

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MÁGISTER EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE CON
MENCIÓN EN MODELOS DE OPTIMIZACIÓN”**

TEMA

DISEÑO DE RUTAS APLICANDO PROGRAMACIÓN
MATEMÁTICA PARA LA DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DE LÁCTEOS
DE LA EMPRESA RBP

AUTOR

PAUL ANTONIO CARRERA MEJIA

Guayaquil – Ecuador

2019

DEDICATORIA

A mi **MADRE**, quien es mi inspiración y me impulsa a superarme constantemente.

A mi **ESPOSA**, por su apoyo incansable durante todo este tiempo, por supuesto a mis **HIJOS**, quienes son mi motor de vida.

A toda mi familia, en especial a quienes han partido en los últimos años, porque han sido una constante guía desde mis primeros años.

AGRADECIMIENTO

Indudablemente a **DIOS**, por la vida maravillosa que me ha dado y por todo aquello que recibo día a día, más aun siendo Él quien me permite cumplir con esta meta.

Por supuesto a mi **MADRE**, mi **ESPOSA** y mis **HIJOS** por el esfuerzo realizado, el mismo que hoy me permite compartir con ellos este logro.

A mis compañeros y amigos quienes han aportado en esta investigación.

Un agradecimiento especial al Mat. Fernando Sandoya Sánchez Ph.D., por su guía, paciencia y valioso tiempo.

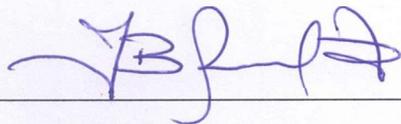
DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponde exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Postgrados** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Paul Carrera Mejía', written over a horizontal line.

Ing. Paul Carrera Mejía

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Johni Bustamante Romero, Ph.D.
Presidente



Brenda Cobeña Terán, Mgtr.
Director



Pedro Ramos De Santis, Mgtr.
Vocal



Klever Barcia Villacreses, Ph.D.
Vocal

AUTOR DEL PROYECTO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Paul Carrera Mejía', is written over a horizontal line.

Ing. Paul Carrera Mejía

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ABREVIATURAS O SIGLAS.....	xiii
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes y Justificación	3
1.1.1 Producción lechera nacional	6
1.1.2 Proyección del negocio	10
1.1.3 El sector de transporte y logística en el Producto Interno Bruto.....	13
1.1.4 Empleo del sector del transporte y logística	15
1.2 Planteamiento del Problema	17
1.3 Objetivo General.....	22
1.4 Objetivos Específicos	22
1.5 Estructura de la Investigación	23
CAPÍTULO 2	24
MARCO TEÓRICO	24
2.1 El Problema del Ruteo de Vehículos (VRP)	25
2.1.1 Los Clientes.....	26
2.1.2 Los Depósitos.....	26
2.1.3 Los Vehículos.....	27
2.2 Modelos y métodos de solución	29
2.3 Modelo matemático para el Problema de Enrutamiento de Vehículos Heterogéneos con Múltiples Depósitos y Ventanas de Tiempo (MDHVRPTW).....	39
2.3.1 Función Objetivo y Restricciones	43
2.4 Método de solución	48
2.4.1 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)	52

