO DOBLE CREMA TIPO MOZZARELLA, QUESO COSTEÑO
	LACTEOS DE LA MOJANA	QUESO DOBLE CREMA TIPO MOZZARELLA
	LACTEOS DE MI TIERRA DE SAN MARCOS	QUESO FRESCO TIPO DOBLE CREMA
SAN MARCOS	LACTEOS EL SAN JORGE	QUESO SEMIGRASO, SEMIBLANDO TIPO MOZZARELLA
	LACTEOS NATY	QUESO DOBLE CREMA TIPO MOZZARELLA
	QUESERA EL PRADO	QUESO DOBLE CREMA TIPO MOZZARELLA.
	QUESERA LACTEOS DEL RANCHO	QUESO FRESCO GRASO SEMIDURO
	QUESERA PROPIEDAD DE JAVIER MEDINA	QUESO FRESCO TIPO DOBLE CREMA
	COLOMBIANA DE QUESOS POR ACCIONES SIMPLIFICADAS PRMV SAS	QUESO DOBLE CREMA TIPO MOZZARELLA VARIEDADES LIGTH, CHAMPIÑONES, CREMA PARA UNTAR (SUERO COSTEÑO).
	DISTRILACTEOS LA CAROLINA	YOGURT
SINCELEJO	EL IMPERIO DEL ARROZ	LECHE ENTERA EN POLVO AZUCARADA
	LACTEOS SINCELEJO	QUESO DOBLE CREMA
	PROLASUC	QUESO DOBLE CREMA, SUERO COSTEÑO, CREMA DE LECHE, LECHE ENTERA PASTERIZADA

Nota: Empresas procesadoras de lácteos con registro INVIMA pertenecientes a los municipios con el 62,29% de la producción de leche en Sucre, 2016. Fuente: Construcción propia a partir de INVIMA, 2016 y (*Secretaría de Desarrollo Económico y Medio Ambiente, 2016*).

Para la caracterización de la red de aprovisionamiento del departamento de Sucre, se diseñaron tres instrumentos de recolección de información validados previamente por expertos de ruteo de vehículos para cada una de las actividades que hacen parte de esta parte de la cadena, los cuales manejaron las siguientes variables según cada formato.

Centros de Acopio y Procesadoras de Leche: ubicación del sitio, demanda de leche, número de vehículos, tipo de contrato, horario de salida, horario de llegada, ganaderías y/o unidades productivas que visitan, gastos por pago de vehículos, combustible y otros. (Apéndice 2).

Ganaderías y Unidades Productoras de Leche: ubicación del sitio, cantidad de leche vendida directamente a la empresa procesadora/acopiadora, tiempos de recolección, horarios de recolección y hora de finalización del ordeño. (Apéndice 3).

Vehículos utilizados para la recolección y el transporte: Capacidad del vehículo, hora de partida y llegada a la empresa procesadora/acopiadora, tipo de recipientes utilizados, peso del vehículo vacío, combustible gastado y distancia recorrida en la ruta. (Apéndice 4).

Posteriormente, para el análisis de cada uno de los eslabones se consideró los siguientes aspectos:

Producción primaria: se tuvo en cuenta, únicamente el volumen de leche vendida directamente a los procesadores y centros de acopio del departamento de Sucre, que representa el 34% del total de la leche vendida, (Red Nacional de Agencias de Desarrollo Local, 2013).

Transporte: se delimitó al transporte terrestre realizado en el siguiente esquema, procesadoras/acopiadoras – Unidades productivas – Procesadoras/acopiadoras, con vehículos propios o contratados directamente por las unidades productoras/acopiadoras. No se tuvo en cuenta los intermediarios.

Empresas procesadoras/acopiadoras: se focalizaron aquellas empresas legalizadas ante cámara de comercio, que presentaban registros sanitarios según el INVIMA, que compran directamente a las unidades productivas y se encargan de la organización de sus rutas para la recolección de la leche con vehículos propios o contratados.

5.7 Sistema actual de ruteo

El ruteo que se realizan en las empresas productoras de derivados lácteos caracterizadas en esta investigación, no presenta ningún software especializado que permita organizar sus rutas para la

recolección de la materia prima principal (leche cruda) de manera óptima, por lo que este proceso se realiza a experticia del conductor, dueño de la empresa y/o encargado.

Sumado a esto, los vehículos empleados no cuentan con sistemas de refrigeración y emplean diferentes tipos de recipientes para transportar la leche que no cumplen con las especificaciones higiénicas establecidas en el Decreto 3075 de 1997 del ministerio de Salud. Entre los recipientes utilizados están: tanques plásticos de 200 litros, tanques plásticos de 5 galones fabricados para el empaque de aceite, recipientes de acero inoxidable o aluminio de 40 litros y 20 litros.

La cantidad de leche cruda que puede transportar cada vehículo depende de su marca y modelo, que por lo general son vehículos rígidos: camionetas de estaca y camiones sencillos de un eje. La capacidad aproximada para estos vehículos es de 1400 y 4000 litros respectivamente.

De igual modo, se encuentran los vehículos de tracción animal que generalmente cargan 6 recipientes de 40 litros y las motos, las cuales configuran para cargar 4 recipientes de 40 litros con ayuda de carretas y en otros casos hasta 6 tanques plásticos de 5 galones.

Las unidades productivas o ganaderías se encuentran ubicadas generalmente en zonas rurales, incluso, en municipios como San Marcos y Majagual, quedan ubicadas en zonas separadas por cuerpos de aguas, lo que genera el uso de transporte fluvial, en el ruteo.

Para establecer las ventanas de tiempo de la recolección de la leche, en la encuesta se preguntó por la hora promedio de culminación del proceso de ordeño en cada unidad productiva, siendo esta, la hora mínima de recolección. Para conocer el tiempo máximo, según el *National Dairy Council*, existe una regla de oro que establece que este producto puede estar sin refrigerar por alrededor de dos horas. Sin embargo, dadas las condiciones atmosféricas del departamento en lo respectivo a humedad (77% al 80%) y altas temperaturas (30% a 33%), se disminuye este tiempo a 1:30 horas, previendo que el vehículo debe seguir una ruta y llegar a otros puntos, por lo que demorará otro lapso antes de llegar al centro de acopio.

Cabe resaltar que este tiempo es un aproximado, debido las diversas variables que se deben tener en cuenta para el crecimiento bacteriano en la leche, tales como el pH, la humedad, el contenido de grasas, la temperatura, etc. A temperatura ambiente la leche cruda se descompone rápidamente, debido al acelerado desarrollo de bacterias, (Celis & Juárez, 2009).

En este sentido, se aplicaron las encuestas a las empresas de lácteos del departamento de Sucre que cumplieran con las especificaciones establecidas en la delimitación del estudio. (Tabla 9).

Tabla 9

Empresas procesadoras de lácteos a las cuales se le aplicaron las respectivas encuestas

San Marcos	Galeras	Sincelejo	Buenavista
<ul style="list-style-type: none"> • Lácteos la Mojana (E1) • Lácteos Clary (E2) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quesera Los Mangos (E3) • Quesera Larandia (E4) 	<ul style="list-style-type: none"> • PROLASUC (E6) 	<ul style="list-style-type: none"> • COOPROMA (E5)

Nota: Empresas priorizadas a las cuales se logró recolectar la información necesaria para el modelo. Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar que se saca de la lista el municipio de Majagual, debido que, al momento de realizar esta investigación, las inundaciones presentadas por el fenómeno de lluvias que azotó el país en el 2017, afectaron especialmente a este municipio ubicado en la Subregión Mojana, lo que causó que mayoría del ganado fuera llevado a otros municipios como San Marcos, Caimito y San Benito Abad.

Adicionalmente a ello, las inundaciones impedían la realización de rutas, las cuales se detuvieron por esta problemática y otras se realizaban por vía acuática, lo que imposibilitó el levantamiento de la información. Una de las empresas focalizadas sufrió inundaciones deteniendo todos sus procesos productivos y generando muchas pérdidas económicas.

Para efectos de comprensión y anonimato, de ahora en adelante se hará referencia a las empresas procesadoras como $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. Las rutas, se denominaron como $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, las unidades productivas/ganaderías como $1, 2, 3, \dots, n$ y por último los vehículos como $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$.

5.7.1 Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de San Marcos

El municipio de San Marcos, mayor productor de leche del departamento de Sucre, tiene una extensión de 534,54 Km² y está ubicado a orillas del río San Jorge.

En este municipio se aplicaron encuestas a seis (6) empresas productoras de lácteos, de las cuales solo dos (2) permitieron el acompañamiento a la ruta en un total de veinte (20) unidades productivas/ganaderías. Los datos obtenidos son los siguientes:

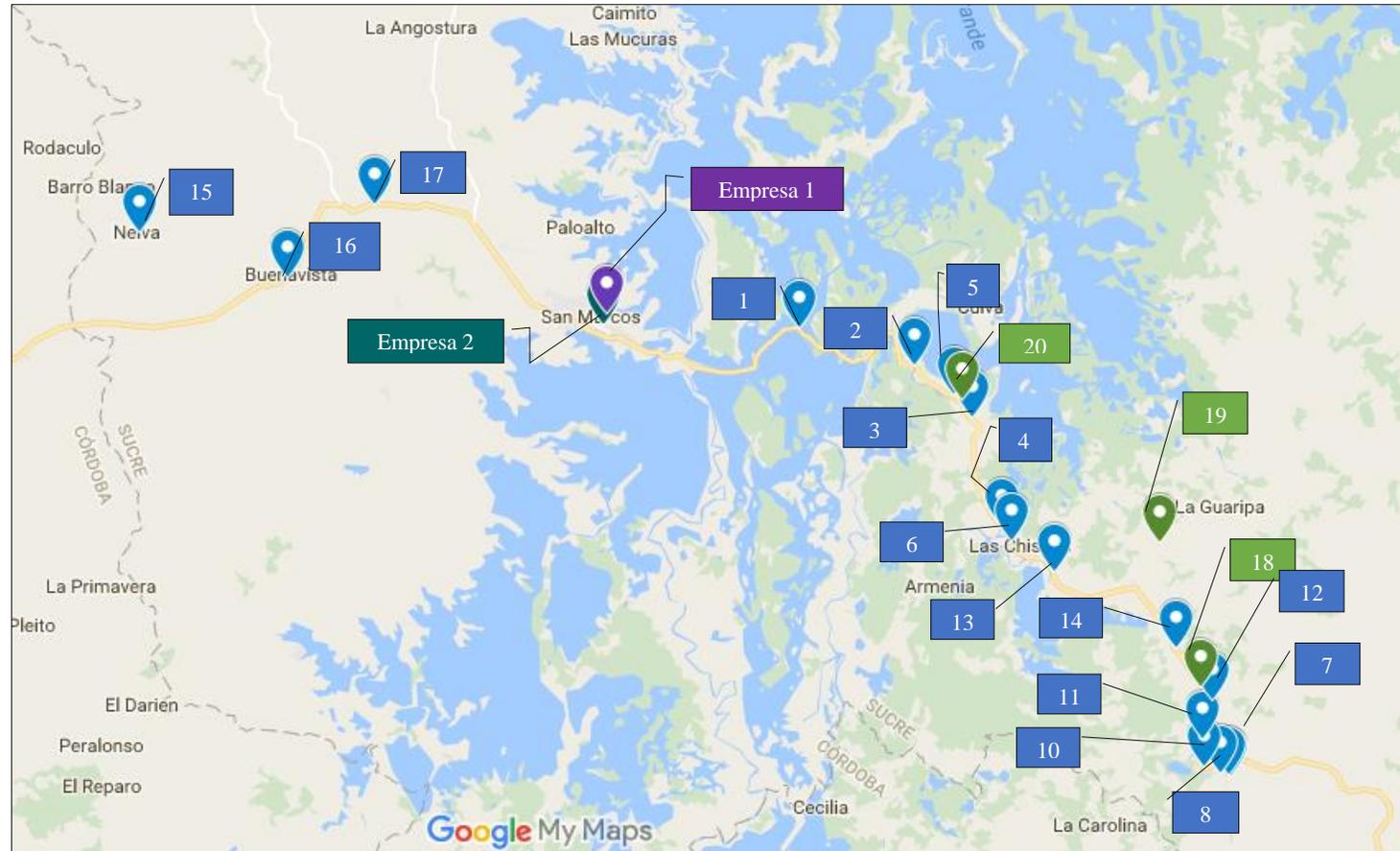
Tabla 10
Datos recolectados para el modelo de ruteo – San Marcos

Ruta	Empresa	Vehículo Utilizado	Capacidad (Peso Kg)	Ubicación			Distancia (km)	Tiempo (min)	Lt Recogido
				N	W	Altura			
1	E1	Mazda BT50 Estaca Mo 2009	1000	08°37.804	074°58.71	23	21,3	25	11
				08°33.342	074°56.17	22	31,96	33	40
				08°31.427	074°53.12	25	39,84	40	147
				08°30.130	074°52.21	23	34	42	8
				08°29.171	074°52.45	22	34,5	44	88
				08°28.464	074°52.42	23	46,3	46	32
				08°28.288	074°52.02	22	47,4	48	69
				08°28.242	074°51.80	29	47,8	49	6
				08°28.235	074°51.79	26	47,8	49	121
				08°34.147	074°57.26	25	29,307	31	102
				08°34.503	074°57.48	28	28,49	30	93
				08°37.206	074°58.24	25	22,78	26	41
				08°38.544	074°59.67	26	18,99	23	33
08°39.469	075°02.56	27	11,3	15	126				
2				08°42.577	075°13.21	59	13,1	18	175
				08°41.861	075°19.08	99	26,1	49	341
				08°40.709	075°15.36	65	17,6	24	318
3	E2	Dodge Mo 98 de Estaca	1100	08°30.459	074°52.52	19	41,5	42	72
				08°34.087	074°53.54	16	37,9	44	145
				08°37.667	074°58.50	18	21,2	25	481

Nota: Ubicación de las unidades productivas de leche relacionadas a la empresa E1 y E2 procesadora de lácteos del Municipio de San Marcos, Sucre. 2017. *Fuente:* Elaboración propia.

En esta tabla se relaciona la ubicación (x, y, z) georreferenciada de las unidades productoras de leche relacionadas con las empresas E_1 y E_2 . Cabe resaltar que este ruteo se aplicó solo a las unidades que son servidas por vehículos propios o contratados directamente por la empresa y además, que parten desde las instalaciones a realizar la recolección y regresan a la empresa al final del recorrido a descargar el producto. Las rutas actuales se detallan en la siguiente imagen. (Figura 29).

Rutas San Marcos		
R ₁	R ₂	R ₃
E ₁	E ₁	E ₂
1	15	18
2	16	19
3	17	20
4	E ₁	E ₂
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
E ₁		



Empresas		Recolección	Tiempo	Distancia	Costo
E ₁	R ₁	917 Lt	3 h 24 min	96,282 km	\$ 95.662,8
	R ₂	834 Lt	1 h 56 min	62,3 km	\$ 83.338,8
E ₂	R ₃	698 Lt	3 h 5 min	87,8 km	\$ 104.643,8

Figura 29. Ruteo para la recolección de leche de las empresas E₁ y E₂ de San Marcos, 2017.
 Fuente: Elaboración propia.

5.7.1.1 Detallado de las rutas del municipio de San Marcos

Acorde a los datos recolectados, el tiempo total de cada ruta se tomó justo cuando el vehículo partió del centro de acopio, hasta que regresó a él, midiendo las distancias de cada punto que visitaba y la hora en que llegaba a cada sitio, además del tiempo exacto que demoraba el servicio y la cantidad de producto recolectado. A continuación se muestra el detallado del tiempo medio de servicio vs la cantidad de producto recogida en cada cliente perteneciente a una ruta.

✓ Ruta 1: Empresa 1 (E₁R₁):

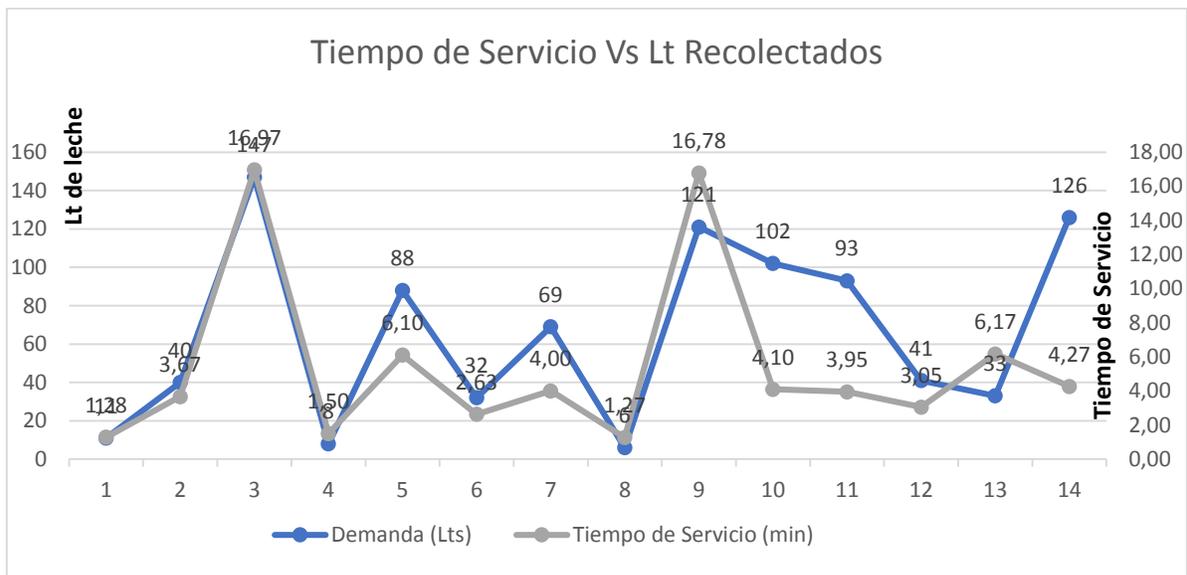


Figura 30. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₁ de la empresa E₁. Fuente: Elaboración propia.

R1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Tiempo de Servicio (min)	1,28	3,67	16,97	1,50	6,10	2,63	4	1,27	16,78	4,10	3,95	3,05	6,17	4,27
Demanda (Lt)	11	40	147	8	88	32	69	6	121	102	93	41	33	126

✓ Ruta 2: Empresa 1 (E₁R₂):

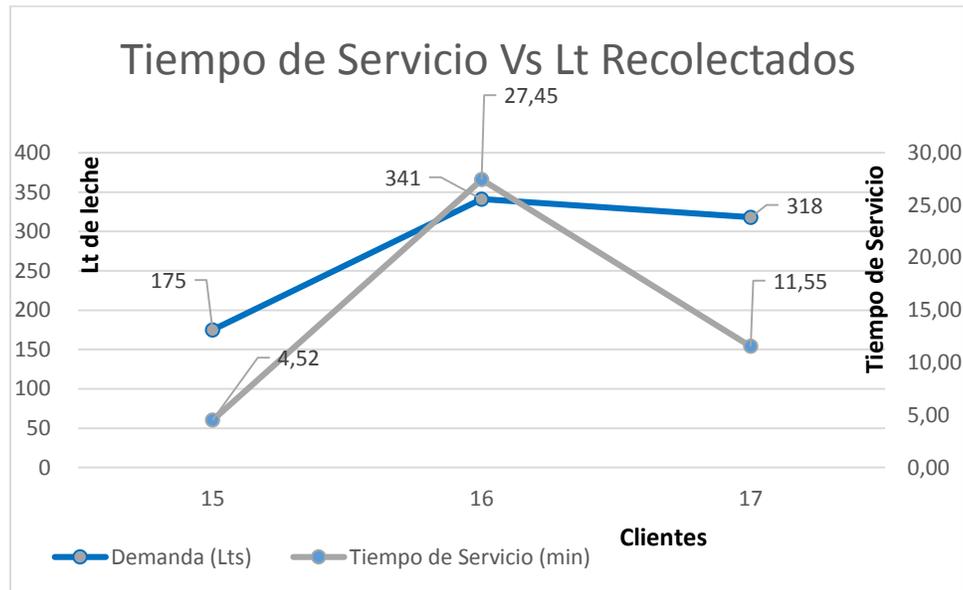


Figura 31. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₂ de la empresa E₁. Fuente: Elaboración propia.

R2	15	16	17
Tiempo de Servicio (min)	4,52	27,45	11,55
Demanda (Lt)	175	341	318

✓ Ruta 3: Empresa 2 (E₂R₃):

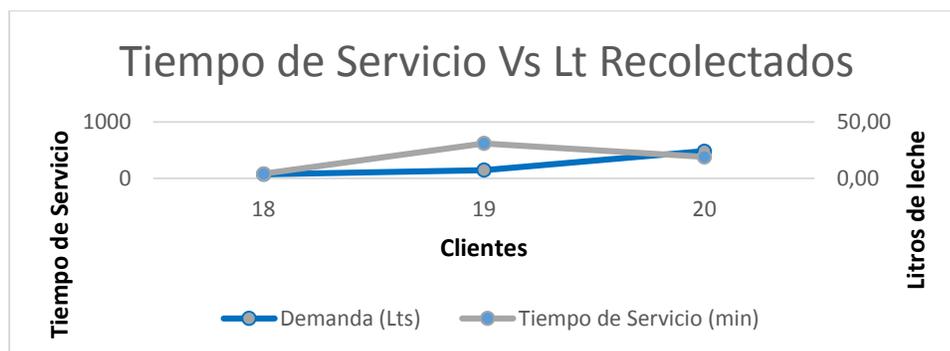


Figura 32. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₃ de la empresa E₂. Fuente: Elaboración propia.

R3	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
Tiempo de Servicio (min)	4	31	18,98
Demanda (Lt)	72	145	481

En las figuras 30, 31 y 32, se puede observar que existe una relación casi directa entre el tiempo de servicio y la demanda recolectada. A mayor cantidad de litros, mayor tiempo de atención y viceversa.

5.7.1.2 Cálculo de los costos de la ruta de San Marcos

Para calcular los costos respectivos para cada empresa, se tuvieron en cuenta los costos fijos (CF) por utilización del vehículo en la ruta, que se derivan del pago del conductor y del ayudante, sumado a los costos variables (CV) de consumo de combustible y por desgaste del vehículo por kilómetros recorridos en términos de aceite, llantas y costo adicional por demoras.

El costo promedio del cambio de aceite para el vehículo V_1 es de \$150.000 y se debe hacer cada 5.000 kilómetros, por lo que el costo de cada kilómetro recorrido tiene un valor de \$30; para V_2 es de 130.000 y demora la misma cantidad de kilómetros, por lo que cada kilómetro recorrido cuesta \$26.

La duración exacta de una llanta no es posible calcularla, debido a las diversas variables que se deben considerar, pero una llanta promedio para este tipo de vehículos demora 45.000 km. El costo del kit de llantas para V_1 es de \$1'763.000 y para el V_2 , el kit tiene un precio de \$1'211.600, por lo que respectivamente se traducen en costos de \$39,2 y \$26,9 por kilómetro recorrido. Los costos de la ruta se detallan a continuación. (Tabla 11).

Tabla 11
Costos de ruta para San Marcos

VEHÍCULO	RUTA	COSTOS FIJOS			COSTOS VARIABLES		
		Conductor	Ayudante	Combustible	Aceite	llantas	Demoras
V ₁	R ₁	24.000	10.000	55.000	2.888,5	3774,3	Si hay cuesta \$50
	R ₂	24.000	10.000	45.000	1,881	2.457,8	
V ₂	R ₃	60.000		40.000	2.282	2.361,8	Si hay cuesta \$60

Nota: Costos fijos y variables de ruteo en las empresas E₁ y E₂ de San Marcos. El costo de las demoras fue dado por los empresarios en la encuesta. *Fuente:* Elaboración propia.

Acorde a lo anterior, los costos totales (CF+CV) para (E₁R₁), (E₁R₂) y (E₂R₃) se calculan en \$ 95.662,8, \$ 83.338,8 y \$ 104.643,8 respectivamente, sin tener en cuenta costos por mantenimiento, imprevistos, demoras y de contratos adicionales de otros vehículos por daño del vehículo durante la ruta.

Para el cálculo del costo de multa por unidad de minuto, se considera el costo de demora por cada litro, el total de litros recolectados y el tiempo total de la ruta. De esta manera, los costos por demora para cada ruta son \$224,75/min, \$359,48/min y \$226,37/min.

5.7.2 Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Galeras

El municipio de Galeras, tiene una extensión de 321,6Km² y se aplicaron encuestas a dos (2) empresas productoras de lácteos, las cuales permitieron el acompañamiento a la ruta en un total de veinte (17) unidades productivas/ganaderías. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 12
Datos recolectados para el modelo de ruteo – Galeras

Ruta	Vehículo Utilizado	Capacidad (Peso Kg)	Centro de Acopio	Ubicación			Distancia (km)	Tiempo (min)	Lt Recogido
				N	W	Altura			
1	Nissan Mo 1980 de Estaca	1200	E4	09°12.875	075°00.610	107	7,8	17	7
				09°14.048	074°69.569	73	18	27	312
				09°16.205	074°56.428	77	52	96	100
				09°13.746	074°55.422	65	26	60	196
				09°12.973	075°00.629	107	7,6	17	14
				09°12.954	075°00.624	103	7,8	17	24
2	Dodge Mo 1981 de Estaca	1100	E4	09°11.310	074°53.775	43	17,7	34	120
				09°10.106	074°52.993	35	20,3	41	140
				09°10.492	074°53.375	40	19,7	39	366
				09°10.974	074°54.743	39	15,8	30	143
				09°10.502	074°54.869	39	14,9	28	631
3	GREAT WALL 2016	1000	E3	09°09.009	074°56.580	49	15,1	31	47
				09°08.655	074°55.884	45	17	33	18
				09°09.648	074°56.776	42	14	28	20
				09°10.191	074°56.239	49	15	29	20
				09°10.532	074°55.106	42	16,7	35	73
				09°10.150	074°55.843	42	15	31	140

Nota: Ubicación de las unidades productivas de leche relacionadas a la empresa E3 y E4 procesadora de lácteos del Municipio de Galeras, Sucre. 2017. *Fuente:* Elaboración propia.

Las rutas que realizan las empresas E_3 y E_4 se muestran en el siguiente mapa. (Figura 33).

5.7.2.1 Detallado de las rutas del municipio de Galeras

A continuación se detalla la relación entre el tiempo de servicio y la cantidad de litros recolectados en cada unidad productiva/ganadería.

✓ Ruta 1: Empresa 4 (E₄R₁):

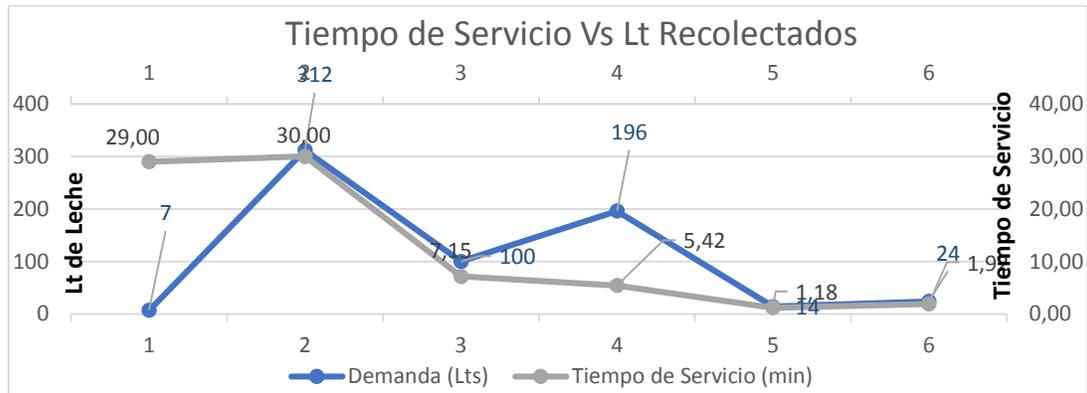


Figura 34. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₁ de la empresa E₄. Fuente: Elaboración propia.

RI	4	1	2	6	5	3
Tiempo de Servicio (min)	29	30	7,15	5,42	1,18	1,92
Demanda (Lt)	7	312	100	196	14	24

✓ Ruta 2: Empresa 4 (E₄R₂):

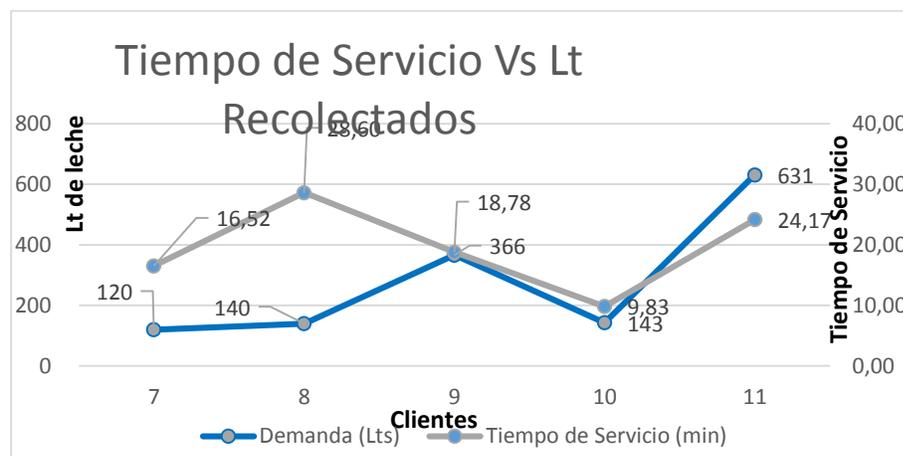


Figura 35. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₂ de la empresa E₄. Fuente: Elaboración propia.

<i>R2</i>	7	10	11	8	9
Tiempo de Servicio (min)	16,52	28,60	18,78	9,83	24,17
Demanda (Lt)	120	140	366	143	631

✓ Ruta 3: Empresa 3 (E₃R₃):

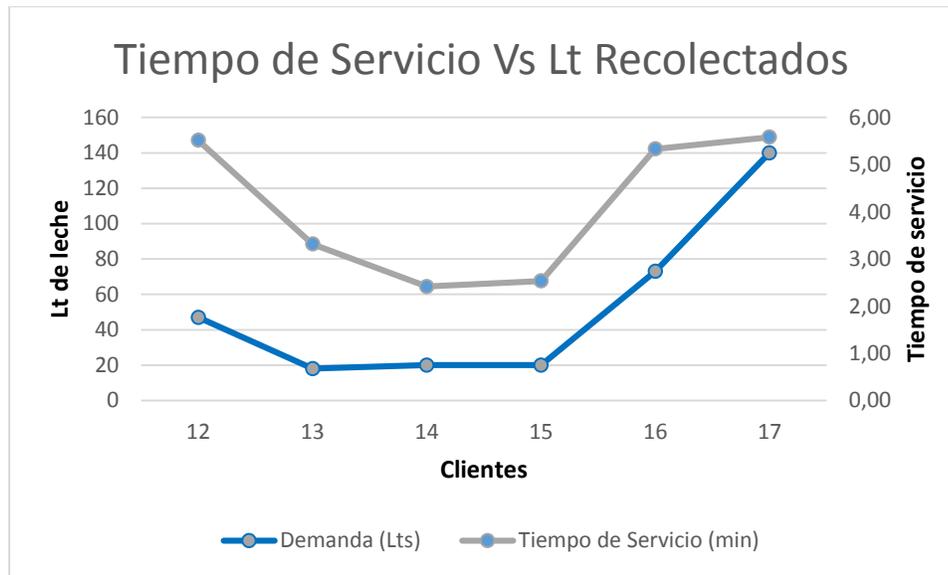


Figura 36. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R₃ de la empresa E₃. Fuente: Elaboración propia.

<i>R3</i>	16	17	15	14	12	13
Tiempo de Servicio (min)	5,52	3,32	2,42	2,53	5,33	5,58
Demanda (Lt)	47	18	20	20	73	140

En las figuras 34, 35 y 36, se puede observar que existe una relación casi directa entre el tiempo de servicio y la demanda recolectada. A mayor cantidad de litros, mayor tiempo de atención y viceversa.

5.7.2.2 Cálculo de los costos de la ruta de Galeras

Al igual que en el municipio de San Marcos, se tuvieron en cuenta los costos fijos (CF) por utilización del vehículo en la ruta, que se derivan del pago del conductor y del ayudante,

sumado a los costos variables (CV) de consumo de combustible y por desgaste del vehículo por kilómetros recorridos en términos de aceite, llantas y costo adicional por demoras.

El costo promedio del cambio de aceite para el vehículo V₃ es de \$190.000, para V₄ es de \$130.000 y para el vehículo V₅ es de \$150.000. Para todos, el cambio se debe realizar cada 5.000 kilómetros por lo que el costo de cada kilómetro recorrido tiene un valor de \$38, \$26 y \$30 respectivamente.

El costo del kit de llantas para V₃ es de \$2'600.000, para V₄ \$1'211.600 y para V₅ tiene un valor de \$2'019.960, por lo que respectivamente representan costos de \$57.8, \$26.9 y \$44.9 por kilómetro recorrido. Los costos de la ruta se detallan a continuación. (Tabla 13).

Tabla 13
Costos de ruta para Galeras

VEHÍCULO	RUTA	COSTOS FIJOS		COSTOS VARIABLES			
		Conductor	Ayudante	Combustible	Aceite	llantas	Demoras
V ₃	R ₁	50.000		40.000	4.583,9	6.972,4	Si hay cuesta \$10/Lt
V ₄	R ₂	50.000		40.000	1.059	1.095,6	
V ₅	R ₃	0	10.000	20.000	1.219,5	1.825,2	Si hay cuesta \$2,5/Lt

Nota: Costos fijos y variables de ruteo en las empresas E₃ y E₄ de Galeras. El costo de las demoras fue dado por los empresarios en la encuesta. *Fuente:* Elaboración propia.

Acorde a lo anterior, los costos totales (CF+CV) para (E₄R₁), (E₄R₂) y (E₃R₃) se calculan en \$101.556,3, \$92.154,6 y \$33.044,7 respectivamente, sin tener en cuenta costos por mantenimiento, imprevistos y de contratos adicionales de otros vehículos por daño del vehículo durante la ruta.

Tal como se calculó en el municipio de San Marcos, los costos de multas para Galeras son \$25,31/min, \$55,55/min y \$6,36/min.

5.7.3 Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Buenavista

El municipio de Buenavista, tiene una extensión de 124Km² y se aplicaron encuestas a solo (1) empresa productora de lácteos, debido a las dificultades que se generaron en torno a las condiciones climáticas y la no consecución de los respectivos permisos por las demás empresas identificadas. En tal sentido, se realizó acompañamiento a la ruta en un total de veinte (10) unidades productivas/ganaderías. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 14
Datos recolectados para el modelo de ruteo - Buenavista

Ruta	Vehículo Utilizado	Capacidad (Peso Kg)	Empresa	Ubicación			Distancia (km)	Tiempo (min)	Lt Recogido
				N	W	Altura			
1	CHEVROLET LUV DIMAX 1,6 Mo 95	1000	E5	09°17.763"	074°59.518"	86	4,34	11	71
				09°17.843"	074°59.636"	86	4,61	14	92
				09°16.050"	075°00.358"	77	8	17	43
				09°16.640"	074°59.971"	86	7,2	16	160
				09°16.412"	074°58.867"	77	6,9	13	189
				09°16.021"	074°58.296"	78	7	13	115
				09°16.203"	074°58.386"	74	7,1	13	59
				09°16.414"	074°58.870"	76	6,98	13	44
				09°17.118"	074°59.182"	76	5	11	102
				09°18.056"	074°58.921"	86	3	7	80

Nota: Ubicación de las unidades productivas de leche relacionadas a la empresa E5 procesadora de lácteos del Municipio de Buenavista, Sucre. 2017. *Fuente:* Elaboración propia.

A continuación se detalla la ruta que realiza la empresa E₅ se en el siguiente mapa. (Figura 37).

5.7.3.1 Detallado de la ruta del Municipio de Buenavista

A continuación se detalla la relación entre el tiempo de servicio y la cantidad de litros recolectados en cada unidad productiva/ganadería.

✓ Ruta 1: Empresa 5 (E₅R₁):

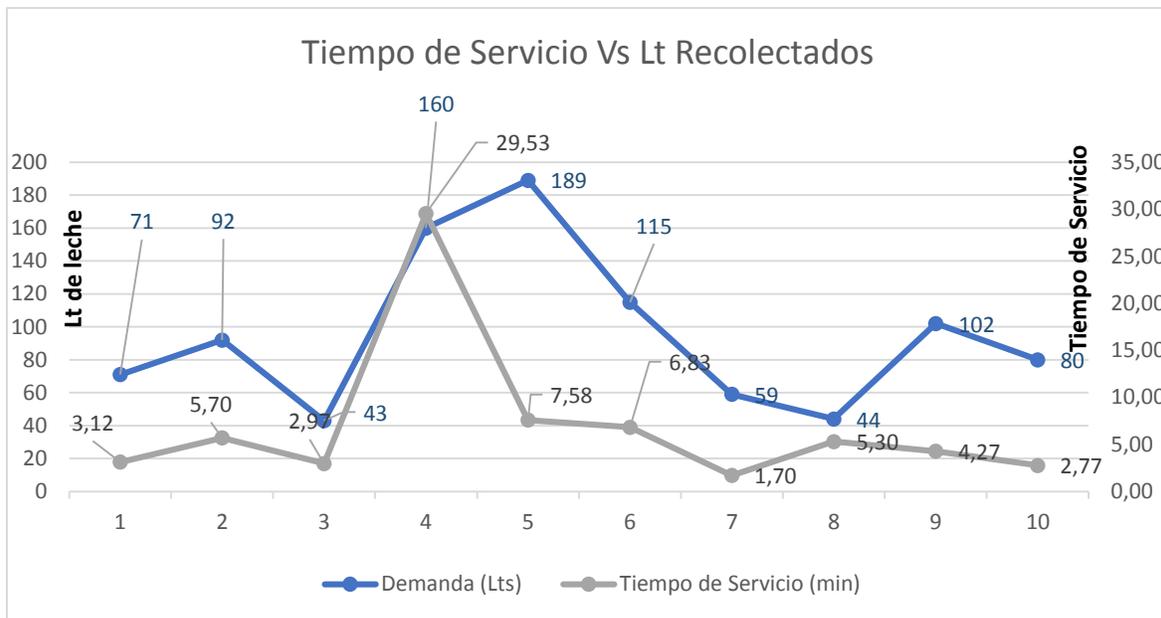


Figura 38. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R1 de la empresa E5. Fuente: Elaboración propia.

<i>RI</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo de Servicio (min)	3,12	5,70	2,97	29,53	7,58	6,83	1,70	5,30	4,27	2,77
Demanda (Lt)	71	92	43	160	189	115	59	44	102	80

En la figura 38, se puede observar que no existe una relación directa entre el tiempo de servicio y la demanda recolectada.

5.7.3.2 Cálculo de los costos de la ruta de Buenavista

Se tuvo en cuenta los costos fijos (CF) por utilización del vehículo en la ruta, que se derivan del pago del conductor y del ayudante, sumado a los costos variables (CV) de consumo de combustible y por desgaste del vehículo por kilómetros recorridos en términos de aceite, llantas y costo adicional por demoras, al igual que en los municipios de San Marcos y Galeras.

El costo promedio del cambio de aceite para el vehículo V_6 es de \$190.000 y el cambio se debe realizar cada 5.000 kilómetros por lo que el costo de cada kilómetro recorrido tiene un valor de \$38.

El costo del kit de llantas para para V_6 \$1'211.600, por lo representa un costo de \$26.9 por kilómetro recorrido. Los costos de la ruta se detallan a continuación. (Tabla 15).

Tabla 15
Costos de ruta para Buenavista

VEHÍCULO	RUTA	COSTOS FIJOS			COSTOS VARIABLES		
		Conductor	Ayudante	Combustible	Aceite	llantas	Demoras
V_6	R_1	50.000		30.000	993,7	703,435	Si hay cuesta \$10/Lt

Nota: Costos fijos y variables de ruteo en la empresa E_5 de Buenavista. El costo de las demoras fue dado por los empresarios en la encuesta. *Fuente:* Elaboración propia.

Acorde a lo anterior, los costos totales (CF+CV) para (E_5R_1), se calcula en \$81.697,13 sin tener en cuenta costos por mantenimiento, imprevistos y de contratos adicionales de otros vehículos por daño del vehículo durante la ruta.

En lo referente al costo de multa por unidad de tiempo tardío o antes, en Buenavista se proyecta un valor de \$71,8/min.

5.7.4 Sistema de Ruteo en las empresas focalizadas del Municipio de Sincelejo

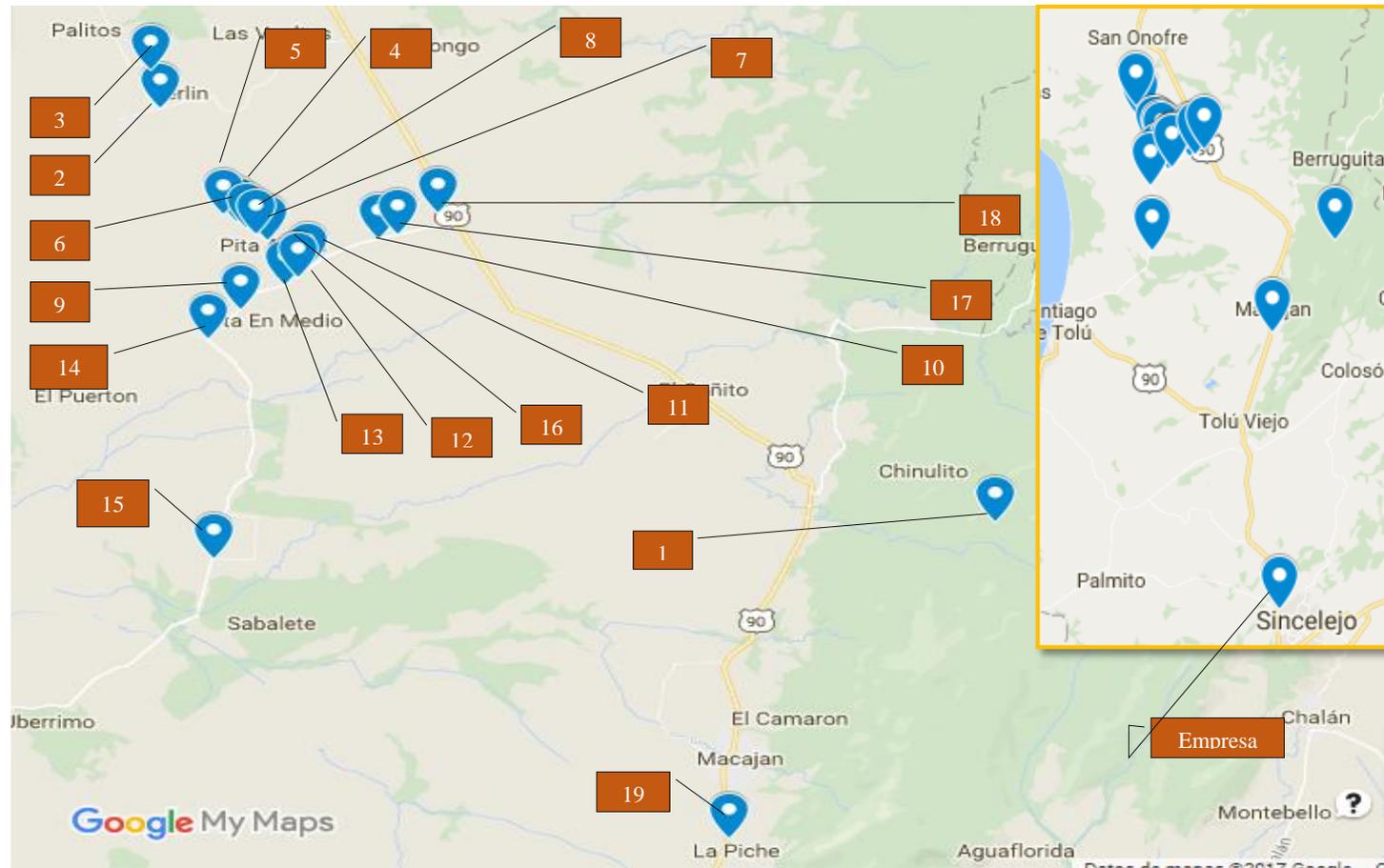
El municipio de Sincelejo, capital del departamento de Sucre tiene una extensión de 278,4Km² y se aplicaron encuestas a solo (5) empresa productora de lácteos, de las cuales solo 2 cumplían con los requisitos de la delimitación y solo una, permitió la realización de una sola ruta. En tal sentido, se realizó acompañamiento a la ruta en un total de veinte (20) unidades productivas/ganaderías, que se evidencia en la figura 39. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 16
Datos recolectados para el modelo de ruteo - Sincelejo

Ruta	Vehículo Utilizado	Capacidad (Peso Kg)	Empresa	Ubicación			Distancia (km)	Tiempo (min)	Lt Recogidos
				N	W	Altura			
R1	CHEVROLET NPR-TURBO MO 93	4500	E6	09°35,3 28'	075°22,2	43	36	35	33
				09°40,7	075°31,2	8	55,8	58	14
				09°41,3	075°31,3	9	57,2	60	103
				09°39,2	075°30,4	14	51	56	189
				09°39,4	075°30,5	11	51,3	57	87
				09°39,2	075°30,2	14	49,8	55	44
				09°39,0	075°30,0	19	50	54	105
				09°39,1	075°30,1	14	50,2	55	20
				09°38,1	075°30,3	13	51	54	80
				09°39,0	075°28,8	18	47	48	300
			09°38,6	075°29,6	19	48,9	51	14	
			09°38,5	075°29,7	18	49	51	17	
			09°38,4	075°29,8	17	50,1	52	48	
			09°37,7	075°30,7	3	52	56	23	
			09°34,8	075°30,6	1	58	64	129	
			09°38,5	075°29,7	17	49,1	51	63	
			09°39,1	075°28,6	15	47	47	70	
			09°39,4	075°28,2	28	46	45	40	
			09°31,1	075°25,1	65	27,3	26	21	

Nota: Ubicación de las unidades productivas de leche relacionadas a la empresa E₆ procesadora de lácteos del Municipio de Sincelejo, Sucre. 2017. *Fuente:* Elaboración propia.

Rutas Sincelejo	
R ₁	
E ₆	17
1	18
2	19
3	E ₆
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	



Empresas		Recolección	Tiempo	Distancia	Costo
E ₆	R ₁	1.400 Lt	6 h 20 min	143,34 km	\$189.588,94

Figura 39. Ruteo para la recolección de leche de la empresa E₆ de Sincelejo, 2017. Fuente: Elaboración propia.

5.7.4.1 Detallado de la ruta del Municipio de Sincelejo

A continuación se detalla la relación entre el tiempo de servicio y la cantidad de litros recolectados en cada unidad productiva/ganadería.

✓ Ruta 1: Empresa 6 (E₆R₁):

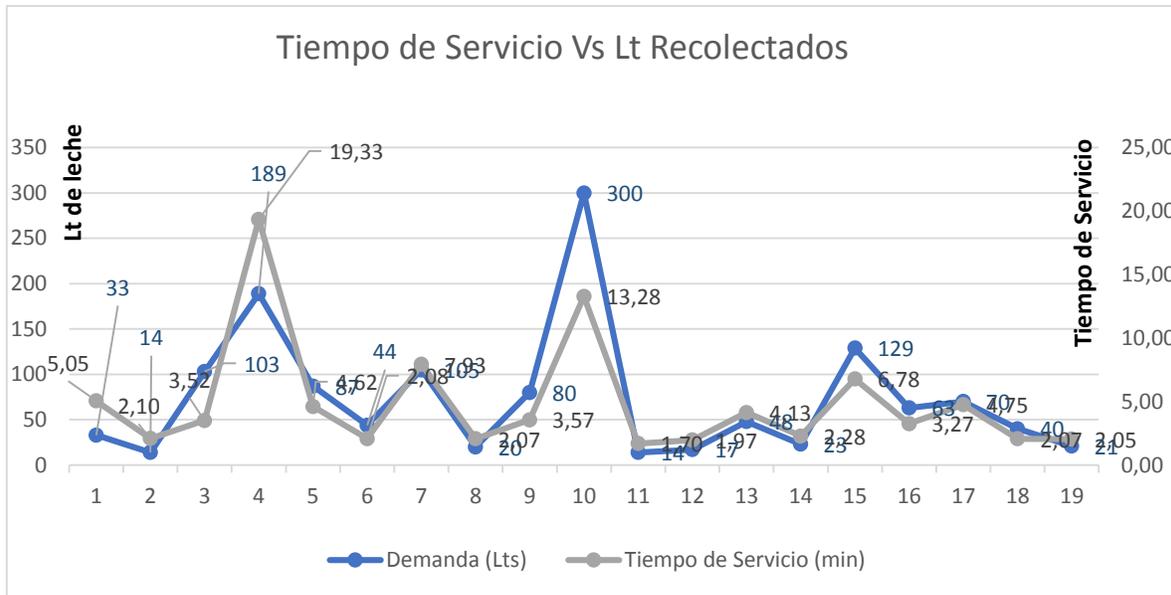


Figura 40. Tiempo de servicio Vs Litros recolectados en las Unidades productivas pertenecientes a la ruta R1 de la empresa E6. Fuente: Elaboración propia.

RI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tiempo de Servicio (min)	5,05	2,10	3,52	19,33	4,62	2,08	7,93	2,07	3,57	13,28	1,70	1,97	4,13	2,28	6,78	3,27	4,75	2,07	2,05
Demanda (Lt)	33	14	103	189	87	44	105	20	80	300	14	17	48	23	129	63	70	40	21

En la figura 40, se puede observar que existe una relación directa entre el tiempo de servicio y la demanda recolectada. A medida que aumenta la cantidad de leche a recolectar en cada punto, igualmente aumenta el tiempo de servicio, lo que hace que el tiempo de ruta del vehículo sea mayor.

5.7.4.2 Cálculo de los costos de la ruta de Sincelejo

Se tuvo en cuenta los costos fijos (CF) por utilización del vehículo en la ruta, que se derivan del pago del conductor y del ayudante, sumado a los costos variables (CV) de consumo de combustible y por desgaste del vehículo por kilómetros recorridos en términos de aceite, llantas y costo adicional por demoras, al igual que en los municipios de San Marcos, Galeras y Buenavista.

El costo promedio del cambio de aceite para el vehículo V₇ es de \$200.000 y el cambio se debe realizar cada 5.000 kilómetros por lo que el costo de cada kilómetro recorrido tiene un valor de \$40.

El costo del kit de llantas para para V₇ \$1'211.600, por lo representa un costo de \$26.9 por kilómetro recorrido. Los costos de la ruta se detallan a continuación. (Tabla 17).

Tabla 17
Costos de ruta para Sincelejo

VEHÍCULO	RUTA	COSTOS FIJOS		COSTOS VARIABLES			
		Conductor	Ayudante	Combustible	Aceite	llantas	Demoras
V ₇	R ₁	\$ 60.000		\$ 120.000	\$ 5.733,6	\$ 3.855,34	Si hay cuesta \$50/Lt

Nota: Costos fijos y variables de ruteo en la empresa E₆ de Sincelejo. El costo de las demoras fue dado por los empresarios en la encuesta. *Fuente:* Elaboración propia.

Acorde a lo anterior, los costos totales (CF+CV) para (E₆R₁), se calcula en \$189.588,94 sin tener en cuenta costos por mantenimiento, imprevistos y de contratos adicionales de otros vehículos por daño del vehículo durante la ruta.

El costo de multa por llegadas antes o después para Sincelejo es de \$184,21/min.

6. Capítulo III: Problemas de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea y capacitado.

Dentro de la cadena de suministros de lácteos, el proceso de transporte para el aprovisionamiento y transformación de la leche cruda juega un papel fundamental debido que, ésta hace parte de los productos denominados perecederos, los cuales tienden a descomponerse rápidamente a causa de su alto contenido de agua y nutrientes, (Jaramillo & Areiza, 2012). En tal sentido, las demoras ocasionadas en el transporte del producto desde las ganaderías hasta las empresas procesadoras/acopiadoras por las distancias largas que se deben recorrer y el tiempo de vaciado del producto en los tanques de recolección del vehículo, pueden generar un alto crecimiento bacteriano y presencia de materiales extraños o nocivos en la leche, que repercuten en la disminución del volumen del producto, pérdidas en la materia prima, en los derivados lácteos y otros riesgos asociados a la producción y la salud, por lo cual, se debe garantizar que el transporte sea un proceso eficiente, que además de mitigar los posibles efectos descritos, también sea amigable con el ambiente en términos de disminución de los contaminantes emitidos (CO_2) por el consumo de combustible, (Mariscal, Ibáñez, & Gutiérrez, 2013).

6.1 Modelo conceptual

Teniendo en cuenta los problemas potenciales del proceso de transporte e la leche cruda, El VRP Pickup and Delivery Simultáneo con ventanas de tiempo, capacitado, flota heterogénea con minimización de emisiones y además, multidepósito, pretende alcanzar los siguientes objetivos que permitan hacer más eficiente el proceso:

- (1) Minimizar los costos del aprovisionamiento.
- (2) Minimizar los tiempos de demoras en la recolección de la leche cruda.
- (3) Minimizar el uso de energía y emisiones de CO_2 .

El modelo puede ser representado a través de un grafo dirigido $G(N, V)$, donde N representa un conjunto de vértices, el cual es dividido en dos subconjuntos: $N_u = \{n_1, n_2, n_3 \dots n_n\}$ es el conjunto de nodos o unidades productivas (ganaderías) a los cuales visitar, en los cuales se realizarán recogidas (pickup) y entregas (delivery) de manera simultánea, bajo el enfoque que pretende que al momento de recolectar la leche, se descarguen los recipientes vacíos del vehículo los cuales quedarían a disposición de la unidad productora y se carguen los recipientes que ya se encontraban llenos con el producto y asignados con anterioridad a esa unidad, para efectos de disminuir tiempos de espera en el llenado de los recipientes de recolección del vehículo. $N_d = \{n_{n+1}, n_{n+2}, n_{n+3} \dots n_{n+d}\}$ Que representa el conjunto de centros de acopio o depósitos y por último $N = \{N_u \cup N_d\}$, que será el conjunto de arcos. (Figura 41).

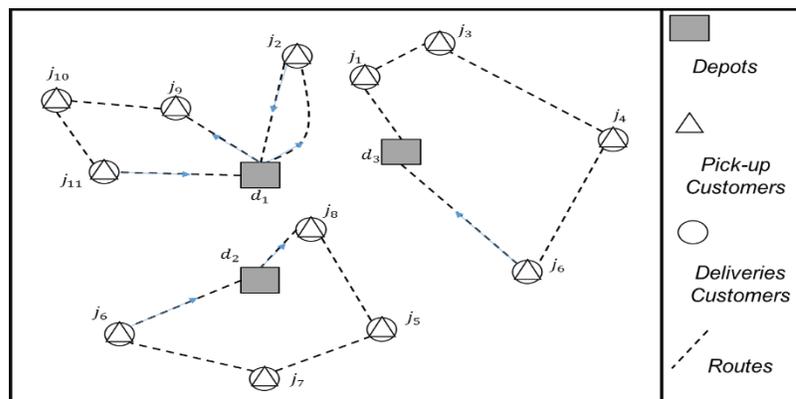


Figura 41. Representación del MDVRPSPD. Fuente: construcción propia.

De igual modo, se consideran diferentes tipos de vehículos que integran la flota de transporte $V = \{k_1, k_2, k_3 \dots k_n\}$, y su capacidad de carga es limitada Q_k debido al número de recipientes máximo que contienen el producto y que puede transportar el vehículo.

Las unidades productivas presentan una oferta del producto a recoger p_j y una cantidad de recipientes a descargar d_j . El cargue y descargue se debe hacer de manera simultánea para disminuir tiempos de recolección. (Figura 42).

Las unidades productivas deben ser servidas dentro de una ventana de tiempo $\{a_i, b_i\}$, (a_i , horario más temprano de llegada a la unidad productiva i y b_i horario más tarde de llegada a la unidad productiva i), debido que la leche es un producto altamente perecedero, (Castillo & Bermeo, 2013), por lo que existe un tiempo de servicio estipulado para la recolección del producto s_i y un tiempo máximo de ruta para los vehículos $Tmax_k$.