2.4.2	Fase constructiva	53
2.4.3	Fase de mejora	54
CAPÍTULO 3		56
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		56
3.1	Desarrollo metodológico	56
3.1.1	Definición.....	56
3.1.2	Estructura logística	67
3.1.3	Segmentación del proceso de distribución	69
3.2	Diagnóstico de la situación actual	71
3.2.1	Factores críticos del proceso de distribución.....	72
3.2.2	Problemas detectados en el proceso de distribución	74
3.2.3	Causa origen de los problemas encontrados	80
CAPÍTULO 4		82
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		82
4.1	Diseño óptimo de rutas para la distribución de lácteos	86
4.2	Resultados numéricos	99
4.3	Validación del modelo de ruteo propuesto	105
CAPITULO 5		115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		115
5.1	Conclusiones y recomendaciones	115
CAPITULO 6		117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Supply chain design and analysis: Models and methods (Beamon, 1998).....	5
Figura 2. Producción de leche en la última década.....	7
Figura 3. Distribución espacial empresas procesadoras de lácteos.....	9
Figura 4. Competitividad Sistémica: Nuevo desafío para las empresas y la política (CEPAL, 1996).....	12
Figura 5. PIB del sector transporte y logística (Ekos, 2015)	15
Figura 6. Empleo del sector transporte y logística (Ekos, 2015)	16
Figura 7. Variantes del VRP (Restrepo, Medina, & Cruz, 2008) (Soto, Soto, & Pinzón, 2008) (Xu, Wang, & Yang, 2012)	30
Figura 8. División del espacio en k áreas.....	50
Figura 9. Segmentación de datos espaciales.....	51
Figura 10. Combinación de subtour	53
Figura 11. Ciclo Hamiltoniano	54
Figura 12. Fase de búsqueda en vecindad	55
Figura 13. Distribución espacial de clientes por zonas	62
Figura 14. Distribución espacial de Almacenes.....	63
Figura 15. Organigrama de CDA de la organización.....	69
Figura 16. Etapas de la gestión de pedidos	70
Figura 17. Etapas del proceso de distribución	71
Figura 18. Variables deliberantes en la asignación de rutas.....	72
Figura 19. Pedidos devueltos Clúster # 1	77
Figura 20. Pedidos devueltos Clúster # 2	78
Figura 21. Pedidos devueltos Clúster # 3	78
Figura 22. Frecuencia de entrega	83
Figura 23. Disponibilidad de la flota	84
Figura 24. Parámetros de entrada	85
Figura 25. Nodos por frecuencia de entrega.....	86
Figura 26. Rutas Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes	89
Figura 27. Rutas Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado.....	91

Figura 28. Rutas Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes	93
Figura 29. Rutas Clúster # 2: Martes – Jueves – Sábado	95
Figura 30. Rutas Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes	97
Figura 31. Rutas Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado	99
Figura 32. Validación Rutas Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes	106
Figura 33. Validación Rutas Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado	107
Figura 34. Validación Rutas Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes	109
Figura 35. Validación Rutas Clúster # 2: Martes – Jueves – sábado	109
Figura 36. Validación Rutas Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes	111
Figura 37. Validación Rutas Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Empresas procesadoras en la región Sierra	10
Tabla 2. Empresas procesadoras en la región Costa	10
Tabla 3. Variables de estudio: Tipo de empaque y producto	19
Tabla 4. Variables de estudio: Medio de transporte y entrega	20
Tabla 5. Costos de fletes CD1 – Provincia del Guayas (USD.).....	21
Tabla 6. Costos de fletes CD2 – Provincia de Pichincha (USD.)	21
Tabla 7. Costos de fletes CD3 – Provincia de Los Ríos (USD.).....	21
Tabla 8. Clientes Región Costa.....	58
Tabla 9. Clientes Región Sierra	59
Tabla 10. Clientes Región Oriente	59
Tabla 11. Distribución zona 1 (K1).....	60
Tabla 12. Distribución zona 2 (K2).....	61
Tabla 13. Distribución zona 3 (K3).....	61
Tabla 14. Ubicación de almacenes	63
Tabla 15. Demanda Semanal.....	65
Tabla 16. Tamaño de la flota contratada.....	66
Tabla 17. Parámetros generales de la asignación diaria de rutas.....	67
Tabla 18. Tiempos acumulados de procesos por día.....	76
Tabla 19. Indicador del nivel de aprovechamiento de la flota	80
Tabla 20. Índices del modelo	82
Tabla 21. Resumen asignación de rutas.....	87
Tabla 22. Detalle Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes.....	88
Tabla 23. Detalle Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado	91
Tabla 24. Detalle Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes.....	92
Tabla 25. Detalle Clúster # 2: Martes – Jueves – Sábado	94
Tabla 26. Detalle Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes.....	96
Tabla 27. Detalle Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado	98
Tabla 28. Proyección de fletes por semana	100
Tabla 29. Costo de distribución Clúster # 1	102
Tabla 30. Costo de distribución Clúster # 2	104

Tabla 31. Costo de distribución Clúster # 3	105
Tabla 32. Resumen Validación Modelo VRP	113
Tabla 33. Resumen anual	114

ABREVIATURAS O SIGLAS

CIU: Clasificación Internacional Industrial Uniforme.

CD: Centro de Distribución.

INEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

ZEDE: Zona Especial de Desarrollo Económico.

VRP: Vehicle Routing Problem o Problema de Ruteo Vehicular.

TSP: Traveling Salesman Problem o Problema del Agente Viajero.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

PIB: Producto Interno Bruto, representa el valor monetario de los bienes y servicios finales producidos por una economía en un periodo de tiempo determinado, es un indicador que ayuda a medir el crecimiento o decrecimiento de la producción de las empresas de cada país

PEM: Proceso que permite llevar a cabo acciones para asumir las competencias en materia de tránsito y transporte de una determinada jurisdicción.