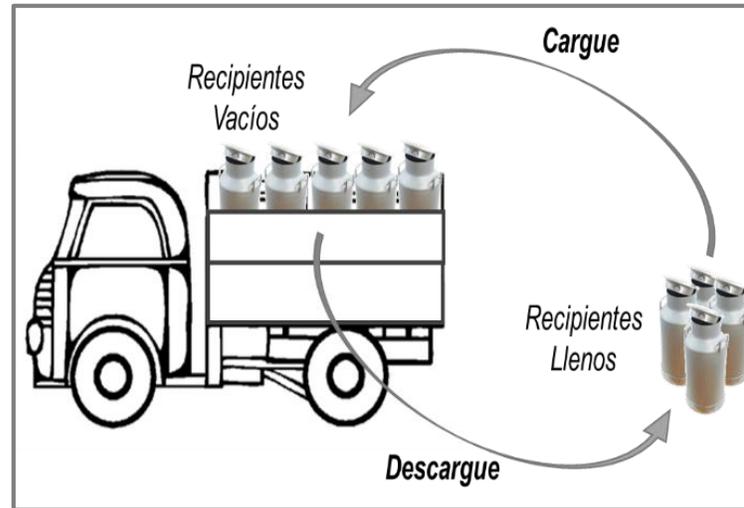


Figura 42. Cargue y descargue simultáneo de la Leche. Fuente: Propia.

Se consideran ventanas de tiempos suaves, por lo que se permite violar la restricción aunque esto incurre en una penalización económica m_i , que afectará negativamente a la función del costo, si llega antes de la ventana de tiempo Va_i o llega después Vb_i .

Para calcular el consumo de energía del vehículo, la relación entre el consumo de energía en términos de consumo de combustible y la emisión de gases de efecto invernadero, se aborda a partir de (Hernandez & Rafael, 2010) similar a (Kara *et al.*, 2007), conociendo que:

$$W = F * C$$

Donde W es el trabajo, F es la fuerza y C es la distancia. Para el caso de los vehículos, existen varias fuerzas que actúan al momento de poder realizar un movimiento, estas fuerzas son: (Fuerza aerodinámica f_1 , Fuerza de rodamiento f_2 , Fuerza por pendiente f_3 y Fuerza por inercia f_4), (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, 2007). Por lo que,

$$W = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) * C$$

Estas fuerzas afectan el consumo de combustible del vehículo teniendo en cuenta las velocidades y la carga, de tal manera que, a altas velocidades la principal resistencia es la aerodinámica, y en cuanto a las velocidades bajas, la causa que prevalece es el peso que carga el vehículo. Estas fuerzas se calculan a partir de las siguientes ecuaciones, (Hernandez & Rafael, 2010):

$$f_1 = jC_w R_0 S V^2$$

$$f_2 = C_r w \cos \theta$$

$$f_3 = w \sin \theta$$

$$f_4 = ma \left(u + \frac{n}{r_t^2} \right)$$

En donde, j , u y n son constantes que toman valores de 0.5, 1.04 y 0.06 respectivamente, C_w es el coeficiente de arrastre, R_0 es la densidad del aire, S es el área frontal del vehículo y V es la velocidad del vehículo. Por otra parte, C_r es el coeficiente de resistencia al rodamiento, w es el peso del vehículo, θ es el ángulo de la pendiente, a Es la aceleración del vehículo, m es la masa y r_t^2 es la relación de paso de la transmisión, en la cual se emplea un 6% de la eficiencia energética del combustible. En este sentido, conociendo que $w = m * g$. Siendo g la gravedad, se tiene que:

$$W = \left[jC_w R_0 S V^2 + m \left[(C_r \cos \theta + \sin \theta) g + a \left(u + \frac{n}{r_t^2} \right) \right] \right] C \quad (1)$$

Esta ecuación es similar a Bektas & Laporte (2011), quienes establecen que $P_{ij} = \alpha_{ij} (m + f_{ij}) d_{ij} + \beta V_{ij}^2 d_{ij}$. En donde, P_{ij} es el consumo de combustible por el trabajo del vehículo en términos de energía, α_{ij} es una constante específica para el arco (i, j) y β es una constante específica para el vehículo. m es la tara (peso del vehículo vacío), f_{ij} es la carga del vehículo en el arco (i, j) , d_{ij} es la distancia y V_{ij}^2 es la velocidad del vehículo.

Sin embargo, para hallar el valor de α_{ij} se tiene Para el cálculo del costo de multa por unidad de minuto, se considera el costo de demora por cada litro, el total de litros recolectados y el tiempo total de la ruta. De esta manera, los costos por demora para cada ruta son \$224,75/min, \$359,48/min y \$226,37/min.

que $\alpha_{ij} = a + g\text{Sin}\theta_{ij} + gCr\text{Cos}\theta_{ij}$. En donde, g es la constante de gravedad en m/s^2 . a es la aceleración del vehículo en m/s^2 . Cr es el coeficiente de resistecia por rodadura. θ_{ij} es el ángulo para el arco (i, j) . Sin tener en cuenta el factor de relación de paso de la transmisión del vehículo en la aceleración $(u + \frac{n}{rt_k^2})$.

En cuanto a la constante β , se calcula para cada tipo de vehículo como $\beta = 0,5 CdA\rho$. En donde Cd corresponde al coeficiente de arrastre. A Es la superficie frontal del vehículo en m^2 . ρ Es la densidad del aire en kg/m^3 .

Similar a Bektas & Laporte (2011), es posible descomponer la ecuación (1) teniendo en cuenta que el vehículo tiene un peso estando vacío (tara) y otro cuando lleva cargas en un arco (i, j) , por lo que se agrupan las fuerzas que dependen del peso (f_2, f_3 y f_4) expresandose de la siguiente manera:

$$f_2 + f_3 + f_4 = \left[(\text{sen}\theta_{ij} + Cr\text{cos}\theta_{ij})g + ac_k \left(u + \frac{n}{rt_k^2} \right) \right] C_{ij}m_k \quad (2)$$

$$f_2 + f_3 + f_4 = \left[(\text{sen}\theta_{ij} + Cr\text{cos}\theta_{ij})g + ac_k \left(u + \frac{n}{rt_k^2} \right) \right] C_{ij}(Z_{ijk} + Y_{ijk}) \quad (3)$$

La distancia está representada por C_{ij} en m . La tara m_k en Kg . La carga del vehículo en un arco (i, j) es $(Z_{ijk} + Y_{ijk})$ en Kg , siendo Z_{ijk} la cantidad de producto descargados en un arco (i, j) y Y_{ijk} la cantidad de productos recogidos en el mismo arco. La aceleración es ac_k en m/s^2 . La gravedad es g en m/s^2 . El coeficiente de resistencia al rodamiento es Cr dado en Kg/Ton y por último rt_k es la relación de paso de la transmisión. La operación $(\text{sen}\theta_{ij} + Cr\text{cos}\theta_{ij})g + ac_k \left(u + \frac{n}{rt_k^2} \right)$, puede ser expresada por ∂_{ijk} .

Para la fuerza de aerodinámica relacionada directamente con la velocidad del vehículo se mantiene la fórmula,

$$f_1 = CwR_0AS_kV_{ij}^2C_{ij} \quad (4)$$

Siendo, Cw el coeficiente de arrastre, AS_k el área frontal del vehículo en m^2 , R_0 la densidad del aire en kg/m^3 y V_{ij} la velocidad del vehículo en km/hr .

Para determinar la velocidad en un arco (i, j) , se conoce que el vehículo ha debido detenerse en el nodo i para realizar el servicio, por lo que la velocidad en ese punto se hace 0 ($V_0 = 0km/h$). Luego, para desplazarse del nodo i hacia el nodo j debe acelerar hasta alcanzar la velocidad deseada.

En este proceso, es posible trabajar en dos tramos; el primer tramo corresponde a la aceleración inicial del vehículo hasta alcanzar una velocidad promedio ente $60km/h$ y $80km/h$. Y el segundo tramo hace referencia al vehículo en una velocidad constante. El vehículo tiende a consumir más combustible en el primer tramo, por lo que las revoluciones Rpm aumentan, pero solo por un lapso. (Figura 43).

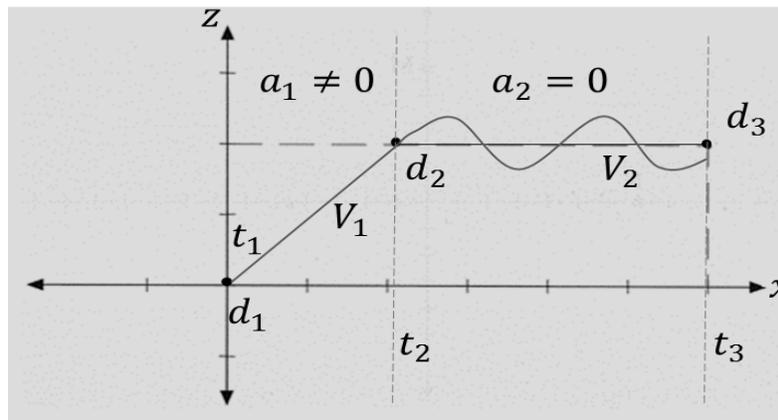


Figura 43. Velocidad del vehículo en el arco (i, j) . Fuente: Elaboración propia

Para el primer tramo, donde la $a_1 \neq 0$, la velocidad se puede calcular por medio de $V_1 = a_1 * t_2$ y en el siguiente tramo, se calcula a través de $V_2 = \frac{d_3 - d_2}{t_3 - t_2}$, asumiendo la velocidad como constante y convirtiendo $a_2 = 0$.

El cálculo de d_2 se realiza mediante $x = x_0 + V_0 t_2 + \frac{1}{2} a_1 t_2^2$. Pero $V_0 = 0$ debido que parte de reposo y como se da una distancia C_{ij} establecida en para un arco (i, j) , se considera a $x_0 = 0$, quedando $d_2 = \frac{1}{2} a t_2^2$.

Para el segundo tramo, como V_2 inicia desde d_2 , se calcula que $V_2 = \frac{d_3 - \frac{1}{2} a_1 t_2^2}{t_3 - t_2}$.

Para efectos del modelo, se conoce la distancia entre de los arcos y el tiempo de viaje entre ellos. Ahora, se calcular las velocidades mediante,

$$V_{t_{ij}} = (ac_k t_2) + \left[\frac{C_{ij} - \left(\frac{1}{2} ac_k t_2^2 \right)}{TT_{ij} - t_2} \right] \quad (5)$$

Por otra parte, no es posible asumir que ambas velocidades tienen el mismo valor $V_{total} = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$, sino, que hay que darle un peso a cada una, y éste se calcula mediante el tiempo en que el vehículo haya permanecido en una de las velocidades.

En este sentido se puede calcular asumiendo que C_{ij} equivalen al 100% de la distancia y se obtiene que, $d = \left(\frac{C_{ij} - \left(\frac{1}{2} ac_k t_2^2 \right)}{C_{ij}} \right)$

$$V_{t_{ij}} = (ac_k t_2)(1 - d) + \left[\frac{C_{ij} - \left(\frac{1}{2} ac_k t_2^2 \right)}{TT_{ij} - t_2} \right] d \quad (6)$$

Una vez calculada la velocidad en un arco (i, j) , la aceleración que se emplea en ∂_{ijk} , tendrá la misma proporción en términos de la distancia empleado en el arco. Por lo que ahora ∂_{ijk} se calculará:

$$\partial_{ijk} = ((\text{sen}\theta_{ij} + Crcos\theta_{ij})g)d + ac_k \left(u + \frac{n}{rt_k^2} \right) (1 - d) \quad (7)$$

Cabe resaltar que al momento de realizar un cargue y/o descargue el vehículo debe detenerse en el nodo, por lo que hay un consumo de combustible mientras el vehículo está en ralentí (motor encendido sin acelerar, con o sin embrague manteniendo un mínimo de

revoluciones por minuto) durante el tiempo de servicio S_i , el cual consume el 17% de la energía por cada litro de combustible, (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, 2007). (Figura 44).

Según Ramos *et al* (2005), el consumo de combustible de un vehículo en ralentí es de 1 lt/h , pero dados los efectos del calentamiento global, se han venido desarrollando motores que presentan un mejor rendimiento, por lo que el consumo en ralentí se puede calcular entre $0,5 \text{ a } 0,7 \text{ lt/h}$, (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, 2005).

En este sentido el cálculo del consumo en este estado, teniendo en cuenta el tiempo de duración del servicio, se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Consumo en ralentí} = \left(\mathcal{R} \frac{S_i}{60} \right) \quad (8)$$

Donde \mathcal{R} es el consumo en ralentí del vehículo y S_i es el tiempo de servicio en el nodo i .

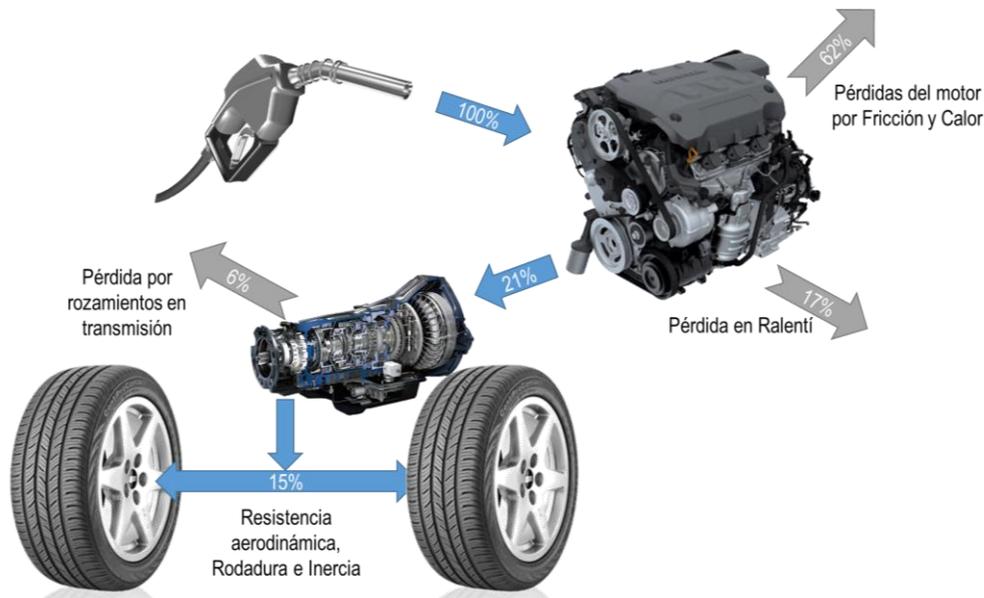


Figura 44. Pérdidas de energía del combustible en un vehículo. Fuente: Adaptado de (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, 2007).

En cada nodo es posible medir la posición X, Y, Z , siendo Z la altura del nodo i con respecto al nivel del mar. Por lo que teniendo este valor para cada unidad productiva i , es posible calcular el seno y coseno del ángulo θ a partir de las fórmulas:

$$\text{Sen}\theta = \frac{\text{Cateto Opuesto}}{\text{Hipotenusa}}, \quad \text{Cos}\theta = \frac{\text{Cateto Adyacente}}{\text{Hipotenusa}}$$

En este caso, la hipotenusa es la distancia entre los nodos C_{ij} y el cateto opuesto se calcula a partir de altura Z_i de cada par nodos pertenecientes al arco (i, j) . (Figura 45).

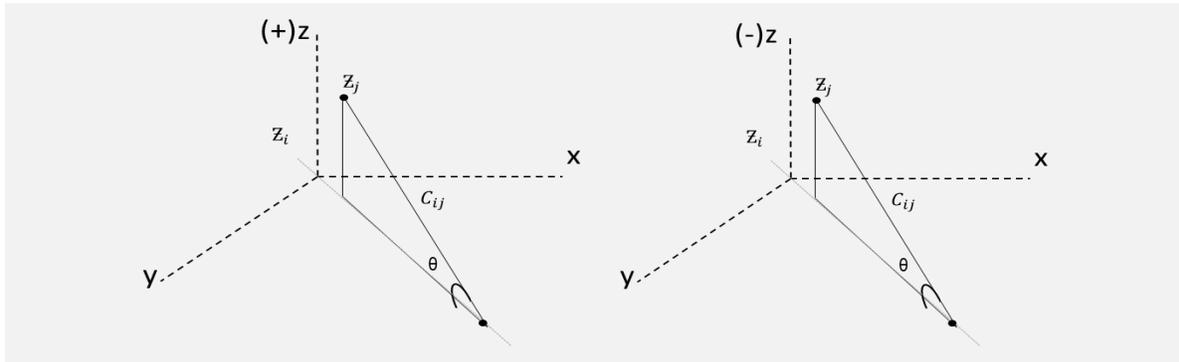


Figura 45. Cálculo del Seno y Coseno del ángulo θ de los nodos. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que se obtiene que:

$$\text{Sen}\theta = \frac{Z_j - Z_i}{C_{ij}}, \quad \text{Cos}\theta = \frac{\sqrt{C_{ij}^2 - (Z_j - Z_i)^2}}{C_{ij}} \quad (9)$$

En tal sentido, reemplazando (6) en ∂_{ijk} , es posible expresar la función como:

$$\partial_{ijk} = \left(\frac{Z_j - Z_i}{C_{ij}} + Cr \frac{\sqrt{C_{ij}^2 - (Z_j - Z_i)^2}}{C_{ij}} \right) g) d + ac_k \left(u + \frac{n}{rt_k^2} \right) (1 - d) \quad (10)$$

Ahora, para calcular el costo de combustible consumido por el vehículo en la ruta $[W + (\mathcal{R} \frac{S_i}{60})]$, (ecuaciones (1) y (5)), solo multiplicamos por el costo de combustible cf en \$/litro.

En cuanto al costo ce de emisiones de CO_2 se calculan multiplicando el costo de emisiones de una tonelada de CO_2 por el total emitido por el consumo de combustible en cada arco (i, j) . La cantidad de emisiones de CO_2 se obtienen realizando lo siguientes cálculos a partir del método de sectorial, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2012).

$$e = \sum_{j=1}^n (\text{combustible Consumido}_j * \text{Factor de Emisión}_j * \text{Fracción Oxidada}_j * \frac{44}{12})$$

En este caso, el combustible consumido calculado a través de $[W + (\mathcal{R} \frac{S_i}{60})]$ se multiplica por el factor de emisión fe y la fracción oxidada del combustible, que para petróleos y derivados es del 0,99 según la tabla dada en el Manual de Referencia Volumen III, (IPCC, 2006).

$$ce = [W + (\mathcal{R} \frac{S_i}{60})] * fe * 0,99 * \frac{44}{12} * (\$/ton \text{ de } CO_2 \text{ emitida}) \quad (11)$$

Por lo que sumando los costos de consumo de combustible y de emisión de CO_2 , $(cf + ce)$ es posible obtener: $(cf + ce) [W + (\mathcal{R} \frac{S_i}{60})]$, siendo $ce = fe * 0,99 * \frac{44}{12} * (\$/ton \text{ de } CO_2 \text{ emitida})$.

Para considerar el tiempo de servicio s_i que se demora cada unidad productiva, se tomó la medición del tiempo de descarga de un recipiente vacío durante las rutas, con lo que se calculó que el tiempo medio de descarga corresponde a 10 segundos. Adicionalmente, el tiempo de carga de un recipiente lleno, teniendo en cuenta el tiempo de medición de la cantidad de leche, en promedio fue de un minuto. Por lo cual, el tiempo de servicio s_i se calculó de la siguiente manera:

$$s_i = ((d_i * 1) + (p_i * 0,17)) \quad (12)$$

Acorde a todo lo anterior, para la construcción del modelo se realiza considerando los siguientes supuestos:

- ✓ El producto (leche cruda) estará contenido en recipientes de 40 Litros.
- ✓ En cada unidad productiva/ganadería, se debe recoger recipientes llenos y descargar vacíos.
- ✓ La capacidad del vehículo está dada por el número de recipientes que puede cargar sin afectar el producto.
- ✓ Los centros de acopio tienen una capacidad mínima necesaria para la producción diaria y una capacidad máxima instalada para el acopio.

Este modelo, se define de tal manera que pueda cumplir las siguientes restricciones:

- ✓ Cada ruta debe iniciar y terminar en el mismo centro de acopio.
- ✓ Cada unidad productiva debe pertenecer exclusivamente a una ruta de un centro de acopio.
- ✓ Cada unidad productiva debe ser servida por un solo vehículo.
- ✓ No se puede exceder la capacidad del vehículo.
- ✓ Las actividades de cargue y descargue se llevan a cabo de forma simultánea en cada unidad productiva siempre que haya demanda de recolección y entrega.
- ✓ Cada unidad productiva debe ser servida dentro de una ventana de tiempo, sino se incurre en costos de penalización.
- ✓ Se debe entregar una cantidad mínima de producto a cada centro de acopio y no se puede exceder la capacidad máxima de éstos.

- ✓ La duración del tiempo de viaje de los vehículos debe ser menor o igual al tiempo de ruta máximo permitido.
- ✓ El número de vehículos utilizados, debe ser menor o igual al número de vehículos disponibles.
- ✓ El tiempo en ralentí del vehículo no debe exceder los 5 minutos.

6.2 Modelo matemático para el problema de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea y capacitado.

En el modelo matemático construido se tienen en cuenta los modelos propuesto por (Bektas & Laporte, 2011), (Herazo, 2012), (Tajik, Tavakkoli-Moghaddam, Vahdani, & Mousavi, 2014) y (Acvi & Topaloglu, 2016).

6.2.1 Índices y Conjuntos

i, j, h : Índice de clientes o unidades productivas

k : Índice de vehículos

N_u : Conjunto de Centros de Acopio $\{1, 2, 3 \dots u\}$

N_d : Conjunto de Unidades Productivas $\{1, 2, 3 \dots d\}$

N : Conjunto de todas las unidades productivas y centros de acopio $N = N_u \cup N_d$

K : Flota de Vehículos $\{1, 2, 3 \dots k\}$

6.2.2 Parámetros

Q_k : Capacidad del vehículo $k \in K$ (Unidades)

F_k : Costo fijo por uso del vehículo $k \in K$

V_k : Costo variable por uso del vehículo $k \in K$

C_{ij} : Distancia entre las unidades productivas $i \in N, j \in N$

p_i : Oferta del producto a recoger en las unidades productivas $i \in N_u$

d_i : Demanda a descargar en las unidades productivas $i \in N_u$

TT_{ij} : Tiempo de viaje del vehículo k entre las unidades productivas $i \in N, j \in N$

a_i : Horario más temprano de llegada a la Unidad Productiva $i \in N_u$

b_i : Horario más tarde de llegada a la Unidad Productiva $i \in N_u$

$Tmax_k$: Tiempo máximo de ruta del vehículo $k \in K$

S_i : Tiempo de servicio en la unidad productiva $i \in N_u$

m_i : Costo unitario de multa por violación de ventana de tiempo en la unidad productiva $i \in N_u$

W_k : Peso del vehículo vacío.

ac_k : Aceleración del vehículo $k \in K$.

Qm_j : Capacidad mínima que debe recibir el centro de acopio $j \in N_d$

Qmx_j : Capacidad máxima que puede recibir el centro de acopio $j \in N_d$

l_i : Altura del punto $i \quad i \in N$

rt_k : Relación del paso de la transmisión del vehículo $k \quad k \in K$

AS_k : Área de la superficie del vehículo $k \quad k \in K$

∂_{ijk} : Valor específico para el arco (i, j) a partir de las fuerzas de rodamiento, por pendiente y fuerza por inercia $i \in N, j \in N, k \in K$

6.2.3 Escalares

M : Número muy grande definido como 1,125 veces el tiempo máximo de trabajo del vehículo

rva : Peso de un recipiente vacío en Kg

$rlle$: Peso de un recipiente lleno en Kg

cf : Costo del combustible

ce : Costo emisiones de CO_2

Cr : Coeficiente de rodamiento en Kg/Ton

Cw : Coeficiente de arrastre

R_0 : Densidad del aire en kg/m^3

g : Gravedad m/s^2

t_2 : Tiempo de aceleración inicial en min

ts : Tiempo máximo de servicio en que se debe dejar el motor en ralentí en min

R : Consumo en ralentí del vehículo en Lt/hr

6.2.4 Variables de decisión

X_{ijk} : Variable binaria para la asignación del vehículo k al arco (i, j)

Y_{ijk} : Carga recogida en la unidad productiva por el vehículo k mientras recorre el arco (i, j) .

Z_{ijk} : Carga descargada en la unidad productiva por el vehículo k mientras recorre el arco (i, j) .

T_i : Momento de tiempo en que el vehículo llega al cliente i .

TR_k : Tiempo de ruta para el vehículo k .

Va_i : Violación de restricción de la ventana de tiempo por llegada antes a la Unidad Productiva i .

Vb_i : Violación de restricción de la ventana de tiempo por llegada después a la Unidad Productiva i .

λ_i : Variable de tiempo del vehículo en ralentí en el nodo i .

6.2.5 Funciones objetivo

Este modelo se ejecuta bajo tres objetivos de estudio, relacionados con la minimización de los costos fijos y variables en términos de la distancia recorrida por el vehículo, la minimización de las violaciones a las ventanas de tiempo y por último, la minimización de emisiones de CO₂.

6.2.5.1 Función Objetivo 1

Como se mencionó la primera función objetivo pretende la minimización de los costos fijos por uso de los vehículos y los costos variables calculados en término de la distancia total que recorre cada vehículo en la ruta asignada por el modelo.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{d \in N_d} \sum_{j \in N_u} \sum_{k \in K} F_k X_{djk} + \sum_{i, j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (V_k C_{ij}) X_{ijk} \quad (13)$$

6.2.5.2 Función Objetivo 2

En esta función se pretende la minimización del tiempo recorrido por el vehículo y así evitar incurrir en penalizaciones por violar las ventanas de tiempo en cada nodo.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i \in N_u} (m_i(Va_i + Vb_i)) \quad (14)$$

6.2.5.3 Función Objetivo 3

Con esta función se minimiza el consumo de combustible en litros por cada vehículo en cada ruta, para determinar el costo correspondiente por consumo y por emisiones de CO₂ equivalentes, tanto en movimiento, como en ralentí.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_3 = & + \sum_{i,j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \partial_{ijk} C_{ij} W_k X_{ijk} \\ & + \sum_{i,j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \partial_{ijk} C_{ij} (Z_{ijk} rva + Y_{ijk} rll) \\ & + \sum_{i,j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) CwR_0 AS_k Vt_{ij}^2 C_{ij} X_{ijk} \\ & + \sum_{i \in N_u} (cf + ce) \left(\mathcal{R} \frac{\lambda_i}{60} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

6.2.5.4 Función Multi-Objetivo

Entendiendo este problema de ruteo como una función multiobjetivo, se resuelve a través del método de suma ponderada, con el cual se asignan unos pesos α, β y γ a cada función objetivo Z_1, Z_2 y Z_3 respectivamente, quedando una única función.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \alpha \left[\sum_{d \in N_d} \sum_{j \in N_u} \sum_{k \in K} F_k X_{djk} + \sum_{i, j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (V_k C_{ij}) X_{ijk} \right] \\
 & + \beta \left[\sum_{i \in N_u} (m_i (V a_i + V b_i)) \right] \\
 & + \gamma \left[\sum_{i, j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \partial_{ijk} C_{ij} W_k X_{ijk} \right. \\
 & + \sum_{i, j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \partial_{ijk} C_{ij} (Z_{ijk} r v a + Y_{ijk} r l l e) \\
 & + \sum_{i, j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) C w R_0 A S_k V t_{ij}^2 C_{ij} X_{ijk} \\
 & \left. + \sum_{i \in N_u} (cf + ce) \left(\mathcal{R} \frac{\lambda_i}{60} \right) \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

Esta ecuación busca minimizar los costos fijos proporcionales al número de vehículos usados, los costos variables en función de la distancia recorrida, los costos de penalización por violación de la ventana de tiempo, los costos de consumo de combustible y emisiones de CO_2 ($cf + ce$), en términos del peso total del vehículo en cada arco (i, j) , su velocidad respectiva y el tiempo que demora en ralentí.

6.2.6 Restricciones

$$\sum_{j \in N: j \neq i} \sum_{k \in K} X_{ijk} = 1; \quad \forall i \in N_u \quad (17)$$

Cada unidad productiva es visitada exactamente una vez por un solo vehículo.

$$\sum_{i \in N: i \neq h} X_{ihk} = \sum_{j \in N: j \neq h} X_{hjk}; \quad \forall k \in K, \forall h \in N \quad (18)$$

Restricción de flujo en red; si un vehículo llega a un cliente, luego deberá salir de este cliente.

$$\sum_{d \in N_d} \sum_{j \in N_u} X_{djk} \leq 1; \quad \forall k \in K \quad (19)$$

Todo vehículo deberá salir de máximo un centro de acopio.

$$\sum_{i \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} Y_{jik} - \sum_{i \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} Y_{ijk} = p_j; \quad \forall j \in N_u \quad (20)$$

Ecuación de Pickup, asegura que todo lo que se recoja en las unidades productivas, sea igual a toda la oferta de las unidades productivas.

$$\sum_{i \in N: i \neq j} \sum_{k \in E_V} Z_{ijk} - \sum_{i \in N: i \neq j} \sum_{k \in E_V} Z_{jik} = d_j; \quad \forall j \in N_u \quad (21)$$

Ecuación de Delivery, asegura que todo lo que se descargue en las unidades productivas, sea igual a toda la demanda de las unidades productivas.

$$Y_{djk} = 0; \quad \forall d \in N_d, \forall j \in N_u, \forall k \in K \quad (22)$$

Asegura que la carga recogida mientras se inicia la ruta en el centro de acopio, es cero. Debido que, no hay oferta a recoger en el centro de acopio.

$$Y_{ijk} \leq M X_{ijk}; \quad \forall i, j \in N: i \neq j, \forall k \in K \quad (23)$$

Esta ecuación garantiza que si un arco i, j es realizado por el vehículo k , entonces una cantidad deberá ser recogida en ese arco.

$$Z_{idk} = 0; \forall d \in N_d, \forall j \in N_u, \forall k \in K \quad (24)$$

Asegura que todo se ha descargado al llegar al centro de acopio.

$$Z_{ijk} \leq MX_{ijk}; \forall i, j \in N: i \neq j, \forall k \in K \quad (25)$$

Esta ecuación garantiza que si un arco i, j es realizado por el vehículo k , entonces una cantidad deberá ser entregada en ese arco.

$$Y_{ijk} + Z_{ijk} \leq Q_k X_{ijk}, \quad \forall i, j \in N: i \neq j, \forall k \in K \quad (26)$$

Se garantiza que la carga total del vehículo en el arco (i, j) , no exceda su capacidad.

$$\sum_{j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} Y_{jdk} \leq Qm x_d \quad \forall d \in N_d \quad (27)$$

La carga de producto que los vehículos llevan al centro debe ser menor o igual a la cantidad de producto máxima $Qm x_d$ que puede recibir centro de acopio al que pertenecen.

$$\sum_{j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} Y_{jdk} \geq Qm_d \quad \forall d \in N_d \quad (28)$$

La carga de producto que los vehículos llevan al centro debe ser mayor o igual a la cantidad de producto mínimo Qm_d que debe recibir centro de acopio al que pertenecen.

$$T_j \geq TT_{dj} X_{djk}; \quad \forall d \in N_d, \forall j \in N_u, \forall k \in K \quad (29)$$

El instante de llegada a la primera instalación productiva j debe ser mayor o igual al tiempo de viaje desde el centro de acopio hasta la instalación j utilizando el vehículo k , siempre que la instalación sea precedida por el centro de acopio en la ruta.

$$T_j \geq T_i + s_i + TT_{ij} - M(1 - X_{ijk}); \quad \forall i, j \in N_u; i \neq j, \forall k \in K \quad (30)$$

El horario en que se visita a la unidad productiva j , no será menor al tiempo de visita de la unidad productiva i si ambas unidades productivas pertenecen a la misma ruta ($X_{ijk} = 1$). Se introduce M como un valor muy grande por la cual se multiplica las variables binarias definido como, en aquellos casos en que los nodos no pertenecen al mismo tour para evitar que se tenga en cuenta.

$$TR_k \geq T_i + s_i + TT_{id} - M(1 - X_{ijd}); \quad \forall i \in N_u, \forall d \in N_d, \forall k \in K \quad (31)$$

El tiempo total de viaje no debe ser menor al tiempo de visitar cualquier unidad productiva i más el tiempo fijo de servicio s_i y el tiempo que toma retornar al centro de acopio por la ruta de mínimo costo entre la unidad productiva y el centro de acopio TT_{id} .

$$TR_k \leq Tmax_k; \quad \forall k \in K \quad (32)$$

El tiempo de ruta no puede ser mayor al tiempo de ruta máximo establecido para el vehículo.

$$Va_i \geq a_i - T_i; \quad \forall i \in N_u \quad (33)$$

La cantidad de tiempo de violación a la ventana de tiempo será mayor o igual a la diferencia entre el horario más temprano de servicio y el tiempo de visita a la unidad productiva.

$$Vb_i \geq T_i - b_i; \quad \forall i \in N_u \quad (34)$$

La cantidad de tiempo de violación a la ventana de tiempo será o mayor igual a la diferencia entre el tiempo de visita a la unidad productiva, y el horario más tardío de servicio.

$$\lambda_i = \min\{S_i, ts\}; \quad \forall i \in N_u \quad (35)$$

La variable λ_i será el valor mínimo entre el tiempo de servicio S_i y el tiempo máximo que puede estar el vehículo en ralentí ts .

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (36)$$

$$Y_{ijk}, Z_{ijk} \in \mathbb{Z}^+ \quad (37)$$

$$T_i, Tr_k, Va_i, Vb_i, \lambda_i \in \mathbb{R}^+ \quad (38)$$

Se define la naturaleza de las variables del modelo.

Para la relajación del modelo, se puede asumir un solo tramo con la velocidad tomada como constante y su cálculo para cada arco (i, j) , se puede obtener mediante la fórmula:

$$\bar{V} = \frac{\text{Distancia total recorrida}}{\text{tiempo total transcurrido}}$$

Por lo que se tiene que,

$$f_1 = \frac{CwR_0AS_kC_{ij}^3}{2TT_{ij}^2} \quad (39)$$

Donde TT_{ij} es el tiempo en el arco (i, j) .

Teniendo en cuenta la ecuación (39), la aceleración del vehículo se convierte en 0 m/s^2 afectando a las ecuaciones (2) y (3), resultando la función objetivo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \alpha \left[\sum_{d \in N_d} \sum_{j \in N_u} \sum_{k \in K} F_k X_{djk} + \sum_{i, j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (V_k C_{ij}) X_{ijk} \right] + \beta \left[\sum_{i \in N_u} (m_i (V a_i + V b_i)) \right] \\
 & + \gamma \left[\sum_{i, j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \left[\frac{l_j - l_i}{C_{ij}} + Cr \frac{\sqrt{C_{ij}^2 - (l_j - l_i)^2}}{C_{ij}} \right] g C_{ij} W_k X_{ijk} \right. \\
 & + \sum_{i, j \in N_u: i \neq j} \sum_{k \in K} \left((cf + ce) \left[\frac{l_j - l_i}{C_{ij}} + Cr \frac{\sqrt{C_{ij}^2 - (l_j - l_i)^2}}{C_{ij}} \right] g C_{ij} (Z_{ijk} r_{vac} + Y_{ijk} r_{llen}) \right) \\
 & + \sum_{i, j \in N: i \neq j} \sum_{k \in K} (cf + ce) \frac{C_w R_0 A S_k C_{ij}^3}{2 T T_{ij}^2} X_{ijk} \\
 & \left. + \sum_{i \in N_u} (cf + ce) \left(\mathcal{R} \frac{\lambda_i}{60} \right) \right] \quad (40)
 \end{aligned}$$

Sujeto a las ecuaciones (17) a (38).

7. Capítulo IV: Solución del modelo de ruteo de vehículos pickup and delivery con ventanas de tiempo, flota heterogénea capacitada

7.2 Frontera de Pareto aplicada al modelo construido

Para dar una solución óptima no dominada al modelo matemático multi-objetivo construido, se seleccionó el método de sumas ponderadas asignando los pesos α , β y γ a cada función objetivo, transformándolo en un modelo mono-objetivo de la siguiente manera: $\min z = \alpha(f_1(x)) + \beta(f_2(x)) + \gamma(f_3(x))$.

Se selecciona este método, debido que en el estudio de Aranda & Orjuela (2015), este es el método escalarizado de segundo mayor uso en la literatura especializada, el principal es el de programación por metas (*goal programming*). Sumado a esto, el método de sumas ponderadas es utilizado con regularidad en los problemas de VRP pickup and delivery multi-objetivo, tales como el de (Sombuntham & Kachitvichyanukul, 2010), en donde trabajaron tres objetivos relacionados a la distancia, costo fijo y las multas por solicitudes no programadas. (Wang, 2012) Trabajó un modelo bi-objetivo que buscaba minimizar costos de despacho y costos por distancia. Asimismo, (Li, Pardalos, Sun, Pei, & Zhang, 2015), cuyo modelo bi-objetivo pretendía minimizar el número de vehículos y el costo de viaje.

Como una de las características de la suma ponderada, se observó para el modelo, que en diversas variaciones que se realizaron en los pesos, se obtuvo los mismos resultados extremos eficientes, (Mavrotas, 2009), aunque sí existieron variaciones en los tiempos computacionales. Las conmutaciones de pesos con las que se trabajó fueron las siguientes. (Tabla 18).

Tabla 18
Ponderaciones asignadas a cada objetivo

	Variación de los pesos																
α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,14	0,145	0,15	0,15	0,16	0,2	0,2	0,2
β	0,9	0,8	0,65	0,35	0,15	0,05	0,8	0,6	0,85	0,85	0,8	0,5	0,47	0,7	0,55	0,5	
γ	0,05	0,15	0,3	0,6	0,8	0,9	0,1	0,3	0,01	0,005	0,05	0,35	0,37	0,1	0,25	0,3	
α	0,2	0,2	0,21	0,22	0,3	0,3	0,31	0,4	0,475	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,85	0,9	
β	0,48	0,45	0,48	0,52	0,5	0,2	0,48	0,45	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,1	0,05	
γ	0,32	0,35	0,31	0,26	0,2	0,5	0,21	0,15	0,475	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,05	0,05	

Nota: Variaciones realizadas a los pesos asignados a cada objetivo para la construcción de la frontera de pareto y el análisis de dominancia. Fuente: construcción propia.

A pesar de las diversas pruebas realizadas al modelo con la diversificación de los pesos a cada uno de los objetivos, solo se obtuvieron cinco soluciones diferentes, pero con diferencia de tiempos computacionales para cada sumatoria de pesos, las cuales fueron clave para la selección de la solución óptima, debido que al amentar el número de nodos, el problema requiere mayor tiempo computacional.

Para la realización del análisis de dominancia, se construyeron las gráficas correspondientes con los valores obtenidos según los pesos dados a cada objetivo y se compararon de dos en dos y los tres al mismo tiempo. Se entiende que $f_1(x)$ es el objetivo de minimización de costo fijo y costos variables por distancia, $f_2(x)$ corresponde a las multas por violaciones de tiempo y $f_3(x)$ es el objetivo relacionado con las emisiones de CO₂. (Figura 46).

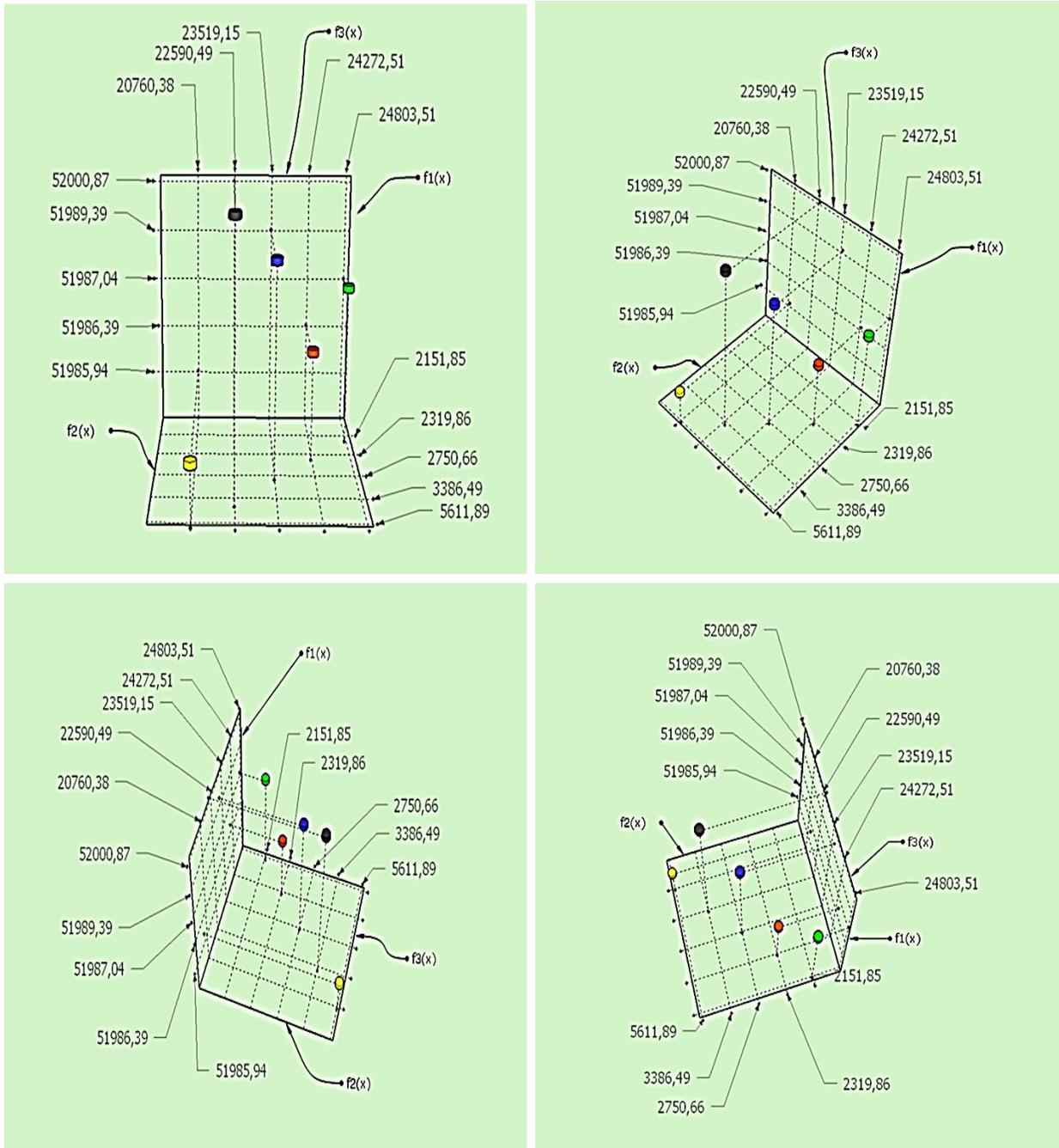


Figura 46. Gráfica en 3D de los resultados obtenidos en las funciones objetivo. Fuente: construcción propia.

Las figuras anteriores muestran la gráfica de los valores obtenidos según los pesos w_i asignados y se distinguen por colores y valores, tal como se muestra en la siguiente tabla. (Tabla 19).

Tabla 19
Valores dados a los pesos agrupados por soluciones

Variación de los pesos																	
α	0,05	0,1	0,31	0,4	0,2	0,22	0,3	0,85	0,21	0,2	0,2	0,15	0,16	0,2	0,8	0,9	
β	0,65	0,6	0,48	0,45	0,55	0,52	0,5	0,1	0,48	0,48	0,5	0,5	0,47	0,45	0,1	0,05	
γ	0,3	0,3	0,21	0,15	0,25	0,26	0,2	0,05	0,31	0,32	0,3	0,35	0,37	0,35	0,1	0,05	
Tiempo duración (min)	12,78	13,87	8,78	10,58	8,92	6,88	9,3	1,1	6,18	7,36	13,57	4,59	4,95	3,64	1,35	0,47	
	\$ 78.578,762								\$ 78.259,645				\$ 77.977,449				
α	0,05	0,5	0,6	0,7	0,05	0,3	0,05	0,475	0,2	0,1	0,15	0,05	0,05	0,145	0,85	0,14	
β	0,15	0,1	0,1	0,1	0,05	0,2	0,35	0,05	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,85	0,05	0,85	
γ	0,8	0,4	0,3	0,2	0,9	0,5	0,6	0,475	0,1	0,1	0,05	0,15	0,05	0,005	0,1	0,01	
Tiempo duración (min)	0,21	0,29	0,32	0,62	0,14	0,73	0,3	0,15	21,28	39,13	46,57	20,44	27,28	39,77	5,44	46,62	
	\$ 78.358,205								\$ 78.942,398								

Nota: Organización de los pesos según las soluciones obtenidas. Los conjuntos de datos están separados por colores según la solución obtenida. En total cinco soluciones. Fuente: construcción propia.

Teniendo en cuenta el comportamiento de los resultados en la gráfica 3D, se verificaron los resultados de cada objetivo uno versus otro, en donde se observa la frontera de pareto. (Figuras 47, 48, 49).

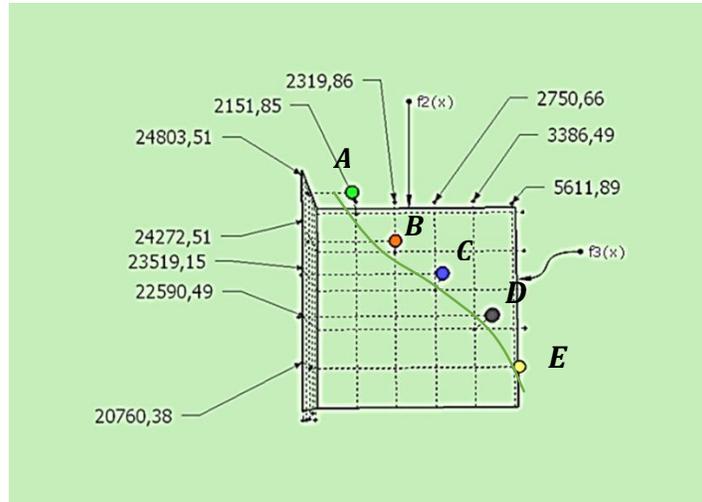


Figura 47. $f_3(x)$ vs $f_2(x)$. Frontera de Pareto. Fuente: construcción propia.

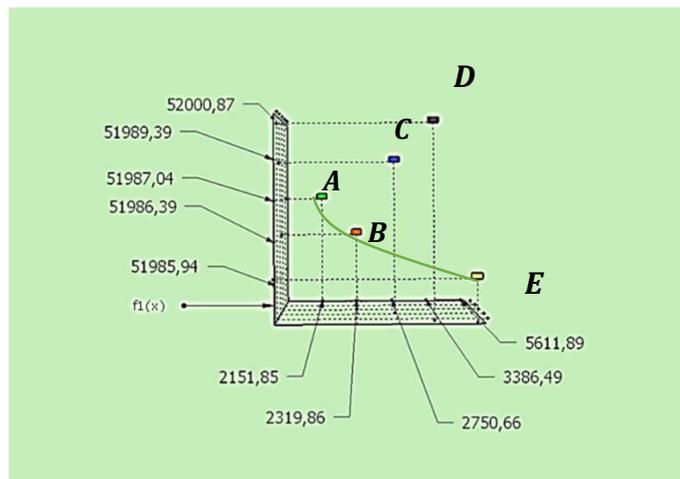


Figura 48. $f_1(x)$ vs $f_2(x)$. Frontera de Pareto. Fuente: construcción propia.

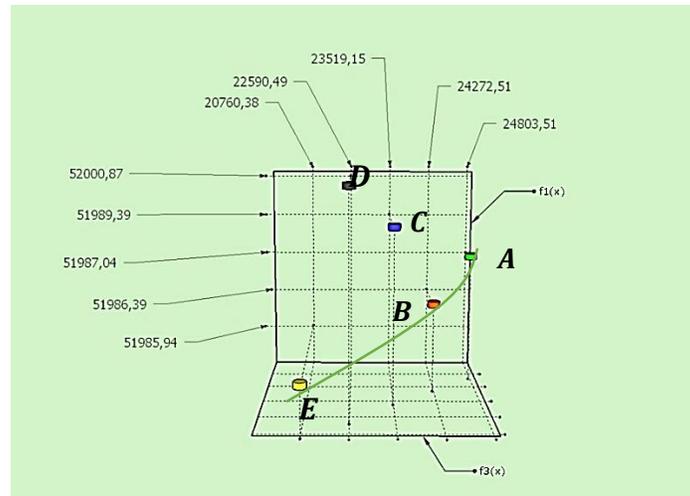


Figura 49. $f_1(x)$ vs $f_3(x)$. Frontera de Pareto. Fuente: construcción propia.

Tal como se evidencia en los gráficos, para todas las comparaciones entre las funciones ($f_1(x)$ vs $f_2(x)$), ($f_1(x)$ vs $f_3(x)$) y ($f_2(x)$ vs $f_3(x)$), se puede observar la frontera de Pareto conformada por los siguientes puntos en cada gráfica:

- ✓ $f_1(x)$ vs $f_2(x)$: En esta grafica se observa que el punto A y B dominan a C y D , ($A > C$ y D , $B > C$ y D) y la frontera de Pareto está compuesta por los puntos A , B y E . Por tanto, los puntos A , B y E son soluciones no-dominadas.
- ✓ $f_1(x)$ vs $f_3(x)$: Al igual que en la gráfica anterior, se evidencia la dominancia de los puntos A y B sobre a C y D , construyéndose la curva de Pareto sobre los puntos A , B y E , quienes son no- dominados.
- ✓ $f_2(x)$ vs $f_3(x)$: no se observa dominancia ($A \sim B \sim C \sim D \sim E$) y la frontera de Pareto está compuesta por los puntos A , B , C , D y E , las cuales son todas soluciones no- dominadas.

Acorde a esto, no hay una única solución no dominada, por lo cual el decisor eligió la solución preferida entre los puntos A , B y E , que se mantuvieron como soluciones no

dominadas, en todos los objetivos. El punto escogido fue *D* dado que representa el costo total menor siendo el objetivo buscado la minimización de los costos. (Tabla 20).

Tabla 20
Comparación de costos para las soluciones

<i>Soluciones</i>	<i>Costo por Distancias</i>	<i>Costo por Violación de Tiempo</i>	<i>Costo emisiones de CO₂</i>	<i>Costo Total</i>
<i>A</i>	51987,043	2151,846	24803,509	78942,398
<i>B</i>	51986,394	2319,858	24272,51	78578,762
<i>C</i>	51989,834	2750,658	23519,153	78259,645
<i>D</i>	52000,867	3386,088	22590,494	77977,449
<i>E</i>	51985,94	5611,888	20760,377	78358,205

Nota: Costos de cada objetivo para las cinco soluciones obtenidas. Fuente: construcción propia.

Para seleccionar el peso a utilizar, del conjunto de variaciones que arrojan como resultado el punto *D*, se tuvo en cuenta el tiempo computacional de respuesta del algoritmo, el cual varió con cada ponderación a pesar de que la solución fuera exactamente la misma.

El conjunto de variaciones de pesos que dieron como resultado la solución *D* se muestra en la siguiente tabla. (Tabla 21).

Tabla 21
Conjunto de variaciones de la solución D

Variaciones a los Pesos del punto D					
α	0,15	0,16	0,2	0,8	0,9
β	0,5	0,47	0,45	0,1	0,05
γ	0,35	0,37	0,35	0,1	0,05
Tiempo duración (min)	4,59	4,95	3,64	1,35	0,47

Nota: Variaciones realizadas a los pesos asignados a cada objetivo para la obtención de la solución D.

Tal como se observa, los pesos seleccionados fueron $\alpha = 0.9$, $\beta = 0,05$ y $\gamma = 0,05$, con los cuales se obtuvo una respuesta óptima en 0,47 minutos. Con un costo total de \$ 77.977,449.

7.3 Solución exacta con instancias de prueba

Como se menciona anteriormente, el modelo multi-objetivo propuesto pretende solucionar problemas de ruteo de vehículos que consideran entregas y recogidas simultáneas, ventanas de tiempos suaves, flota heterogénea, capacitado y multidepósito, minimizando el costo relacionado al uso del vehículo y el consumo de energía en términos de combustible y emisiones de CO₂.

Este modelo presenta un buen desempeño con instancias mínimas las cuales fueron creadas, llegando a la optimalidad en un tiempo prudente. Pero por ser considerado un problema NP-Hard, al aumentar el número de nodos el problema crece exponencialmente, haciendo mayor el tiempo de obtención de la solución.

Las soluciones generadas con el Solver CPLEX de GAMS se aplicaron para instancias construidas considerando dos (2) depósitos en once (11) nodos, con dos (2) vehículos y todos los parámetros y matrices de información requeridas por el modelo tal como se evidencia en la tabla 22, entre estos: la capacidad de los vehículos se estipuló de 20 unidades-recipientes, para los costos de multa por violación de las ventanas de tiempos se asignó un valor de \$71,8. La masa de los vehículos fue de 122.44 y 102.04 respectivamente y la aceleración inicial en cada nodo para todos los vehículos se determinó en 1.667 m/s.

En cuanto al área frontal de los vehículos, osciló entre los 4 y 3 mt^2 y la relación del paso de la transmisión se tomó en 1.5 y 1.34, (Hernandez & Rafael, 2010). Los costos variables determinados por el consumo de llantas y aceite por cada kilómetro, se estipularon en \$64,9.

Por otra parte, para los escalares, se asignaron los siguientes valores: peso de un recipiente vacío en $Kg = 1$; peso de un recipiente lleno del producto en $Kg = 41$; costo del

combustible = 2.124 \$/lt; costo emisiones de CO₂ calculadas a partir de ($ce = fe * 0,99 * \frac{44}{12}$) tal como se explica en el modelo, en donde fe equivale a 2,28 Kg de CO₂ por cada litro de combustible dando un total de 8,28 \$/lt de combustible consumido, (Mosquera, Fernandez, & Mosquera, 2010).

Tabla 22
Datos de entrada para instancia de 11 nodos

<i>Nodo i</i>	<i>Demanda</i> d_i	<i>Oferta</i> p_i	<i>Ventanas de Tiempo</i>	
			<i>Tiempo de llegada Antes</i> a_i	<i>Tiempo de llegada Después</i> b_i
Depósitos	1	0	0	0
	2	0	0	0
Clientes	3	3	7:08	7:28
	4	4	7:08	7:20
	5	2	7:06	7:21
	6	5	7:10	7:30
	7	3	7:09	7:27
	8	2	7:10	7:25
	9	2	7:08	7:23
	10	3	7:10	7:28
	11	2	7:15	7:40

Nota: Carga, descarga, tiempo de llegada antes y después del modelo para 11 nodos con 2 depósitos. *Fuente:* Construcción Propia.

El coeficiente de resistencia al rodamiento se seleccionó para neumáticos sobre alquitrán o asfalto el cual es de 0,035 Kg/ton; el coeficiente de arrastre se toma en 0,76, (Hernandez & Rafael, 2010); la densidad del aire para temperaturas de 27°C es de 1,1732 kg/m³; el tiempo máximo de servicio en que se debe dejar el motor en ralentí se establece en 5 min. Si el tiempo de servicio supera este tiempo, se debe apagar el motor para disminuir el

consumo en ralentí del vehículo establecido en 0,7 Lt/hr, (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE, 2005).

Las soluciones para el modelo con estos datos, que se presentan a continuación, se ejecutaron en un computador con 4 GB de memoria RAM, procesador Intel Core i7-5500 CPU@ 2.40 GHz, un TB de DD y sistema operativo de 64 bits.

Tabla 23

Resultados para instancias pequeñas

Nodo	Dep.	Vehículo	Gap	Tiempo	Costo con Emisiones
11	2	2	0,0	00:00:47,420	\$77.977,449

Nota: Resultados del modelo para 11 incluyendo 2 depósitos. *Fuente:* Construcción Propia.

La ruta proyectada para la instancia pequeña se muestra a continuación. (Figura 50).

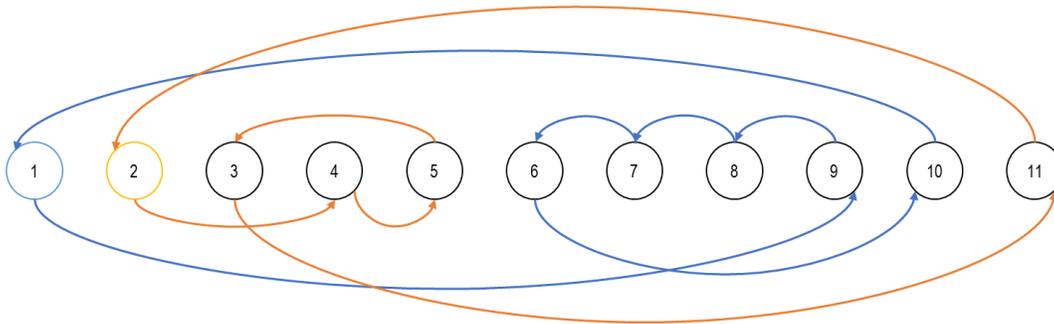


Figura 50. Ruta calculada para instancias de 11 nodos. *Fuente:* construcción propia.

7.4 Solución con método aproximado para instancias medianas y grandes

Tal como se explica, al aumentar el número de nodos, crece exponencialmente el tiempo de solución, lo que implica que tratar de encontrar una solución óptima a través de métodos exactos no sea muy eficiente en términos de tiempo. Por lo que se crea la necesidad de aplicar métodos heurísticos o metaheurísticos según la complejidad del caso.

Dentro de estas técnicas, para este trabajo se aplica la heurística de Clarke and Wright (C&W), para generar soluciones factibles, como lo el trabajo realizado por (Martínez F. , 2008).

7.4.1 Heurística de Clarke and Wright para soluciones factibles

A la fecha, varios de los métodos de solución heurísticos han quedado un poco rezagados en cuanto a su aplicación en procesos de investigación, pero gracias a su orientación a solucionar problemas de VRP, hace que se puedan combinar con otras técnicas metaheurísticas para generar mejores soluciones gracias a su fácil aplicabilidad. En este sentido, la heurística constructiva de Clarke and Wright es una de las técnicas más clásicas y conocidas que se aplican a los modelos de VRP, (Barajas, 2009). Que, aunque se trata de una heurística simple, sin duda ha sido la más utilizada gracias a su flexibilidad, (Orrego, 2013).

Su funcionalidad consiste en la construcción de matrices de ahorros partiendo de una solución inicial en donde existen n rutas separadas desde un depósito a cada nodo, es decir, que existe un vehículo desinado para cada ruta que inicia desde el depósito i , va a exactamente a un punto j y regresa al mismo depósito i , generando n número de rutas, igual a la cantidad de nodos a visitar (0-1-0, 0-2-0, 0-3-0, 0-4-0,..., 0- n -0). (Figura 51).

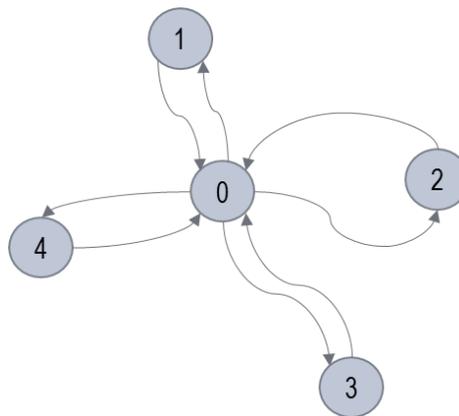


Figura 51. Gráfica de rutas iniciales de la heurística de Clarke and Wright. Fuente: construcción propia.

Para la construcción de la matriz de ahorro, se prosigue con la fórmula:

$$\text{Distancia (Antes)} = d_{0i} + d_{i0} + d_{0j} + d_{j0}$$

$$\text{Distancia (Después)} = d_{0i} + d_{ij} + d_{j0}$$

$$\text{Ahorro } (i, j) = \text{Distancia (Antes)} - \text{Distancia (Después)} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij}$$

Esta matriz se puede construir en conjunto a la matriz de distancias, si y solo si, se trabaja con una matriz simétrica, de lo contrario, se debe construir una matriz aparte.

A partir de la matriz de ahorros netos, se identifica la celda (i, j) que contiene el máximo ahorro no examinado y se procede a enlazar los clientes i y j consolidando las rutas si y solo si se satisfacen las siguientes condiciones:

- a. Existe un trayecto simple $(i, 0)$ y otro trayecto simple $(0, j)$
- b. Los clientes i y j no se encuentran en la misma ruta
- c. Al enlazar los clientes i y j , agregando el camino (i, j) y quitando $(i, 0)$ y $(0, j)$ no se viola ninguna restricción del problema, ya sea capacitado, con ventanas de tiempo, otras variantes o combinaciones.

Para esta investigación se selecciona la heurística de C&W para generar las soluciones eficientes del modelo calculando el ahorro con base en la matriz de distancias y la matriz de tiempo, dado que se trabaja un modelo multi-objetivo. Esto, debido que el C&W se ha considerado entre los algoritmos más implementado para solucionar problemas de VRP mediante la exploración limitado del espacio de búsqueda basado en los mayores ahorros para armar una ruta determinada, (Álvarez, 2017).

Teniendo en cuenta la particularidad del modelo desarrollado, la heurística de C&W se desarrolló en el software y lenguaje de programación gratuita de R, el cual cuenta con un extenso número de funciones matemáticas, que ayudan a optimizar el tiempo computacional y la capacidad de procesamiento al ser un lenguaje de programación de cuarta generación, (Redondo, 2017).

A diferencia de los modelos solucionados con C&W, el modelo propuesto presenta la variante de multidepósito, por lo que al momento de construir la matriz de ahorro, se prosiguió con la construcción del número de matrices de ahorros igual al número de centros de acopio ($\#matrices\ de\ ahorros = \#centros\ de\ acopio$), pero eliminando filas y columnas en cada matriz de ahorros neta calculada (Tamaño matriz de ahorros $(i, j) = n_{[\sum i - (\#centros\ de\ acopio - 1)]} * n_{[\sum j - (\#centros\ de\ acopio - 1)]}$), para que se construya una matriz de ahorro para cada centro de acopio.

Una vez construidas las matrices de ahorro, se prosigue a buscar el mayor ahorro entre las matrices de ahorro, y se inicia la construcción de la ruta con la matriz seleccionada con el mayor ahorro, el cual se evalúa con la capacidad del vehículo; cabe resaltar que este algoritmo solo evaluó la ruta de los vehículos según la capacidad establecida. La violación de tiempo y el consumo de combustible, se calculó a partir de la ruta arrojada como solución.

A continuación se detalla el flujograma del algoritmo C&W diseñado. (Figura 52).

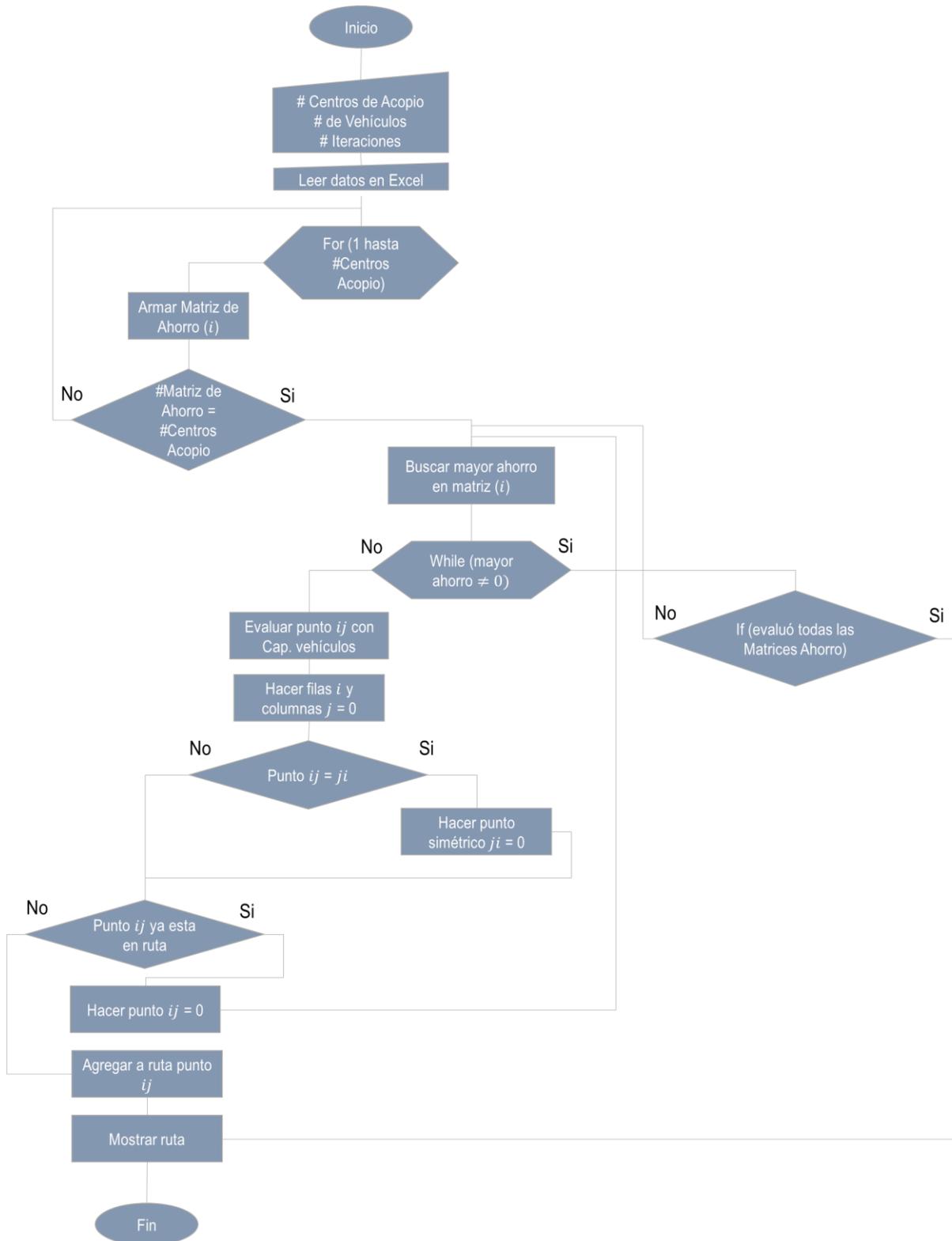


Figura 52. Flujoograma de proceso del algoritmo C&W aplicado al modelo matemático. Fuente: construcción propia.

La selección de los puntos de mayor ahorro, se realizan de manera secuencial organizando los arcos de mayor ahorro de mayor a menor en una lista (p, q) y armando las rutas si no hay ninguna violación y p o q se encuentran en los extremos de las rutas, (Martel, 2003; Orrego, 2013).

Para evaluar la capacidad de los vehículos según la ruta que se construye, se realizan las siguientes ecuaciones teniendo en cuenta que no se puede sobrepasar la capacidad inicial del vehículo k (Cap_{total}). Posteriormente, se aplican las ecuaciones para evaluar el cumplimiento de la capacidad del vehículo en cada nodo, en donde se debe hacer descargas d_i y cargas p_i simultáneas.

$$if: Cap_{total} \geq Cap_{des} + d_i$$

$$Cap_{des} = Cap_{des} + d_i$$

$$if: Cap_{total} \geq Cap_{car} + p_i$$

$$Cap_{car} = Cap_{car} + p_i$$

$$if: Cap_{total} \geq Cap_{total} - Cap_{des} + Cap_{car}$$

Estas ecuaciones deben cumplirse simultáneamente para que el punto ij sea añadido a la ruta, de lo contrario, ese punto se hará 0 y se pasará al siguiente mayor ahorro, tal como se muestra en el siguiente flujograma. (Figura 53).

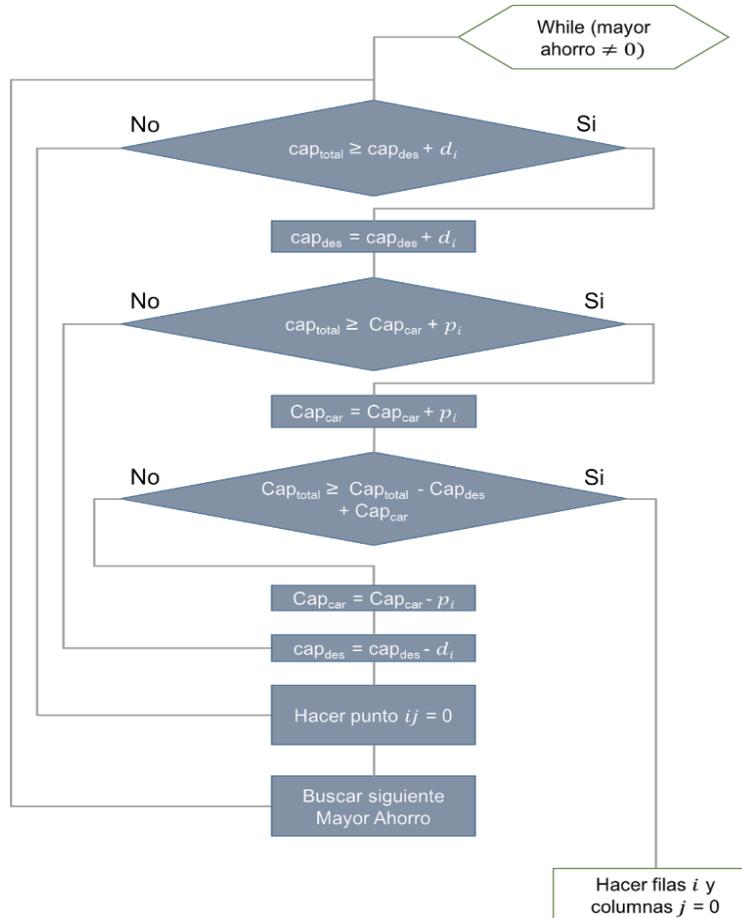


Figura 53. Flujograma de la evaluación de la capacidad con la del vehículo en el cargue y descargue en cada nodo.
 Fuente: construcción propia.

Una vez se construyen las rutas, se procesa a calcular la distancia total recorrida en términos de kilómetros, que multiplicada por el costo variable y sumado con el costo fijo del vehículo, se obtiene el costo del primer objetivo.

Simultáneamente, se calcula la violación de las ventanas de tiempo a partir del cálculo de tiempo de llegada del vehículo a cada nodo. Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$T \text{ llegada } j = T \text{ llegada } i + \text{tiempo de servicio en } i \\
 + \text{Tiempo de viaje entre punto } i - j$$

Con esta ecuación, luego se puede comparar en cada punto j el tiempo de llegada con respecto a las ventanas de tiempo, verificando si se llega antes o después. Para luego

proceder a multiplicar el tiempo violado, por el costo correspondiente y así calcular el segundo objetivo, tal como se muestra en la siguiente imagen del código. (Figura 54).

```
#funcion para ventana de tiempo
hallar_ventanas_tiempo <- function(ruta = NA){
  inc_posicion <- (length(lista_general)-1)
  num_centro_acopio <- ruta[length(ruta)]
  va <- 0
  vb <- 0
  tll <- 0
  total_multa <- 0
  for(i in 1:(length(ruta)-2)){
    if(i == 1){
      tlli <- matrizTiempoviaje[num_centro_acopio, ruta[i+1]+inc_posicion]
      if(tlli >= vectorTC[ruta[i+1]+inc_posicion]){
        if(tlli <= vectorTT[ruta[i+1]+inc_posicion]){
          #diferencia
          vb <- tlli - vectorTT[ruta[i+1]+inc_posicion]
          #print("penalizado vb")
        }
      }else{
        #diferencia
        va <- vectorTC[ruta[i+1]+inc_posicion] - tlli
        #print("penalizado va")
      }
      total_multa <- total_multa + ((va + vb)*vectorMulta[ruta[i+1]+inc_posicion])
      ts <- (vectorDemanda[ruta[i+1]+inc_posicion]+(vectoroferta[ruta[i+1]+inc_posicion]*0.17))
      #message(num_centro_acopio, '-',ruta[i+1]+inc_posicion,':', tlli, '+', ts)
      tll <- tlli + ts
    }else{
      if((i+1) == (length(ruta)-2) ){
        tlli <- matrizTiempoviaje[ruta[i]+inc_posicion, num_centro_acopio]
        tll <- tll + tlli
        break
      }else{
        tlli <- matrizTiempoviaje[ruta[i]+inc_posicion, ruta[i+1]+inc_posicion]
        tll <- tll + tlli
      }
      va_aux <- 0
      vb_aux <- 0
      if(tll >= vectorTC[ruta[i+1]+inc_posicion]){
        if(tll <= vectorTT[ruta[i+1]+inc_posicion]){
          #diferencia
          vb_aux <- (tll - vectorTT[ruta[i+1]+inc_posicion])
          #print("penalizado vb")
        }
      }else{
        #diferencia
        va_aux <- (vectorTC[ruta[i+1]+inc_posicion] - tll)
        #print("penalizado va")
      }
      va <- va + va_aux
      vb <- vb + vb_aux
      total_multa <- total_multa + ((va_aux + vb_aux)*vectorMulta[ruta[i+1]+inc_posicion])
      ts <- (vectorDemanda[ruta[i+1]+inc_posicion]+(vectoroferta[ruta[i+1]+inc_posicion]*0.17))
      #message(ruta[i]+inc_posicion, '-',ruta[i+1]+inc_posicion,':',(tll-tlli),'+', tlli,'+', ts)
      tll <- tll + ts
    }
  }
  return(c(va, vb, total_multa))
}
```

Figura 54. Código en R para el cálculo de las violaciones de ventanas de tiempo y costos asociados. Fuente: construcción propia.

Para el caso del tercer objetivo del modelo, se incluyen las constantes requeridas y las ecuaciones de consumo descritas en el capítulo 6 (modelo matemático), con lo cual se obtiene el tercer costo. (Figura 55).

```

1428 # funcion para hallar el costo de consumo de cada ruta
1429 hallar_costo_consumo_ruta <- function(ruta = NA,matrizDistancia = NA){
1430   inc_posicion <- (length(lista_general)-1)
1431   num_centro_acopio <- ruta[length(ruta)]
1432   vehiculo <- ruta[length(ruta)-1]
1433   #####
1434   g <- 9.8
1435   CR <- 0.035
1436   TA <- 10
1437   ACE <- 1.667
1438   CDR <- 0.76
1439   CE <- 8.28
1440   CF <- 2124
1441   RLLEN <- 41
1442   RVAC <- 1
1443   CRV <- 0.7
1444   PD <- 1.1732
1445   TRV <- 5
1446
1447   #####
1448
1449   CC <- 0
1450   CD <- vectorvehiculos[1, vehiculo]
1451   obj <- 0
1452   RPT <- vectorRPT[vehiculo]
1453
1454   for(i in 1:(length(ruta)-2)){
1455     if(i == 1){
1456
1457       distancia <- matrizDistancia[num_centro_acopio, ruta[i+1]+inc_posicion]
1458
1459       fd <- (distancia - (((1/2) * ACE * (TA^2))/1000))/distancia
1460
1461       z <- (vectorZ[ruta[i+1]+inc_posicion] - vectorZ[num_centro_acopio])
1462

```

Figura 55. Adición de constantes y parámetros para la función para consumo de combustible y costos asociados. Fuente: construcción propia.

La sumatoria de estos costos, permiten identificar el costo total de la ruta y hacer las debidas comparaciones con respecto a las soluciones óptimas. El código desarrollado en el software R, se evidencia en el anexo. (Anexo 1).

8. Capítulo V: Evaluación del modelo con los datos del aprovisionamiento de la leche cruda en Sucre

Una vez realizada la validación del modelo y el método de solución con instancias de prueba construidas, se procede con la evaluación en dos fases de las rutas para el aprovisionamiento de la leche cruda en los municipios focalizados del departamento de Sucre.

Una primera fase consistió en la obtención de respuestas óptimas por ruta de cada municipio y ser comparadas con el costo actual de cada una de estas rutas. Esto, debido a las limitaciones que presenta el software GAMS con el aumento del número de nodos, en consideración del gran número de restricciones que se abarcan.

Una segunda fase, fue la aplicación de la heurística adaptada de Clarke and Wright para la obtención de los resultados a un tiempo computacional mínimo, dato el tiempo exageradamente alto que demora el Solver CPLEX de GAMS para dar un resultado con un GAP menor del 5% en algunos casos de este modelo.

8.1 Resultados óptimos con el Solver CPLEX en GAMS para el aprovisionamiento de leche en Sucre

Como se mencionó, se realizaron las respectivas corridas con los datos obtenidos en la caracterización estipulada en el capítulo II de este trabajo, con la cual se conocieron los costos de cada ruta, para cada municipio de manera individual. En tal sentido, se optó por construir las rutas para cada municipio independientemente y de manera posterior, se trabaja todo el departamento de Sucre conjuntamente con ayuda de una heurística debido a la complejidad del modelo y el tiempo computacional elevado que se requiere para llegar a soluciones buenas.

8.1.1 Resultados comparación de costos del municipio de San Marcos

Los costos actuales de las rutas de las empresas E_1 y E_2 del municipio de San Marcos, son en total \$ 273.645,4. Cabe resaltar que estos costos no incluyen los costos de emisión de CO_2 , de violación a las ventanas de tiempo y consumo en ralentí que si se tienen en cuenta en el modelo matemático propuesto.

Para calcular la ruta óptima, dado el moelo multi-objetivo, se procedió a realizar las diferentes combinaciones de ponderaciones con las cuales se obtuvieron cuatro soluciones (A =298.690, B = 293.790, C = 291.050, D = 290.897,28, E = 289.856,83, F = 288.804,03, G = 288.580,7, H = 302.248,39), como se evidencia en la siguiente ilustración. (Figura 56).

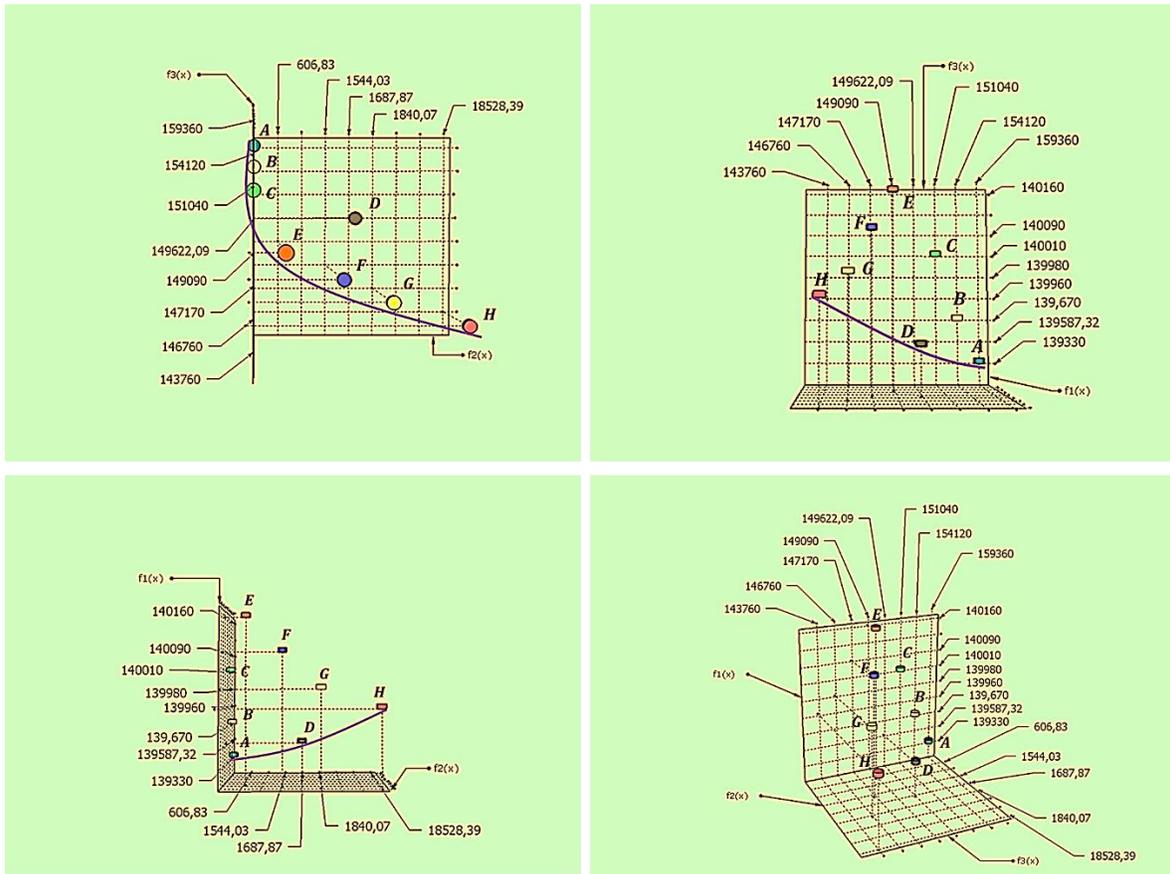


Figura 56. Frontera de Pareto construida con los resultados del municipio de San Marcos. Fuente: construcción propia.

El resultado de la ruta óptima se elige teniendo en cuenta la dominancia de las soluciones en cada comparación de objetivos. Observánsese en la imagen anterior que el punto *G*, representa un menor costo total, tal como se muestra en la siguiente tabla. Tabla 24.

Tabla 24
Comparación de costos para las soluciones de San Marcos

<i>Soluciones</i>	<i>Costo por Distancias</i>	<i>Costo por Violación de Tiempo</i>	<i>Costo emisiones de CO₂</i>	<i>Costo Total</i>
<i>A</i>	139.330,00	-	159.360,00	298.690,00
<i>B</i>	139.670,00	-	154.120,00	293.790,00
<i>C</i>	140.010,00	-	151.040,00	291.050,00
<i>D</i>	139.587,32	1.687,87	149.622,09	290.897,28
<i>E</i>	140.160,00	606,83	149.090,00	289.856,83
<i>F</i>	140.090,00	1.544,03	147.170,00	288.804,03
<i>G</i>	139.980,00	1.840,70	146.760,00	288.580,70
<i>H</i>	139.960,00	18.528,39	143.760,00	302.248,39

Nota: Costos de cada objetivo para las soluciones obtenidas en San Marcos. Fuente: construcción propia.

Acorde a lo anterior, se selecciona como mejor solución: \$ 288.804,03 que corresponde un ahorro del 13,13% con respecto al costo actual que considera todos los costos. Dentro de las ponderaciones que arrojaron esta solución, se seleccionó los pesos que dieron resultados en el menor tiempo. Tales pesos son $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.1$ y $\gamma = 0.3$ que arrojaron resultado en 13,63 minutos. Sin embargo, también se corrió el modelo sin tener en cuenta los costos de ralentí, de CO₂ y multas por violaciones de tiempo, lo cual permitió hacer la siguiente comparación. (Tabla 25).

Tabla 25
Comparación de costos municipio de San Marcos

Costos	Ruta Actual	Ruta sin emisiones, ventanas de tiempo y ralentí	Ruta Actual multas de tiempo y consumo en ralentí	Ruta con emisiones, multas de tiempo y consumo en ralentí
	\$ 283.645,4	\$ 268.731,92	\$ 334.863,177	\$ 288.804,03
Dif. % Con respecto al actual		-5,258%		-13,75%
Tiempo computacional		28 minutos		13,63 minutos
SOLVER		CPLEX		CPLEX

Nota: Resultados del modelo para el ruteo del municipio de San Marcos con 22 nodos incluyendo 2 depósitos. *Fuente:* Construcción Propia.

Tal como se evidencia en el resultado, el modelo ejecutado como un TSPSPD proporciona un ruteo óptimo con una disminución de los costos en 5,258%. Sin embargo, al considerar todos los demás costos que presenta el modelo, el costo disminuye en un 13,73%, significando un ahorro diario de \$ 46.059,147 y anual de \$15.475.873,392.

En cuanto a la distancia, la ruta actual recorre, 246,382 *km*, pero la ruta calculada con el modelo sin costos de emisiones, ralentí y violación de tiempo es de 179,383 *km* mostrando una reducción significativa del 27,2%.

La ruta que considera todos los costos arroja los siguientes resultados: Distancia recorrida 193,589 *km*, litros de combustible consumidos 68,83 *Lt*, tiempo de ruta 439,44 *min* con 8,19 *min* de violación de ventanas de tiempo. La diferencia de las rutas se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 57).

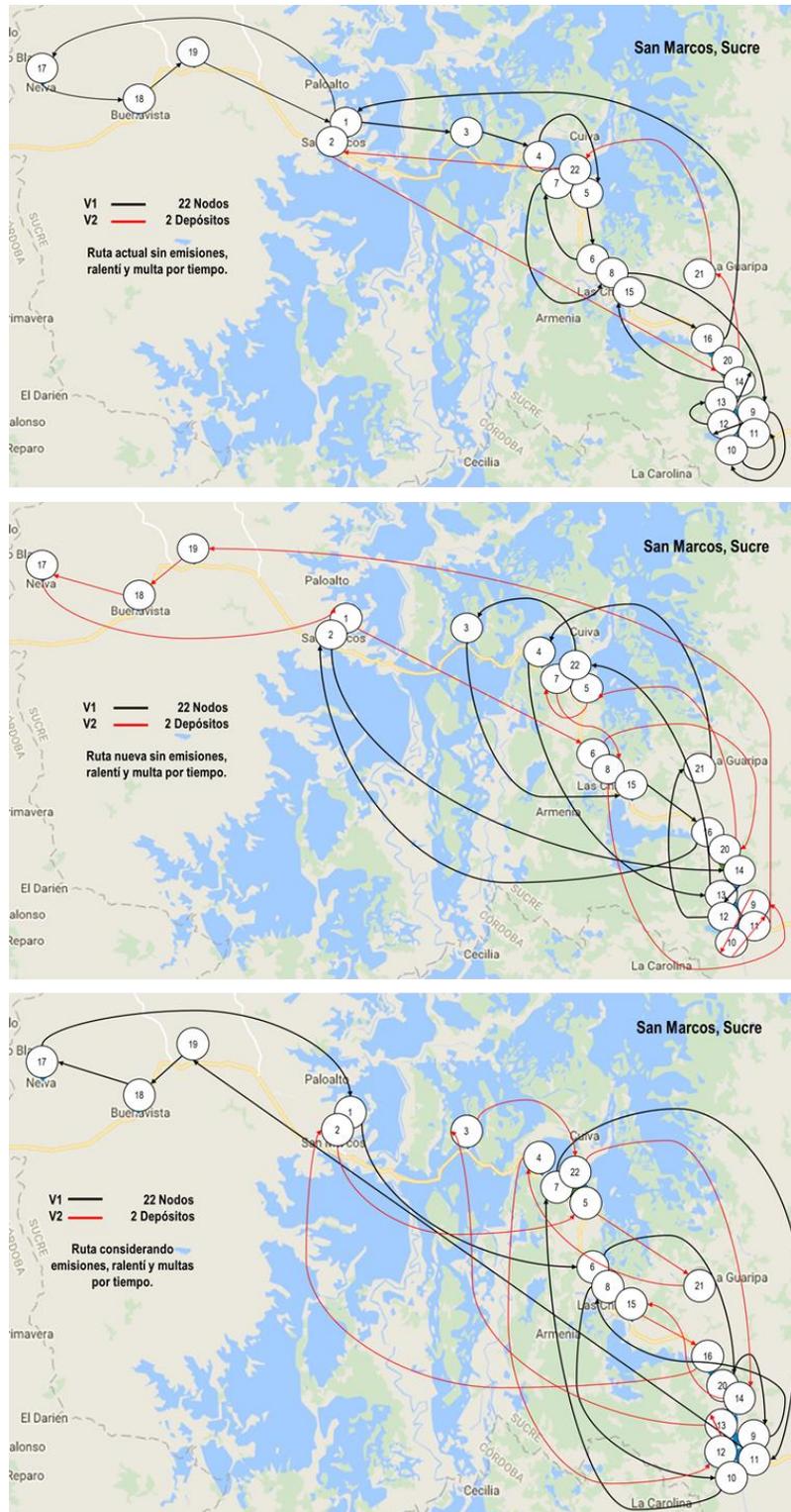


Figura 57. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en San Marcos. Fuente: construcción propia.

Dado esta ruta, se muestra a continuación el momento en que llegan los vehículos a cada unidad productiva, cuanto carga, cuando descarga, el tiempo en ralentí, y se evidencia si hay o no violación por llegada antes o después. (Tabla 26).

Tabla 26

Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en San Marcos

Unid. Productiva	Momento de llegada	Llegada Antes Va_i	Llegada Después Vb_i	Tiempo en Ralentí λ_i	d_i	p_i	Vehículo k	Centro de Acopio i
6	90			1,17	1	1		
20	93,17			2,34	2	2		
9	101,51			2,34	2	2		
8	117,58	2,42		1,17	1	1		
10	121,75		1,75	1,17	1	1		
7	127,42			3,51	3	3	1	1
11	135,43			4,68	4	4		
19	164,11			5	8	8		
18	197,47			5	9	9		
17	240			5	5	5		
5	40			4,68	4	4		
21	90			4,68	4	4		
4	105,68		4,02	1,17	1	1		
12	110			3,51	3	3		
13	115,51			3,51	3	3		
3	124,02			1,17	1	1	2	2
22	126,19			5	13	13		
14	143,4			2,34	2	2		
15	148,74			1,17	1	1		
16	156,91			4,68	4	4		

Nota: Resultados del modelo para el municipio de San Marcos. *Fuente:* Construcción Propia.

8.1.2 Resultados comparación de costos del municipio de Buenavista

En el caso del municipio de Buenavista, solo se obtuvieron los datos de una sola empresa (E_5). Los costos actuales de la ruta sin emisiones de CO_2 , de violación a las ventanas de tiempo y consumo en ralentí es de \$ 81.697, 13.

Para la selección de la suma ponderada de los pesos que se le asignarían a los objetivos con los datos de este municipio, se realizó la prueba combinando los diferentes pesos con los cuales se obtuvieron cuatro soluciones no-dominadas ($A = 79.438,74$ $B = 79.490,42$, $C = 79.960,19$ y $D = 80.002,43$). (Figura 58).

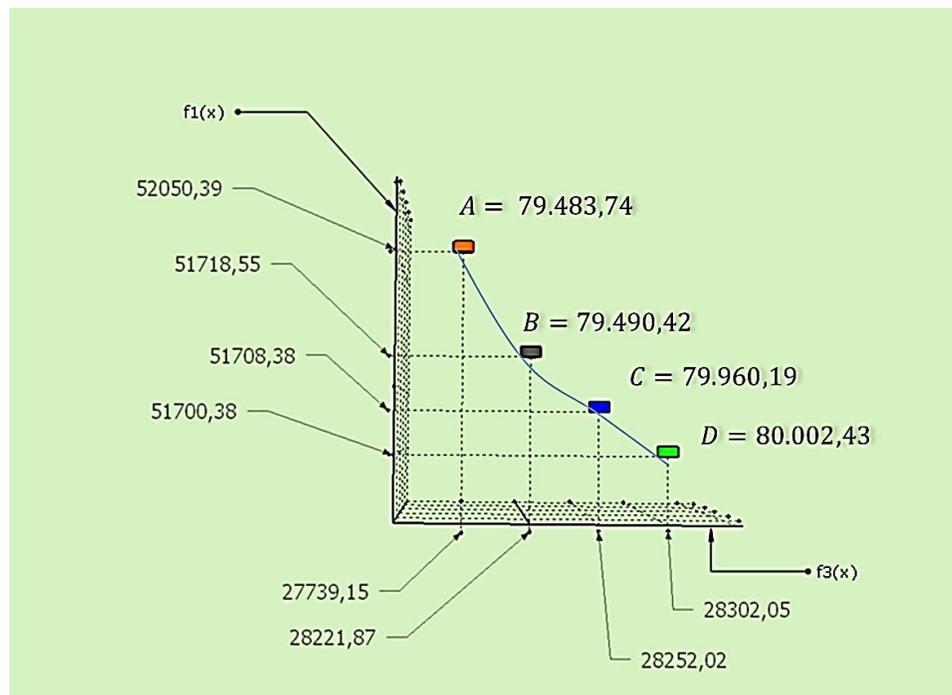


Figura 58. Frontera de Pareto para las soluciones del municipio de Buenavista. Fuente: construcción propia.

Para efectos de minimización de los costos, se selecciona la solución A correspondiente a \$ 79.483,74 debido que es la menos costosa y fue la más iterativa en las pruebas. Tabla 27.

Tabla 27

Comparación de costos para las soluciones de Buenavista

<i>Soluciones</i>	<i>Costo por Distancias</i>	<i>Costo por Violación de Tiempo</i>	<i>Costo emisiones de CO₂</i>	<i>Costo Total</i>
<i>A</i>	52.050,39	-	27.793,15	79.843,54
<i>B</i>	51.718,55	-	28.221,87	79.940,42
<i>C</i>	51.708,17	-	28.252,02	79.960,19
<i>D</i>	51.700,38	-	28.302,05	80.002,43

Nota: Costos de cada objetivo para las soluciones obtenidas en Buenavista. Fuente: construcción propia.

Los pesos seleccionados fueron $\alpha = 0.2$, $\beta = 0,5$ y $\gamma = 0,3$, con los cuales se obtuvo una respuesta óptima en 0,189 minutos.

Se grafica solo $f1(x)$ Vs $f3(x)$, debido q ue los resultados de $f2(x)$ para todas las iteraciones fueron 0.

La ruta óptima presenta una disminución del 7,8% con respecto al costo actual. Sin embargo, al igual que en el municipio de San Marcos, se corrió el modelo sin tener en cuenta los costos de ralentí, de CO₂ y multas por violaciones de tiempo, lo cual permitió hacer la siguiente comparación. (Tabla 28).

Tabla 28
Comparación de costos municipio de Buenavista

	Ruta Actual	Ruta sin emisiones, ventanas de tiempo y ralentí	Ruta Actual multas de tiempo y consumo en ralentí	Ruta con emisiones, multas de tiempo y consumo en ralentí
Costos	\$ 81.697,13	\$ 76.686,10	\$ 86.215,95	\$ 79.483,74
Dif. % Con respecto al actual		-6,1%		-7,8%
Tiempo computacional		5,006 segundos		11,306 segundos
SOLVER		CPLEX		CPLEX

Nota: Resultados del modelo para el ruteo del municipio de Buenavista con 11 nodos incluyendo 1 depósitos. *Fuente:* Construcción Propia.

La ruta óptima calculada por el modelo para el municipio de Buenavista, presenta un valor menor en 6,1% que la ruta actual, lo que se refleja en la distancia recorrida, tal es que para la ruta actual la distancia es de 26,15 *km* y en la ruta calculada por el modelo, la distancia es de 25,98 *km* (esto, considerando el modelo como un simple TSP). Sin embargo, considerando las ventanas de tiempo la ruta óptima da un total de 31,593 *km*, siendo mayor que la actual, pero el costo es inferior en un 7,8%. La diferencia de las rutas se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 59).

El ahorro que se realiza es de \$ 6.732, 21 diarios, que proyectados a un año equivalen a \$ 2.423.595,6. Ahorro muy significativo en este modelo de negocio.

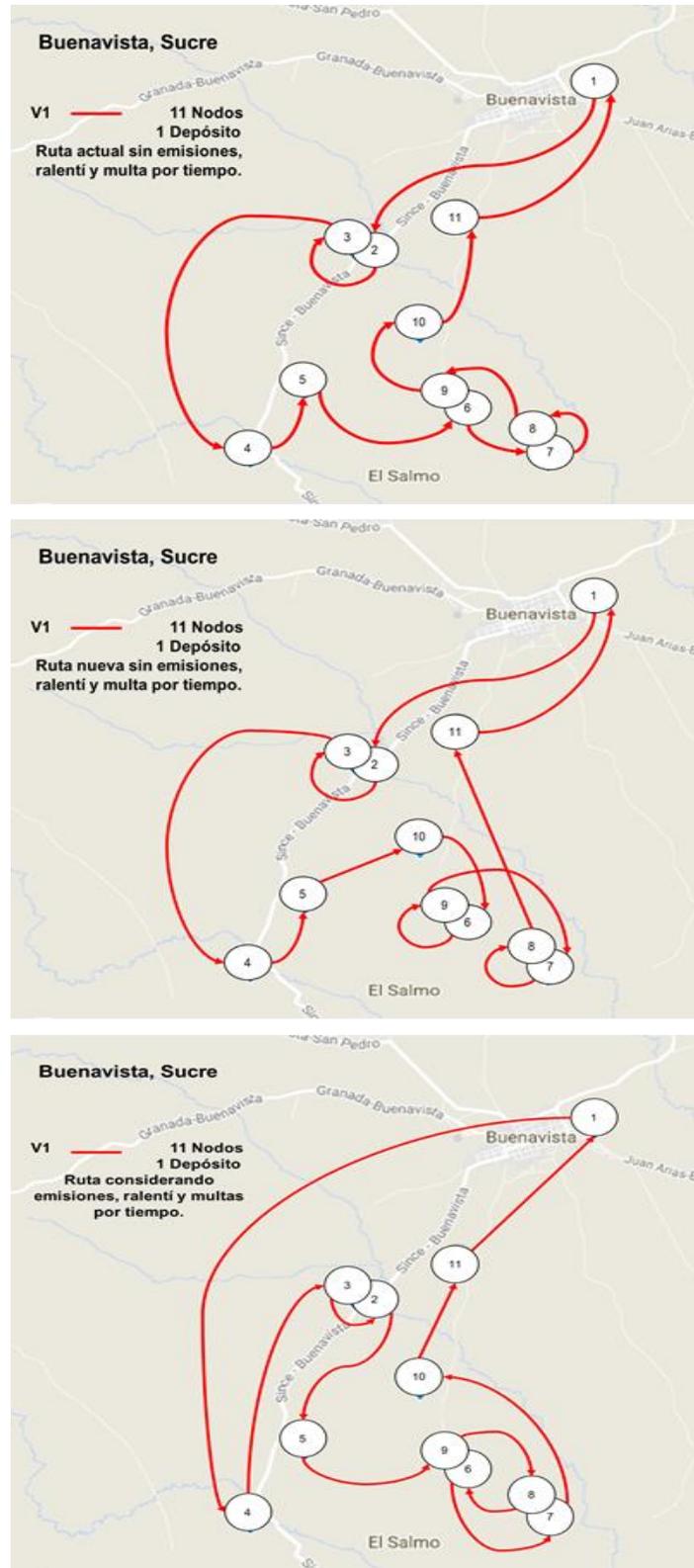


Figura 59. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Buenavista. Fuente: construcción propia.

Tal como se evidencia, son tres rutas completamente diferentes. Para el caso de la ruta que considera todos los cotos, se muestra a continuación el momento en que llegan los vehículos a cada unidad productiva, cuanto carga, cuando descarga, el tiempo en ralentí, y se evidencia si hay o no violación por llegada antes o después. (Tabla 29).

Tabla 29

Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Buenavista

Unid. Productiva	Momento de llegada	Llegada Antes Va_i	Llegada Después Vb_i	Tiempo en Ralentí λ_i	d_i	p_i	Vehículo k	Centro de Acopio i
4	40	-	-	2,34	2	2		
3	48,34	-	-	3,51	3	3		
2	58,85	-	-	2,51	2	3		
5	70	-	-	4,68	4	4		
9	93,68	-	-	2,51	2	3	1	1
8	97,19	-	-	2,51	2	3		
6	100,7	-	-	5	5	5		
7	107,550	-	-	3,51	3	3		
10	113,06	-	-	3,51	3	3		
11	119,57	-	-	2,34	2	2		

Nota: Resultados del modelo para el municipio de Buenavista. *Fuente:* Construcción Propia.

En tal sentido, es posible resumir los siguientes indicadores resultantes para cada objetivo: Distancia recorrida 31,593 *km*, litros de combustible consumidos 13,035 *Lt*, Tiempo de ruta 128,91 *min* con 0 *min* de violación de ventana de tiempo.

8.1.3 Resultados comparación de costos del municipio de Sincelejo

Al igual que en Buenavista, en el municipio de Sincelejo solo se tuvo acceso a los datos de una ruta de una sola empresa (E_6). Los costos actuales de la ruta sin emisiones de CO_2 , violación a las ventanas de tiempo y consumo en ralentí es de \$ 149.588,94.

Para el cálculo de la ruta óptima, se ejecutó el modelo con las diferentes ponderaciones de pesos, los cuales arrojaron un conjunto de soluciones. Para efectos de la investigación en este municipio, solo se seleccionaron aquellas que tenían un GAP menos al 10%, quedando 15 soluciones buenas. (A = \$ 213.946,13, B = \$ 211.210,28, C = \$ 209.287,45, D = \$ 209.254,24, E = \$ 205.740,23, F = \$ 205.959,42, G = \$ 205.741,43, H = \$ 205.647,41, I = \$ 206.189,19, J = \$ 221.209,37, K = \$ 220.731,24, L = \$ 221.900,34, M = \$ 218.842,27, N = \$ 219.816,97, O = \$ 228.654,91), como se evidencia en la siguiente ilustración. (Figura 60). Cabe resaltar que con los doatos de este municipio el menor GAP dado en una solución fue del 1,06%.

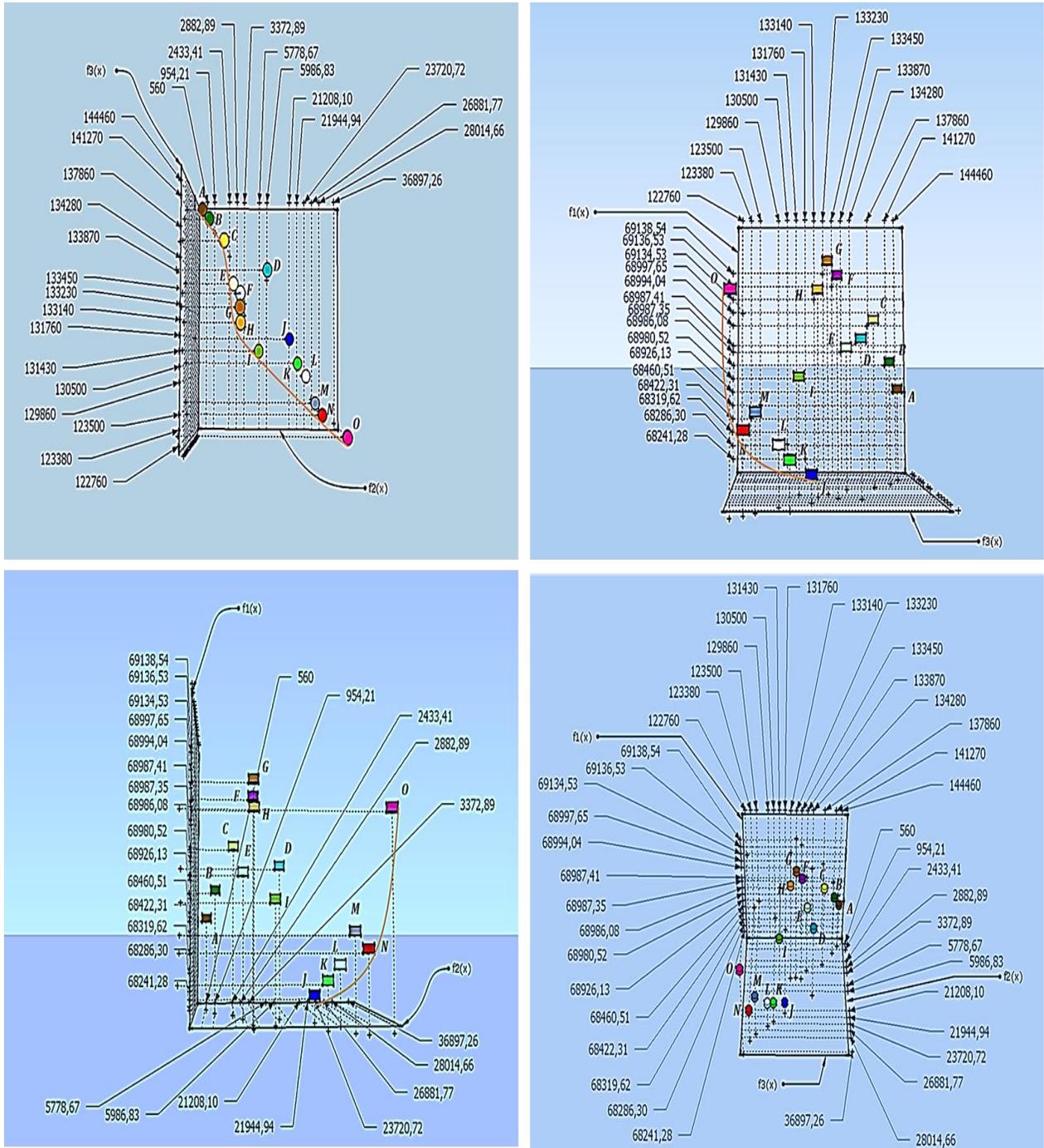


Figura 60. Diagramas de pareto de soluciones del municipio de Sincelejo. Fuente: construcción propia.

Para mejor interpretación de las soluciones, se construye la siguiente tabla en donde se detallan los resultados por cada objetivo y el costo total de cada solución. Tabla 30.

Tabla 30
Comparación de costos para las soluciones de Sincelejo

<i>Soluciones</i>	<i>Costo por Distancias</i>	<i>Costo por Violación de Tiempo</i>	<i>Costo emisiones de CO₂</i>	<i>Costo Total</i>
<i>A</i>	68.926,13	560,00	144.460,00	213.946,13
<i>B</i>	68.986,08	954,21	141.270,00	211.210,28
<i>C</i>	68.994,04	2.433,41	137.860,00	209.287,45
<i>D</i>	68.987,41	5.986,83	134.280,00	209.254,24
<i>E</i>	68.987,35	2.882,89	133.870,00	205.740,23
<i>F</i>	69.136,53	3.372,89	133.450,00	205.959,42
<i>G</i>	69.138,54	3.372,89	133.230,00	205.741,43
<i>H</i>	69.134,53	3.372,89	133.140,00	205.647,41
<i>I</i>	68.980,52	5.778,67	131.430,00	206.189,19
<i>J</i>	68.241,28	21.208,10	131.760,00	221.209,37
<i>K</i>	68.286,30	21.944,94	130.500,00	220.731,24
<i>L</i>	68.319,62	23.720,72	129.860,00	221.900,34
<i>M</i>	68.460,51	26.881,77	123.500,00	218.842,27
<i>N</i>	68.422,31	28.014,66	123.380,00	219.816,97
<i>O</i>	68.997,65	36.897,26	122.760,00	228.654,91

Nota: Costos de cada objetivo para las soluciones obtenidas en Sincelejo. Fuente: construcción propia.

Dadas las soluciones obtenidas mediante la variación de las ponderaciones, la solución que presenta menor valor es el punto *H* el cual representa un costo de \$ 205.647,41, sin embargo, el GAP es del 7,94%, por lo cual se selecciona el punto *I* el cual representa un costo de \$ 206.189,19, el cual es ligeramente mayor que el punto *H*. El GAP del punto *I* es del 2,07%.

Los pesos seleccionados para esta solución fueron: fueron $\alpha = 0.8$, $\beta = 0,1$ y $\gamma = 0.1$, con los cuales se obtuvo una respuesta óptima en 224,81.

Con esta solución, se obtiene un ahorro del 8,35% con respecto al costo de la ruta actual. La relación de los costos obtenidos, se evidencia en la siguiente tabla. (Tabla 31).

Tabla 31
Comparación de costos municipio de Sincelejo

	Ruta Actual	Ruta sin emisiones, ventanas de tiempo y ralentí	Ruta Actual multas de tiempo y consumo en ralentí	Ruta con emisiones, multas de tiempo y consumo en ralentí
Costos	\$ 189.588,94.	\$ 188.150,62	\$ 224.981,9	\$ 206.189,19
Dif. % Con respecto al actual		-0,96%		-8,35%
Tiempo computacional		0,158 minutos		224,81 minutos
SOLVER		CPLEX		CPLEX

Nota: Resultados del modelo para el ruteo del municipio de Sincelejo con 20 nodos incluyendo 1 depósito. *Fuente:* Construcción Propia.

Tal como se observa, solo se disminuyen los costos en un 8,35%, esto, debido que la empresa encuestada, presenta una buena organización y buenas prácticas de manufactura, lo que le permite tener un mejor control sobre los aspectos de ruteo. Sin embargo, esta diferencia representa ahorro diario de \$ 18.792,71 y anual de \$ 6.314.350,56.

Actualmente, la distancia recorrida en la ruta de Sincelejo es de 143,335 *km*. Sin embargo, la nueva ruta calculada que considera todos los costos arroja los siguientes resultados: Distancia recorrida 134,238 *km*, litros de combustible consumidos 61,644 *Lt*, tiempo de ruta 241,04 *min* con 31,37 *min* de violación de ventanas de tiempo. La diferencia de las rutas se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 61).

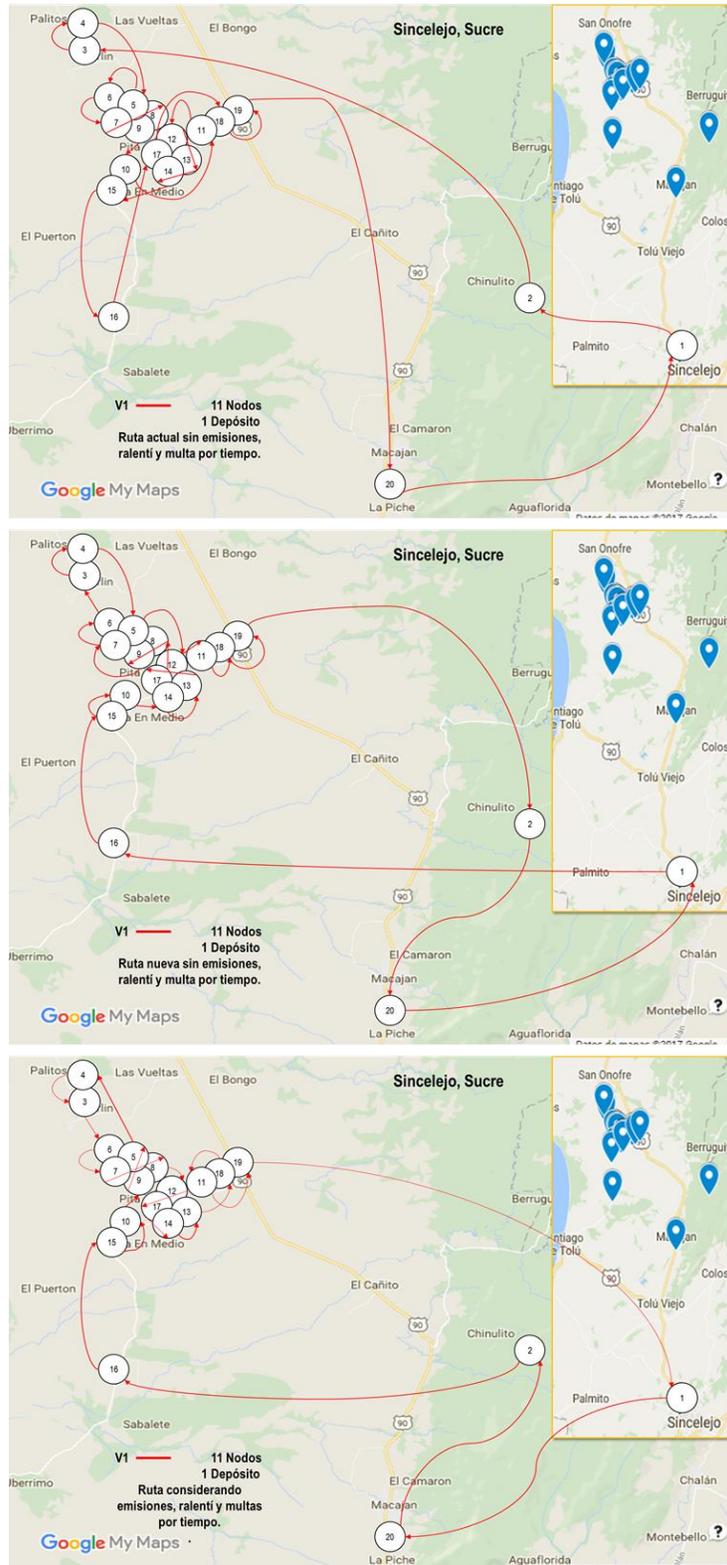


Figura 61. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Sincelajo. Fuente: construcción propia.

De la imagen anterior, se puede observar la diferencia en cada una de las rutas. A continuación se detallan los datos relevantes del modelo. (Tabla 32).

Tabla 32

Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Sincelejo

Unid. Productiva	Momento de llegada	Llegada Antes Va_i	Llegada Después Vb_i	Tiempo en Ralentí λ_i	d_i	p_i	Vehículo k	Centro de Acopio i
20	46,22	13,78	-	1,17	1	1		
2	57,39	-	-	1,17	1	1		
16	89,56	0,44	-	4,68	4	4		
15	102,24	-	-	1,17	1	1		
10	105,41	-	-	2,51	2	3		
9	114,92	-	-	1,17	1	1		
5	119,09	-	-	5	5	5		
4	135,94	-	-	3,51	3	3		
3	140,45	-	-	1,17	1	1	1	1
6	149,62	-	-	3,51	3	3		
7	154,13	-	-	2,34	2	2		
8	158,47	-	-	3,51	3	3		
12	164,98	-	-	1,17	1	1		
17	167,15	-	17,15	2,34	2	2		
14	170,49	-	-	2,34	2	2		
13	173,83	-	-	1,17	1	1		
18	180	-	-	2,34	2	2		
11	183,34	-	64,88	5	8	8		
19	194,7	-	46,05	1,34	1	2		

Nota: Resultados del modelo para el municipio de Sincelejo. *Fuente:* Construcción Propia.

8.1.4 Resultados comparación de costos del municipio de Galeras

En el municipio de Galeras se utilizaron 3 vehículos para el ruteo y dos empresas (E_4 y E_5). Los costos actuales de la ruta sin emisiones de CO_2 , violación a las ventanas de tiempo y consumo en ralentí es de \$ 256.755,6.

Al igual que en los demás municipios, se realizaron las diferentes iteraciones del modelo variando los pesos de cada objetivo, obteniendo 28 soluciones diferentes. De estas soluciones, se seleccionaron las que llegaron a un GAP del 0%. como se evidencia en la siguiente imagen en total fueron 8 soluciones. (Figura 62).

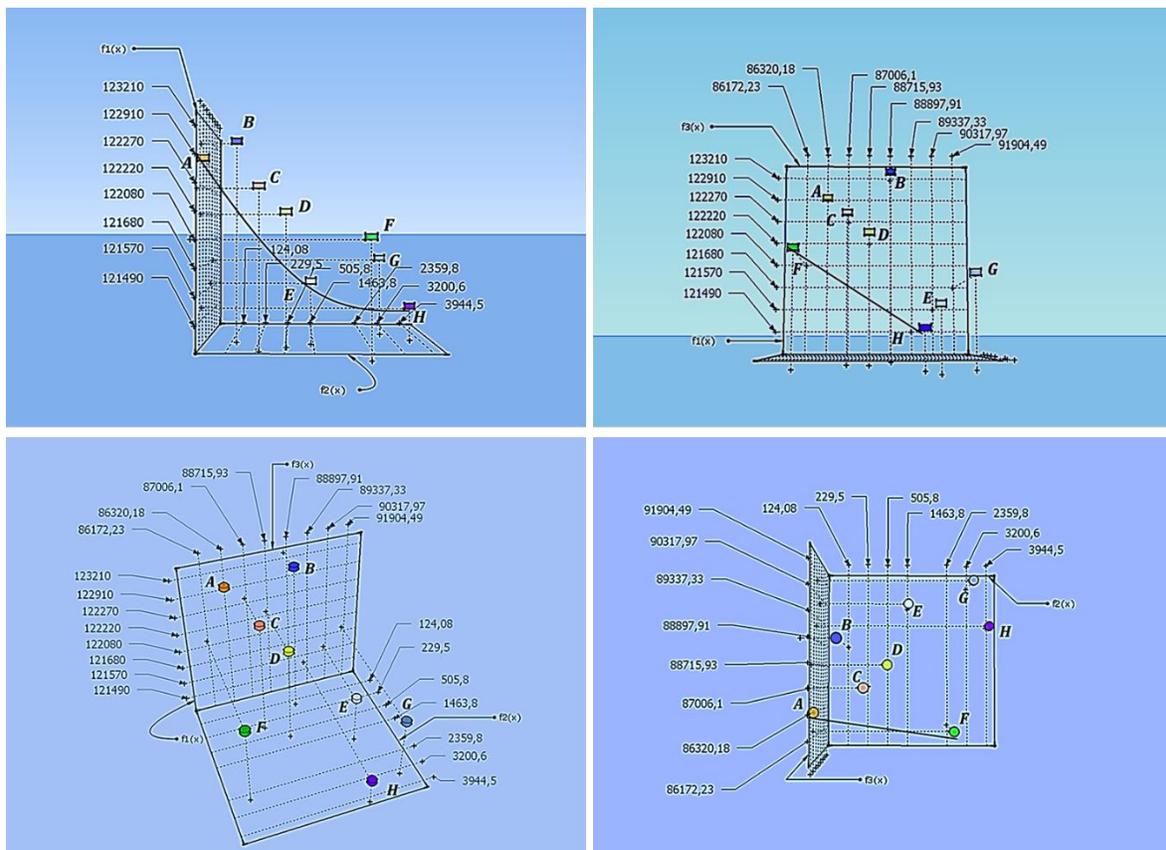


Figura 62. Diagrama de pareto de soluciones del municipio de Galeras. Fuente: construcción propia.

Tabla 33

Costos totales de los 26 resultados del municipio de Galeras

<i>Soluciones</i>	<i>Costo por Distancias</i>	<i>Costo por Violación de Tiempo</i>	<i>Costo emisiones de CO₂</i>	<i>Costo Total</i>	
H	\$ 121.490,00	\$ 3.944,67	\$ 89.337,33	\$ 214.772,00	
	\$ 121.570,00	\$ 1.463,78	\$ 90.317,97	\$ 213.351,75	
	\$ 121.680,00	\$ 3.200,57	\$ 91.904,49	\$ 216.785,06	
F	\$ 122.080,00	\$ 2.359,88	\$ 86.172,23	\$ <u>210.612,11</u>	
	\$ 122.220,00	\$ 490,93	\$ 88.743,53	\$ 211.454,46	
	\$ 122.220,00	\$ 505,82	\$ 88.715,93	\$ 211.441,74	
	\$ 122.270,00	\$ 229,47	\$ 87.006,08	\$ 209.505,55	
	\$ 122.380,00	\$ 162,63	\$ 89.131,95	\$ 211.674,58	
	\$ 122.380,00	\$ 234,69	\$ 88.680,24	\$ 211.294,93	
	\$ 122.390,00	\$ 229,47	\$ 89.795,67	\$ 212.415,14	
	\$ 122.490,00	\$ 1.177,27	\$ 88.489,26	\$ 212.156,52	
	\$ 122.500,00	\$ 2.052,89	\$ 87.864,85	\$ 212.417,73	
	\$ 122.780,00	\$ 3.998,24	\$ 87.092,40	\$ 213.870,64	
	\$ 122.850,00	\$ -	\$ 90.083,84	\$ 212.933,84	
	A	\$ 122.910,00	\$ -	\$ 86.320,18	\$ <u>209.230,18</u>
		\$ 123.170,00	\$ 140,81	\$ 88.664,87	\$ 211.975,68
\$ 123.210,00		\$ 124,08	\$ 88.897,91	\$ 212.231,99	
\$ 123.720,00		\$ 229,47	\$ 86.544,92	\$ 210.494,39	
\$ 123.730,00		\$ 988,60	\$ 86.068,23	\$ 210.786,83	
\$ 124.030,00		\$ -	\$ 86.324,30	\$ 210.354,30	
\$ 124.040,00		\$ 234,69	\$ 88.227,74	\$ 212.502,42	
\$ 124.340,00		\$ 153,85	\$ 90.126,67	\$ 214.620,52	
\$ 124.650,00		\$ 86,69	\$ 90.879,04	\$ 215.615,73	
\$ 125.160,00		\$ 152,37	\$ 86.348,41	\$ 211.660,77	
\$ 125.760,00		\$ 194,04	\$ 89.701,88	\$ 215.655,92	
\$ 127.010,00	\$ 6.118,64	\$ 89.727,37	\$ 222.856,01		

Nota: Costos correspondientes a los 26 resultados para el municipio de Galeras que presentan un GAP menor del 5%.
Fuente: construcción propia.

Se puede observar que el punto *A* es el resultado con menor costo, además de ello, las ponderaciones dadas, dan resultados en menor tiempo que el punto *F*. Por ende, se selecciona el punto $A = 209.230,18$, cuyos pesos correspondientes son: $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.8$ y $\gamma = 0.1$, con los cuales se obtuvo una respuesta óptima en 317,22 minutos.

Esta ruta, presenta una diferencia del 18,12% con respecto al costo actual. La relación de los costos obtenidos, se evidencia en la siguiente tabla. (Tabla 34).

Tabla 34
Comparación de costos municipio de Galeras

	Ruta Actual	Ruta sin emisiones, ventanas de tiempo y ralentí	Ruta Actual multas de tiempo y consumo	Ruta con emisiones, multas de tiempo y consumo en ralentí
Costos	\$ 226.755,6	\$ 221.491,6	\$ 255.546,439	\$ 209.230,18
Dif. % Con respecto al actual		-2,05%		-18,12%
Tiempo computacional		119,201		317,22
SOLVER		CPLEX		CPLEX

Nota: Resultados del modelo para el ruteo del municipio de Galeras X con nodos incluyendo 2 depósito. Fuente: Construcción Propia.

La disminución de costos del 18,12%, que se alcanza con el modelo, significa un ahorro diario de \$ 46.316,259 y anual de \$15.562.263,024.

La distancia actual que se recorre en la ruta de Galeras es 202,01 *km*. Sin embargo, la nueva ruta calculada que considera todos los costos arroja los siguientes resultados: Distancia recorrida 182,13 *km*, litros de combustible consumidos 40,486 *Lt*, tiempo de ruta 610,01 *min* con 0 *min* de violación de ventanas de tiempo. La diferencia de las rutas se evidencia en la siguiente imagen. (Figura 64).

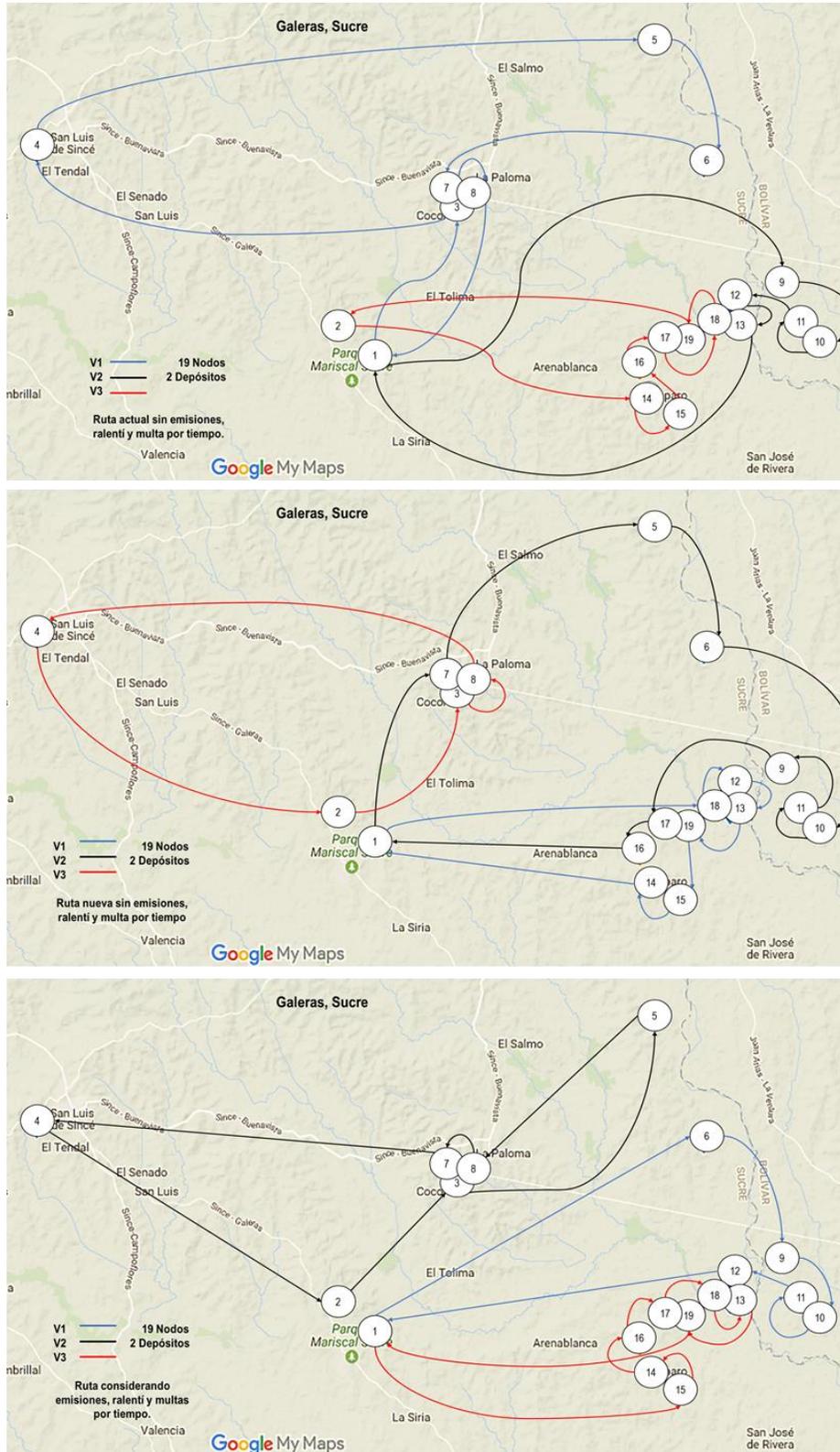


Figura 64. Comparación de la ruta actual, con las rutas dadas por el modelo en Galeras. Fuente: construcción propia.

Para la ruta calculada con el modelo que considera todos los costos, se muestran a continuación datos relevantes. (Tabla 35).

Tabla 35

Datos arrojados por el modelo en cada unidad productiva en Galeras

Unid. Productiva	Momento de llegada	Llegada Antes Va_i	Llegada Después Vb_i	Tiempo en Ralentí λ_i	d_i	p_i	Vehículo k	Centro de Acopio i
6	60	-	-	5	5	5		
9	90,85	-	-	3,51	3	3		
10	150	-	-	4,85	4	5	1	1
11	155,85	-	-	5	10	10		
12	176,55	-	-	4,68	4	4		
3	30	-	-	1,17	1	1		
5	75,17	-	-	3,68	3	4		
8	123,85	-	-	1,34	1	2	2	2
7	125,69	-	-	1,17	1	1		
4	169,86	-	-	5	8	9		
15	90	-	-	1,34	1	2		
14	93,34	-	-	2,51	2	3		
16	150	-	-	1,17	1	1		
17	155,17	-	-	1,17	1	1	3	1
18	161,34	-	-	2,17	2	1		
13	180	-	-	5	16	16		
19	202,72	-	-	4,68	4	4		

Nota: Datos relevantes de los resultados para el municipio de Galeras. Fuente: construcción propia.

8.2 Resultados obtenidos con la heurística adaptada de Clarke and Wright

La matriz de ahorros del C&W se calcula a partir de la matriz que suministre el problema, ya sea de distancia, costo, tiempo, etc. El ahorro se calcula basado en una sola matriz.

Sin embargo, al trabajar un modelo multiobjetivo, para poder abordar el conjunto de soluciones eficientes teniendo en cuenta los tres objetivos abordados (Distancia, violación de tiempo y emisiones de CO₂), se realizan las siguientes consideraciones:

1. Como el consumo de combustible del vehículo depende de varios factores tales como velocidad, carga, etc. Que varían según la ruta, no se puede calcular una matriz de consumo para este objetivo y generar de ahí matrices de ahorros.
2. Al tener una matriz de tiempo y distancia, las cuales son el suministro de información directa para los objetivos 1 y 2, se procede a generar un conjunto de soluciones partiendo de estas dos matrices.
3. Dadas las limitaciones de GAMS por aspectos técnicos y de licencia, no se pueden generar soluciones óptimas o cercanas que sean integrales para todos los municipios seleccionados. A diferencia del algoritmo desarrollado, en donde se integran todos los municipios generado matrices de gran tamaño.

Acorde a lo anterior, se generan dos conjuntos de soluciones factibles, uno basado en la matriz de distancia entre nodos y el otro en la matriz de tiempos de viaje, considerando así los objetivos del problema; para el tercer objetivo (emisiones de CO₂), se observará el comportamiento en las soluciones encontradas.

8.2.1 Soluciones prueba del algoritmo C&W

Para comprobar la eficiencia del algoritmo desarrollado, se consideraron inicialmente instancias de la literatura, las cuales al no poseer todos los datos necesarios para alimentar el modelo, se adaptaron. Las instancias utilizadas para validar las soluciones del modelo fueron las de CVRPPDTW (kleinezf\2a3c4b.knd), obtenidas de <http://neo.lcc.uma.es>.

Las instancias se adaptaron a 40 nodos y dos depósitos, con costos fijos de \$5000 para dos vehículos y costos variables de \$3 y \$4 respectivamente, dando como resultado una ruta eficiente con un costo de \$ 254.796,5 solo para el objetivo $f_1(x)$. La ruta se muestra a continuación. (Tabla 36).

Tabla 36
Mejor solución para instancia de la literatura

Veh	Dep																		
1	2	4	40	38	33	6	9	17	19	18	28	10	8	12	22	32	13	23	7
		30	25	31	26	37	27	34	3	1									
2	1	39	35	21	16	15	14	36	20	11	5	29	24	2					

Nota: Mejor solución eficiente obtenida con el Algoritmo C&W para instancias de la literatura. Fuente: construcción propia.

Posteriormente, se emplearon los datos reales correspondientes al municipio de San Marcos (22 nodos): matriz de distancia, capacidad y número de vehículos, cargue y descargue, costos fijos y costos variables. Estos datos, son exactamente iguales a los que se utilizaron para calcular el valor de la ruta de San Marcos sin considerar ventanas de tiempo, ni emisiones cuyo resultado óptimo fue un costo de \$139.587,36 y describe la siguiente ruta:

Veh.	Dep.	Ruta clientes											
V_1	1	7	10	8	9	11	19	18	17				
V_2	2	3	4	20	6	5	21	12	13	14	22	15	16

Dada la programación del algoritmo, se pueden ejecutar para que arroje el número de soluciones que se indiquen, las cuales pueden repetirse. Para la prueba se solicitó un total de 30 soluciones, en los que se muestra la ruta y el costo. Cabe resaltar, que aunque que en varias soluciones a pesar de no haber variaciones de costos, si hubo variación en las rutas.

Los costos arrojados por el algoritmo en las 30 soluciones de ruta solo en términos de costos fijos y variables por distancia ($f_1(x)$) fueron 4: \$ 139.990,746 - \$ 139.991,4384 - \$ 140.221,23- \$140.220,70. Siendo \$ 139.990,746 el menor costo y el cual difiere con el resultado óptimo solo en un 0,29%, considerándose un resultado eficiente.

Posterior a esto, se programan las ecuaciones para el cálculo del costo de ventanas de tiempo $f_2(x)$ y consumo de combustible $f_3(x)$ para observar la variación de los costos de la ruta.

Para realizar este cálculo, se obtienen nuevamente 30 soluciones a partir de la matriz de distancia y otras 30 soluciones con la matriz de tiempo de viaje entre nodos, para obtener un total de 60 soluciones las cuales se compararon con respecto a los tres objetivos abordados, en donde se observa que del conjunto de soluciones obtenidas, el menor costo por consumo de combustible obtenido es de \$106.328,07 y es menor que el costo de consumo de la ruta óptima en un 29%. La ruta es la N°2 que se observa en la siguiente tabla. (Tabla 37).

Por otra parte, para el costo de multa por violación de tiempo, se evidencia un incremento total que conlleva a un alto tiempo de violaciones y por ende, un alto costo. El costo mínimo obtenido en el conjunto de soluciones fue de \$82.301,32, correspondiente a la ruta N° 6 de la tabla 37.

El costo mínimo de ruta obtenido por el algoritmo es de \$386.064,96 para el conjunto de soluciones de la matriz de distancia y \$416.830,7 para el conjunto de soluciones obtenidos a partir de la matriz de tiempos; el mínimo entre los dos conjuntos de soluciones es mayor al costo óptimo en un 32,72%, debido al incremento que se da en los costos de violación por ventanas de tiempo.

A continuación se muestran 6 soluciones diferentes obtenidas con el algoritmo de C&W.

Tabla 37
Soluciones eficientes para San Marcos con algoritmo C&W

N°	Veh	Dep	Ruta clientes																
1	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	17	19	18	22	2												
2	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	17	18	19	22	2												
3	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	18	19	17	22	2												
4	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	22	17	19	18	2												
5	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	22	19	18	17	2												
6	1	1	6	7	11	10	9	8	20	5	21	4	12	13	14	3	15	16	1
	2	2	22	18	19	17	2												

Nota: Soluciones eficientes obtenidas con el Algoritmo C&W para el municipio de San Marcos donde se observa que a pesar de tener el mismo costo, la ruta puede variar en un nodo. Fuente: construcción propia.

8.2.2 Soluciones C&W para la matriz general

Validada la eficiencia del algoritmo construido, se procede a ingresar los datos de la matriz general con los datos agrupados de todos los municipios (San Marcos, Galeras, Buenavista y Sincelejo), para generar un conjunto de 100 soluciones eficientes. Para el cálculo de estas soluciones, las primeras 50 fueron calculadas a través de la matriz de distancias y las otras

50 mediante la matriz de tiempos. La matriz general quedó compuesta por 72 nodos que incluyen 6 centros de acopio y 66 clientes, y 7 vehículos disponibles. (Anexo 2).

Mediante el software GAMS, no se logró obtener un resultado con la matriz general debido a problemas de licencia, por lo cual se estipula como punto de partida, la sumatoria de las rutas óptimas de cada municipio, llegando a un costo de \$ 745.060,24.

Es preciso analizar, que los municipios se encuentran muy separados en términos de distancia, por lo cual, si un cliente ubicado en un municipio X , llega a ser asignado a un municipio Y , los costos variables, de consumo de combustible y violación de ventanas de tiempo, aumentarán considerablemente.

En este sentido, para las primeras 50 soluciones de ahorros por distancia (anexo 3), la solución que tuvo menor costo fue de \$ 1.385.604,03; para la diferencia calculada, entre el costo del objetivo $f_1(x)$ de las rutas óptimas que corresponde a \$382.970,01, el costo de este objetivo arrojado por el algoritmo es mayor en un 28,4%. En cuanto al objetivo $f_3(x)$, el costo arrojado por el algoritmo es mayor en un 44,84% y la ruta se muestra en la tabla. (Tabla 38).

Para las 50 soluciones del algoritmo de ahorros por matriz de tiempo (anexo 4), la solución de menor costo es de \$ 1.348.682,6. El costo del objetivo $f_1(x)$ arrojado por el algoritmo es mayor en un 25% del óptimo y para el objetivo $f_3(x)$ es 48,86% mayor. La ruta de menor costo se evidencia en la siguiente tabla. (Tabla 39).

Tabla 38
Mejor solución de 50 iteraciones matriz de distancias

Veh	Dep																			
1	6	25	16	17	14	10	8	9	11	12	13	22	18	19	15	20	23	7	40	6
4	5	42	26	24	21	35	34	30	33	32	31	27	5							
5	1	53	65	66	63	61	60	59	70	62	71	64	56	58	54	1				
6	2	57	55	72	67	48	47	49	50	2										
7	4	41	38	68	69	39	43	4												
2	3	52	44	36	28	29	37	3												
3	6	51	46	45	6															

Nota: Ruta de mayor eficiencia en costos calculada con el algoritmo de C&W a través de la matriz de distancia del conglomerado de municipios. Fuente: construcción propia.

Tabla 39
Mejor solución de 50 iteraciones matriz de tiempos

Veh	Dep																			
1	5	16	11	9	8	10	13	12	17	14	22	23	19	20	18	21	24			5
4	6	45	26	25	7	15	35	34	33	30	32	31	27	6						
5	1	54	55	71	65	63	61	59	60	70	62	66	53	1						
6	2	57	56	64	72	58	67	48	47	49	50	2								
7	3	36	68	69	38	39	43	3												
2	4	41	42	44	46	52	51	4												
3	5	37	40	29	28	5														

Nota: Ruta de mayor eficiencia en costos calculada con el algoritmo de C&W a través de la matriz de tiempo del conglomerado de municipios. Fuente: construcción propia.

9. Conclusiones

La cadena de suministro de lácteos del departamento de Sucre, no cuenta con una estructura definida lo que la convierte en una cadena poco competitiva, por lo cual en esta investigación, se realizó una caracterización y estructuración de la cadena haciendo énfasis en el proceso de aprovisionamiento de la leche cruda, debido a los problemas de asignación de rutas que actualmente se presentan. Lo que conllevó a la realización de una revisión literaria sobre los problemas de ruteo, todas las variantes que se abarcan y ajustan a la problemática y, las técnicas de solución para obtener respuestas de calidad.

En este sentido, se diseñó un modelo matemático multi-objetivo de VRP cuyo fin es la organización y distribución de las rutas de aprovisionamiento de leche cruda en el departamento de Sucre, focalizando las empresas pertenecientes a los municipios de mayor producción, legalmente constituidas y que a su vez cumplieran con los requisitos sanitarios del INVIMA.

Este modelo consideró tres objetivos, en donde $f_1(x)$ corresponde al objetivo de minimización de costo fijo y costos variables por distancia, $f_2(x)$ a las multas por violaciones de tiempo y $f_3(x)$ es el objetivo relacionado con las emisiones de CO₂. Además, las variantes que definieron el modelo fueron: entregas y recogidas simultáneas, ventanas de tiempo suaves, flota heterogénea, capacitado, multidepósito y consideración de las emisiones de CO₂ en términos de consumo de combustible.

Con la aplicación de estas variantes, y más concretamente con las entregas y recogidas simultáneas, se logró disminuir significativamente los tiempos de recolección, los cuales representaban un problema directo a las propiedades físico-químicas de la leche.

Asimismo, se logró evidenciar un ahorro significativo en comparación con el costo de rutas actuales, mediante la obtención de soluciones óptimas no dominadas con un método escalarizado para problemas multi-objetivos. El método utilizado fue el de pesos ponderados, el cual es considerado el segundo mayor utilizado en la literatura, (Aranda & Orjuela, 2015) y usado por su eficiencia en los problemas de VRP multi-objetivos que

consideran entregas y recogidas, permitiendo convertir en problema multi-objetivo, en un problema mono-objetivo, a través de la asignación de pesos ponderados, que posteriormente se fueron variando para hallar un conjunto de soluciones buenas y construir así, la frontera óptima de pareto.

Este conjunto de soluciones se obtuvieron con el Solver CPLEX de GAMS, arrojando resultados para cada uno de los municipios focalizados con los siguientes ahorros: San Marcos 13,75%, Buenavista 7,8%, Sincelejo 8,35% y Galeras 18,12%, que anualmente suman un ahorro en costo aproximado de \$ 39.736.082,576. Sin embargo, el tiempo asociado a la obtención de las soluciones seleccionadas como óptimas no dominadas, fue de 13,75 minutos, 11,306 segundos, 224,81 minutos y 317,22 minutos respectivamente. Estos dos últimos tiempos, considerados altos para un ruteo diario.

Sin embargo, dadas las condiciones del ruteo del departamento, los cambios en las rutas en términos de agregar clientes y/o cambiar la cantidad de producto a cargar/descargar, se realizan de manera esporádica, por lo que no se hace necesario modificar la ruta diariamente y las soluciones obtenidas se pueden aplicar sin ninguna restricción.

Para el caso de tener que realizar cálculos de la ruta para todo el departamento conjuntamente debido a la gran cantidad de variables que se abarcan y/o reprogramación de esta en tiempos cortos, se aplicó la heurística de ahorro de Clarke and Wright, que a pesar de ser una heurística simple, sin duda ha sido una de las más utilizadas a lo largo de la literatura, gracias a su flexibilidad, (Orrego, 2013). Esto, debido que no se lograron obtener soluciones óptimas para el ruteo con el método exacto, integrando todos los municipios.

La heurística fue programada en el software R, el cual pertenece al conjunto de software de cuarta generación y que mostró un excelente rendimiento computacional gracias a los paquetes de datos, matrices y simplicidad en el lenguaje de programación. Las soluciones se alcanzaron en un tiempo menor a un minuto, arrojando rutas con soluciones buenas para los objetivos $f_1(x)$ y $f_3(x)$, pero muy elevados para el objetivo $f_2(x)$.

En este sentido, con esta investigación se propuso un modelo matemático para minimizar los costos relacionados con el aprovisionamiento de la leche cruda, aportando a la

competitividad del sector y a la literatura de los problemas de VRP y más concretamente al VRPSPD. Con el cual se obtuvieron respuestas de calidad para las instancias empleadas, además, de soluciones para todos los municipios focalizados. Adicionalmente, con la heurística empleada, se evidenció la aplicación del modelo a todo el departamento de Sucre conjuntamente. Sin embargo, los costos se elevan demasiado y se violan por mucho las ventanas de tiempo debido al traslado de un vehículo en puntos ubicados intermunicipalmente.

10. Recomendaciones

Teniendo en cuenta las condiciones actuales del ruteo para la recolección de la leche cruda en el departamento de Sucre, no se hace necesario programar de manera diaria el ruteo de vehículos, por lo cual la utilización de métodos exactos para obtener respuestas óptimas es muy eficiente, a pesar de que tiendan a demorar para arrojar los resultados. Sin embargo, la utilización de métodos aproximados sigue considerándose una herramienta muy eficiente que permite la disminución de los tiempos y recursos computacionales para dar solución a este tipo de problemas.

Para poder mantener un equilibrio de costos en los resultados, se recomienda que se trabaje el problema de forma clusterizada y no holística, para obtener soluciones que permitan tomar decisiones y hacer modificaciones en los datos de entrada de manera más práctica. Todo esto, con el fin de obtener resultados en tiempos computacionales menores y mantener costos bajos conforme a la distancia recorrida, al consumo de combustible que esto conlleva y al incumplimiento de las ventanas de tiempo.

Para futuras investigaciones, se puede desarrollar un algoritmo de dos fases. En la primera fase puede considerarse la aplicación de métodos exactos o heurísticas, tales como el algoritmo de Clarke and Wright (C&W) que se desarrolló, para generar soluciones factibles iniciales teniendo en cuenta la capacidad del vehículo, multidepósito, las recogidas y entregas en cada nodo y los costos generados para los objetivos de distancia y consumo de combustible. Luego, la segunda fase buscará mejorar las soluciones iniciales teniendo en cuenta las ventanas de tiempo a través de metaheurísticas, tales como búsqueda tabú, algoritmos híbridos o algoritmos genéticos (AG) como el NSGA II o una adaptación del VEGA.

Por otra parte, se pueden abarcar otro tipo de consideraciones tales como la variante de entregas fraccionadas, según la naturaleza del problema o el aporte que se quiera realizar a la literatura.

11. Referencias

- Acvi, M., & Topaloglu, S. (2016). A hybrid metaheuristic algorithm for heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Expert Systems With Applications*, 53, 160 - 171.
- Aktiva. (2013). *Estudios Sectoriales. El sector productor de leche y productos lácteos en Colombia*. Aktiva, Servicios Financieros.
- Álvarez, R. (2017). *Propuesta de solución al problema de ruteo de vehículos en el operador logístico Operar S.A. para el transporte y distribución de productos alimenticios secos del grupo Nutresa S.A.* Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Aranda, A., & Orjuela, J. (2015). Multiobjective optimization in biofuel supply chain management. A review of the literature. *Ingeniería. Vol 20, No 1*, 21 - 47.
- Aravind, P., Deepak, E., & Brijesh, P. (2014). A Review of Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) Volume 15 Number 4*, 203 - 205.
- Ballesteros, P., & Zuluaga, A. (2016). *Review of state of the art vehicle routing problem with pickup and delivery (VRPPD)*. Obtenido de Revista Científica Ingeniería y Desarrollo:
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/8180/9040>
- Ballou, R. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. Mexico: Pearson Educación.
- Barajas, W. (2009). *Desarrollo de un algoritmo heurístico para establecer las rutas de transporte de la Secretaría de Educación de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Tesis para optar al título de magíster.

- Bektas, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B*, 45, 1232–1250.
- Berna, L. (2011). *Modelo de ruteo para entregas de mercancías a clientes por terceros en Sector Retail*.
- Bohorquez, N., Buitrago, A., Joya, M., Montaña, X., & Rivera, H. (2012). *Análisis Estructural de Sectores Estratégicos: Sector productos Lácteos. (Documento de Investigación; 135)*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- Calderon, J., & Lario, F. (2005). Análisis del modelo SCOR para la Gestión de la Cadena de Suministro. *IX Congreso de Ingeniería de Organización*, 1-10.
- Castellanos, A. (2012). *Diseño de un sistema logístico de planificación de inventarios para aprovisionamiento en empresas de distribución del sector de productos de consumo masivo*. San Salvador: Tesis de magíster. Universidad Francisco Gavidia.
- Castillo, H., & Bermeo, J. (2013). *Propuestas de Sistemas Inteligentes para la Implementación de un Modelo de Gestión Triple A en la Cadena de Suministros de Centros de Acopio de Leche cruda en la Provincia de Azuay*. Cuenca - Ecuador: Universidad Plitecnica Salesiana.
- Castro, R. (2001). *Otimização de Estruturas com Multi-objetivos Via Algoritmos Genéticos de Pareto*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Tesis Doctoral.
- Celis, M., & Juárez, D. (2009). *Microbiología de la Leche*. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe.
- Cepeda, G., San Lucas, M., & Delgado, E. (S.F.). Diseño e implementación de una heurística para el problema de ruteo vehicular con recolección y entrega de mercadería (vrppd) . *Escuela Superior Politecnica del Litoral. Centro de Investigación Científica y Tecnológica*.
- Cerralzoa, M., & Annicchiarico, W. (1996). *Algoritmos de optimización estructural basados en simulación genética*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

- Chauhan, S., Ereemeev, A., Romanova, A., Servakh, V., & Woeginger, G. (2005). Approximation of the supply scheduling problem. *Operational Research Letters* N° 33, 249 - 254.
- Coello, C. (2006). Evolutionary Multi-objective Optimization: A Historical View of the Field. *IEEE Computation Intelligence Magazine*, 29-36.
- Comité Nacional Sistema Producto Bovino Leche. (2015). *Situation de la Lechería a Nivel Mundial*. Mexico: US Dairy Export Council.
- CONPES. (2010). 3675. *Política Nacional para Mejorar la Competitividad del Sector Lácteo Colombiano*. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social. Departamento Nacional de Planeación.
- CONPES. (2010). 3675. *Política Nacional para Mejorar la Competitividad del Sector Lácteo Colombiano*. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social. Departamento Nacional de Planeación.
- Consejo Nacional Lácteo. (2011). *Propuesta de Valor Cadena Láctea Colombiana. Programa de Transformación Productiva (PTP)*. Bogotá.
- Contexto Ganadero. (13 de Octubre de 2013). *Colombia, cuarto mayor productor de leche en Latinoamérica*. Obtenido de www.contextoganadero.com: <http://www.contextoganadero.com/internacional/colombia-cuarto-mayor-productor-de-leche-en-latinoamerica>
- Cristóbal, J., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., & Irabien, A. (2012). Multi-objective optimization of coal-fired electricity production with CO₂ capture. *Appl. Energ*, 266-272.
- Cuartas, B. (2009). *Metodología para la optimización de múltiples objetivos basada en AG y uso de referencias* (Vol. Tesis de maestría). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

- DANE. (06 de Noviembre de 2015). Tercer Censo Nacional Agropecuario. *Décima entrega resultados 2014- cifras preliminares*. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- DANE. (31 de marzo de 2016). Tercer Censo Nacional Agropecuario. *Décimo segunda entrega de resultados 2014*. Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Deb, k. (1999). “*Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design*.” EUROGEN’99.
- Dell’Amico, M., Righini, G., & Salani, M. (2006). A branch-and-price approach to the vehicle routing problem with simultaneous distribution and collection. *Transportation Science*, vol. 40, n° 2, 235-247.
- Departamento Nacional de Planeación. (2007). *Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad de Sucre*. Bogotá.
- Desaulniers, G., Desrosiers, J., Erdmann, A., Solomon, M., & Soumis, F. (2000). *The VRP with Pickup and Delivery*. Montreal, Quebec: Cahiers du Gérard, ISSN 0711-2440.
- Eksioglu, B., Volkan, A., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering* 57, 1472–1483.
- FAO & FEPALE. (2012). *Situación de la Lechería en América Latina y el Caribe en 2011, Observatorio de la Cadena Lechera. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, División de Producción y Sanidad Animal*. Chile.
- FAO. (2013). *Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO2*. Roma: FAO.
- FEDEGAN. (2009). *Lo que usted necesita saber sobre la leche en Colombia*. Bogotá.
- FEDEGAN. (2012). *Retos de la Globalización en el Mercado lácteo*. Bogotá: Federación Nacional de Ganaderos.

- FUNDACIÓN ALPINA. (2012). *Análisis de Mercado*. Popayán (Colombia): Aalcaldia municipal de Popayán Y Universidad el Cauca.
- FUNDESARROLLO. (2014). *La Región Caribe en cifras*. Fundación para el Desarrollo del Caribe.
- Gaceta Departamental de Sucre. (2010). *Plan Vial Departamental de Sucre 2010-2019*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- Ghoseiri, K., & Ghannadpour, S. (2009). Hybrid Genetic Algorithm for Vehicle Routing and Scheduling Problem. *Journal of Applied Sciences*(9), 79-87. doi:10.3923/jas.2009.79.87
- Gobernación de Sucre. (2016). *Plan de Desarrollo 2016 - 2019 - Sucre Progresa en paz*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- González, G., & González, F. (2006). Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema. *Ingeniería e Investigación VOL. 26 No.3*, 149-156.
- González, Y., & Teran, L. (2010). *Diseño de uno modelo de asignación y ruteo para las bombas estacionarias desde las planta de concreto de HOLCIM (Colombia) S.A, Zona Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva granada. Monografía para optar el título de Especialista en Gerencia en Logística Integral.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2014). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 1 - 57.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2014). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 1-57.
- Grocery Manufacturers Asocciations. (2005). *Manual de la Cadena de Abastecimiento de Productos Alimenticios*. Washinton.

- Gutierrez, V., Palacio, J., & Villegas, J. (2007). Reseña Del Software. *Revista Universidad EAFIT 43 (145)*, 60–80.
- Handfield, R., & Nichols, E. (1999). Introduction to Supply Chain Management. (*Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall*, 2.
- Herazo, N. (2012). *Modelación Matemática del problema de Ruteo de Vehículos con Restricciones de Múltiples Depósitos, Flota Heterogénea de Vehículos y Ventanas de Tiempo*. Barranquilla: Tesis de pregrado.
- Hernandez, A., & Rafael, M. (2010). *Manual de Conducción Técnica de Vehículos Automotores Diesel: Segunda Edición*. Sanfandila, Qro: Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Insituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No 360.
- Hernández, F., Bustamante, L., Porto, I., & De la Ossa, S. (2014). Evaluation of the Degree of Competitiveness of Five Companies of the Dary Sector in Sincelejo, Colombia. *Investig.Desarro.Innov*, 5(1), 8-19.
- Huang, Y., Shi, C., & Zhao, L. (2012). A Study on Carbon Reduction in the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries. *Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands*, 302-307.
- Instituto Colombiano Agropecuario - ICA. (2016). *Censo Pecuario Nacional*. Bogotá: Ministerio de Agricultura.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2012). *Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 - 2010, para las Categorías de Energía y Procesos Industriales*. México D. F.: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE. (2005). *La Conducción Eficiente*. España: Publicaciones Treatise.

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE. (2007). *Manual de Conducción Eficiente para Vehículos Turismo*. Valencia: Agencia Valenciana de la Energía - AVEN.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volumen III*. Suiza: Revised 1996 .
- Jaramillo, A., & Areiza, A. (2012). *Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012)*. Bogotá: Super Intendencia de Industria y Comercio.
- Jaramillo, A., & Areiza, A. (2012). *Market Analysis of Milk and Dairy Products in Colombia (2008-2012)*. Bogotá: Super Intendencia de Industria y Comercio.
- Jiao, J., Xiao, Y., & Arun, K. (2006). An agent-based framework for collaborative negotiation in the global manufacturing supply chain network. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22, 239–255.
- Jiménez, J., & Hernández, S. (2002). Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico. En S. d. Transportes, *Publicación Técnica No. 215* (págs. 1-272). Sanfandila, Qro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Jiménez, J., & Hernández, S. (2002). *Marco Conceptual de la Cadena de Suministro: Un Nuevo Enfoque Logístico*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 215.
- Jourdan, L., Basseur, M., & Talbi, E. (2009). Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. *European Journal of Operational Research* 199, 620–629.
- Kazemian, I., & Samin, A. (2015). A green perspective on capacitated time-dependent vehicle routing problem with time windows. *Mathematics Subject Classification*, 1 - 15.
- Kelly, A., Leitner, G., & Merin, U. (2011). Milk quality and udder health: Test Methods and Standards. *Encyclopedia of Dairy Sciences. 2 ed. San Diego (USA)*, 894 – 901.

- Lamos, H., Galvan, S., González, L., & Cruz, C. (2013). PSO-Hybrid algorithm for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Revista Facultad de Ingeniería - UPTC. Vol 22, No. 35.* , 75-90.
- Legiscomex. (2016). *Exportaciones a 2015 de Productos Lácteos de Colombia*. Obtenido de [Legiscomex.com: http://www.legiscomexinstante.com/LCComex.asp?CodIdioma=ESP&DivMenu=Menu3&DivSubMenu=Menu3](http://www.legiscomexinstante.com/LCComex.asp?CodIdioma=ESP&DivMenu=Menu3&DivSubMenu=Menu3)
- Li, J., Pardalos, P., Sun, H., Pei, J., & Zhang, Y. (2015). Iterated local search embedded adaptive neighborhood selection approach for the multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups. *Expert Systems with Applications* 42, 3551 - 3561.
- Liu, R., Xie, X., Augusto, V., & Rodríguez, C. (2013). Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *European Journal of Operational Research-ELSEVIER Vol 230*, 475–486.
- Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte. *Workshop Internacional EIG2009 - Departamento de Ingeniería de Sistemas*.
- Mariscal, P., Ibáñez, R., & Gutiérrez, M. (2013). Características microbiológicas de leche cruda de vaca en mercados de abasto de Trinidad, Bolivia. *Revista Científica Agrociencias Amazonía v.1 n.2*, 18-24.
- Marler, R., & Arora, J. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 41 (6), 853 - 862.
- Martel, A. (2003). Le pilotage des flux. *CENTOR, Université Laval. DF-3.4.1*.
- Martínez, F. (2008). Optimización de diseño de rutas de vehículos usando algoritmos genéticos. *Revista Épsilon N° 11*, 21-29.

- Martínez, M., & Gómez, C. (2013). Compositional and Hygienic Quality of Raw Milk Received in Dairies in Sucre, Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Vol 11 No. 2*, 93 - 100.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation 213*, 455–465.
- Mendoza, F. (2010). *Diseño multiobjetivo y multietapa de sistemas de distribución de energía aplicando algoritmos evolutivos*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza. Tesis Doctoral.
- Meneses, R., Estrada, D., Chantré, C., & López, F. (2015). Characterization in the non formal chain of raw milk at the municipality of Popayan. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial Vol 13 No. 2* , 130-139.
- Mentzer, J., DeWitt, W., Keebler, J., Min, S., Nix, N., Srsmith, C., & Zacharia, Z. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics, Vol. 22, Núm. 2* , 1-25.
- Ministerio de transporte. (2010). *Plan nacional de desarrollo 2010 - 2014. Sector transporte*. Bogotá: ministerio de transporte.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2007). *Agenda prospectiva de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Cadena Láctea Colombiana*. Bogotá D.C: Giro Editores Ltda.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2010). *Dirección de Política Sectorial – Grupo de Análisis Sectorial. Boletín de análisis por producto. boletín No. 6*. Bogotá: MADR.
- Ministerio de Agricultura OGPA-DGPA. (2003). *Plan estratégico de la Cadena de Productos Lácteos* . Perú.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2016). *Perfil económico: Departamento de Sucre*. Bogotá: MinCIT. Oficina de Estudios Económicos.

- Ministerio de Trabajo. (2014). *Plan Departamental de Empleo de Sucre. Convenio N° 188. Programa de Asistencia Técnica para el Fortalecimiento de las Políticas de Empleo, Emprendimiento y Generación de Ingresos*. Fundación Panamericana para el Desarrollo - FUPAD. Opciones Gráficas Editores Ltda.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2011). *Decreto Número 1880 de 2011. Por el cual se señalan los requisitos para la comercialización de leche cruda para consumo humano directo en el territorio nacional*. Bogotá.
- Mojica, F., Trujillo, R., Castellanos, D., & Bernal, N. (2007). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico de la cadena láctea colombiana*. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Obtenido de www.minagricultura.gov.co.
- Monterroso, E. (s.f.). El proceso Logístico y la Gestión e la Cadena de Abastecimiento.
- Montoya-Torres, J., López, J., Nieto, S., Felizzola, H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering* 79, 115–129.
- Mosquera, J., Fernandez, S., & Mosquera, J. (2010). CO2 emissions analyze for several fuel of taxis sector on Pereira and Dosquebradas. *Scientia et Technica Año XVI, No 45*, 141-146.
- Olivero, R., Aguas, Y., & Cury, K. (2011). Raw Milk Marketing in Sincelejo, Sucre, Colombia. *Rev. Colombiana cienc. Anim.* 3(1), 157- 163.
- Orjuela, A. (2013). *Estudio de la Cadena Láctea y su aporte a la competitividad de la zona Noroccidental del Municipio de Pasto, Departamento de Nariño*. San Juan de Pasto: Tesis de Especialidad.
- Orrego, J. (2013). *Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada "CVRP" a través de la heurística de barrido y la implementación de algoritmo genético de Chu-Beasley*. Pereira: Universidad Tecnológica Pereira.

- Pradenas, L., Oportus, B., & Parada, V. (2013). Mitigation of Greenhouse Gas Emission in Vehicle Routing Problem With Backhauling. *Expert Systems With Applications* 40, 2985 - 2991.
- PricewaterhouseCoopers S.L (PWC). (S.f.). *Transporte y Logística 2030. Infraestructuras de transporte; ¿motor o freno de mano para las cadenas de suministros globales?* España: PwC.
- Quintero, J. (2013). *Propuesta metodológica para la recolección de leche en Colombia caso de estudio: provincia de Sugamuxi (Boyacá)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- Rebolledo, J., Duque, C., López, L., & Velazco, A. (2013). Profile of Colombian manufacturing sector. *Magazín Empresarial*, 9(19), 49 - 61.
- Red Nacional de Agencias de Desarrollo Local. (2013). *Plan Estratégico Departamental de Ciencia, Tecnología e Innovación de Sucre. Sucre Innova, Sucre Transforma - PEDCTI. Convenio 0592-2012*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- Redondo, C. (2017). *El programa R, herramienta clave en investigación*. España: Universidad de Cantabria.
- Reyes, V., Zabala, D., & Gálvez, J. (2008). A Review of Reverse Logistics Process and its Relation with Green Logistics. *Revista Ingeniería Industrial*, 85-98.
- Rocha, L., González, C., & Orjuela, J. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, Vol. 16, No. 2, 35 - 55 .
- Rosales, R., & Correa, M. (2014). Model of routing for raw milk collection using genetic algorithms. *Sistemas & Telemática*, 12 (31), 77-87.
- Santamaría, R. (2012). Supply chain in the profile of Industrial Engineering: an approach to the state of the art. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias. Año 5, Vol. III, N° 8*, 39-50.

- Saucedo, R. (2001). *Cadena de Suministro*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo Leon.
- Secretaria de Desarrollo Económico y Medio Ambiente. (2016). *Informe de Coyuntura Departamental*. Sincelejo: Gobernación de Sucre.
- Sombuntham, P., & Kachitvichyanukul, V. (Octubre de 2010). *Multi-depot Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery Requests*. Obtenido de ReseachGate: <http://www.researchgate.net/publication/253872907>
- Sotelo, J., & Tolón, A. (2011). Las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte por carretera. *Investigaciones geográficas*, N° 54, 133 - 169.
- Tajik, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Vahdani, B., & Mousavi, M. (2014). A robust optimization approach for pollution routing problem with pickup and delivery under uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems* 33 , 277–286.
- Torres, C. (2015). *Optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre*. Santiago de Chile: Universidad Politécnica de Vlencia. Pontificia Universidad Católica de Chile. Tesis Doctoral.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*(123), 487 – 512. doi:10.1016/S0166-218X(01)00351-1
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (s.f.). Procesos Logísticos de Aprovisionamiento. *Logística de aprovisionamiento*. UNAD.
- Vélez, A. (2011). *Estado del arte del área logística en el sector metalmecánico Pereira-Dosquebradas a partir de la revisión de trabajos de grado de la línea de énfasis en logística*. Pereira: Universidad Católica de Pereira.
- Vilana, J. (2011). *La Gestión de la Cadena de Suministro. Nota técnica 2.01*. Escuela de Organización Industrial.

Wang, F. C. (2012). A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pickup problems with time window. *Computers & Industrial Engineering* 62, 84 - 95.

APÉNDICE A

Evidencias fotográficas del transporte de la leche cruda en el Departamento de Sucre.



Figura 65. Transporte en moto de leche cruda. Fuente: propia



Figura 66. Transporte de leche cruda en vehículo de estaca. Fuente: propia.



Figura 67. Transporte de leche cruda en vehículos de tracción animal. Fuente: propia.



Figura 68. Medición de la leche. Fuente: propia.

APÉNDICE B

Formato 002: Encuestas Aplicadas a Centros de Acopio y Empresas Procesadoras de Leche Bovina en el Departamento de Sucre, Colombia.

Investigador: **José Luis Ruiz Meza**

Objetivo: Caracterizar la red de aprovisionamiento de leche cruda del Departamento de Sucre.

1. Aspectos generales

1.1. Nombre del Centro de Acopio, Empresa Procesadora

--

2. Ubicación del Centro de Acopio, Empresa Procesadora

Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenada Z

3. Demanda

Recepción de leche (Lt/día) de vehículos propios o contratados	Capacidad máxima de recepción

3.1. Unidades productivas en donde recolecta y cantidad

Unidad Productiva/Ganadería	Cantidad de leche acopiada en diversos días									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

4.2. Recolecta en recipientes de:

Aluminio	Acero	plástico

4.3. Propiedad de los recipientes:

Propios	De Vehículos recolectores	Unidades productivas

4.4. Número de vehículos utilizados

Propios (P)	Contratados fijos (F)	Contrato ocasional (O)

4.5. Clases de vehículos utilizados

Vehículo	Marca	Modelo	Año	Contrato (P-F-O)	Refrigerado (Si/No)
1					
2					
3					

4.6. Hora en que se realiza la recolección

Vehículo	Hora de salida	Hora llegada	Leche Recolectada (Lt/día)
1			

2			
3			

4.7. ¿Qué sucede cuando la leche no es recogida a tiempo?

5. Propiedad de Vehículos

5.1. Modalidad de Contratación del vehículo (solo para los vehículos que no son propios).

Vehículo	Contrato fijos	Valor Contrato	Modalidad	Contrato Ocasional	En caso de ser contratado Ocasional				
					Por día	Valor día	Por mes	Valor mes	Otra
1									
2									
3									

MODALIDAD: M= Mensual, S= Semestral, P= Propio, T= Trimestral, A= Anual e I= Indefinido

5.2. ¿Compran el combustible de los vehículos?

Si	
No	

En caso de si, cuanto se gastan en combustible por cada vehículo

Vehículo	Tipo de Combustible					
	Diésel	Gasto/día	Gasolina	Gasto/día	Gas	Gasto/día
1						
2						
3						

GASTO DÍA: Galones o Pesos

5.3. ¿El pago del contrato incluye el costo del conductor y los ayudantes?

Si	
No	

En caso de ser no, indique el valor del conductor y/o ayudantes

Vehículo	Valor/día Conductor	Valor día Ayudante
1		
2		
3		

5.4. Gastos adicionales

¿Qué otros costos tiene en el proceso de acopio?

Cuales	Fijos	Variables	frecuencia	Cuanto

Frecuencia: D= Diario, S= Semanal, M= Mensual, A= Anual.

APÉNDICE C

Formato 001: Encuestas Aplicadas a Ganaderías y Unidades Productoras de Leche Bovina en el Departamento de Sucre, Colombia.

Investigador: **José Luis Ruiz Meza**

Objetivo: Caracterizar la red de aprovisionamiento de leche cruda del Departamento de Sucre.

1. Aspectos generales

a. Nombre de la Ganadería/Finca/Hacienda o Unidad Productiva - Propietario

2. Ubicación de la Unidad Productiva

Coordenadas X	Coordenadas Y	Coordenada Z (altura)

3. Cantidad de leche vendida en Industria en Lt

a. Hora de finalización del ordeño

b. Leche vendida en industria

Centros de Acopio	Empresas procesadoras
Nombre(s) de la(s) Entidad(es)	

4. Aspectos de Acopio

a. Recolecta en tanques de:

Aluminio	Acero	Plástico	Otros

b. Propiedad de los tanques:

Propios	De Vehículos recolectores	Centros de Acopio

c. Tiempo de Recolección por parte del vehículo (minutos)

d. Hora en que se realiza la recolección

Hora Llegada	Hora Salida

APÉNDICE D

Formato 003: Encuestas Aplicadas a Conductores de Vehículos Recolectores de Leche Bovina en el Departamento de Sucre, Colombia.

Investigador: **José Luis Ruiz Meza**

Objetivo: Caracterizar la red de aprovisionamiento de leche cruda del Departamento de Sucre.

1. Aspectos generales

a. Número de ayudantes

b. Centro de Acopio/Empresa Procesadora

2. Características técnicas del vehículo

Marca	
Modelo	
Año	
Refrigerado (Si/No)	
Peso vacío (Tara)	
Peso de Carga Máxima	

3. Aspectos de Acopio

a. Recolecta en recipientes de:

TIPO	Aluminio		Plástico		Otros	
	Lleva Vacíos	Trae llenos	Lleva Vacíos	Trae llenos	Lleva Vacíos	Trae llenos
N°						
Capacidad (Lt)						

b. Propiedad de los tanques:

Propios	De ganaderías/ unidades Productivas	Centros de Acopio/ Empresas Procesadoras

c. Hora de partida

d. Unidades productivas en donde recolecta, cantidad y ruta habitual

No	Unidad Productiva/Ganadería	Cantidad Acopiada (Lt/día)	Orden	Hora de llegada	Hora de Salida
1					
2					
3					
4					



5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					

19					
20					
21					
22					

e. Hora de llegada al Centro de Acopio/Empresa Productora

f. ¿Compran el combustible de los vehículos con dinero propio?

Si	
No	

Cuanto se gastan en combustible por ruta

Vehículo	Tipo de Combustible					
	Diésel	Gasto/día	Gasolina	Gasto/día	Gas	Gasto/día

GASTO DÍA: Galones, Litros o Pesos

g. ¿Cada cuantos kilómetros se realiza el cambio de aceite y cuánto cuesta?

Kilómetros de cambio	Costo

h. ¿Aproximadamente, cada cuánto hace cambio de llantas y que costo tiene cada llanta?

Tiempo o Kilómetros	Costo