Competitividad sistémica: La competitividad internacional a nivel de empresa, país o región, es vista como el resultado de las interacciones de los cuatro niveles de organización social: nivel meta, nivel macro, nivel meso y nivel micro.

PVO: Planeación de Ventas y Operaciones, proceso de toma de decisiones en donde se busca balancear la demanda y el suministro de manera agregada (tipos de productos). El resultado de este proceso son planes consensuados que establecen cómo responderá la empresa a los requerimientos del mercado

NP-Hard (Nondeterministic polynomial time Problem Hard): Son considerados como problemas “difíciles de resolver”, provienen de la teoría de la complejidad computacional. Para estos problemas no es posible garantizar el encontrar la mejor solución posible en un tiempo razonable.

RESUMEN

El presente estudio tiene como finalidad conocer y modelar el comportamiento del proceso de distribución de la industria dedicada al procesamiento y distribución de alimentos refrigerados el cual evidentemente es similar en varias empresas del sector, con la búsqueda permanente de mejores rendimientos en lo relacionado a la reducción de costos por medio de una adecuada gestión de los tiempos de tal manera que la rentabilidad del negocio sea la esperada.

Se presenta una propuesta metodológica para el proceso de distribución basada en criterios de modelos VRP considerando todas las variantes encontradas como múltiples depósitos, clientes geográficamente dispersos en zonas distantes del territorio nacional, flota de capacidades heterogéneas y ventanas de tiempo para cada cliente; siempre en la búsqueda de la optimización de los recursos disponibles y considerando a la par el nivel de servicio adecuado. Así mismo, se identifica el método de solución más apropiado para obtener la mejor solución posible en un tiempo de ejecución razonable.

La investigación busca el desarrollo del modelo matemático que represente apropiadamente todas las condicionantes del mundo real, de tal manera que la toma de decisiones posterior sea en base a criterios fundamentados en la metodología desarrollada para el estudio de la problemática existente.

Palabras clave:

Modelo matemático, VRP, depósito, cliente, ventana de tiempo, costo, nivel de servicio.

ABSTRACT

The purpose of this study is to know and model the behavior of the distribution process of the industry dedicated to the processing and distribution of refrigerated foods, which evidently is similar in several companies in the sector, with the permanent search for better yields in relation to the reduction of costs by means of an adequate management of the times in such a way that the profitability of the business is the expected one.

A methodological proposal for the distribution process based on VRP model criteria is presented considering all the variants found as multi-depots, customers geographically dispersed in distant areas of the national territory, fleet of heterogeneous capacities and time windows for each client; always in the search of the optimization of the available resources and considering at the same time the level of adequate service. Likewise, the most appropriate solution method is identified to obtain the best possible solution in a reasonable execution time.

The research seeks the development of the mathematical model that appropriately represents all the determinants of the real world, in such a way that the subsequent decision making is based on criteria based on the methodology developed for the study of the existing problem.

Keywords:

Model, VRP, depot, customer, time window, cost, service level.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda y resuelve la problemática del proceso de distribución de lácteos procesados y empacados por una empresa hacia clientes ubicados en las diferentes regiones del Ecuador; para este propósito es necesario analizar previamente la magnitud en que aporta cada uno de los sectores intervinientes en el desarrollo de las actividades necesarias para el negocio, como son: el sector ganadero, el sector industrial de manufactura y el sector del transporte.

El sector agropecuario se constituye en uno de los más importantes dentro de la economía del país, dado que permite satisfacer en buena medida las necesidades de productos alimenticios, ya sean estos como bienes de consumo inmediato o como materias primas previa la industrialización de los mismos. La producción lechera tanto intensiva como extensiva es considerada como la columna vertebral del sector, en el cual alrededor de un millón y medio de personas dependen de manera directa e indirecta de esta actividad, en una constante búsqueda del mejoramiento de la producción aplicando nuevas tecnologías.

Según lo describen los autores (Horna, Guachamin, & Osorio, 2009), la industria es uno de los sectores que más aportan a la producción interna bruta de cada país y su evolución permite el desarrollo de los países en cuanto a mejorar la eficiencia operativa, el desarrollo de la ciencia, la tecnología, la innovación, y a su vez impulsan el crecimiento de los demás sectores de la cadena. En un gran número de países de América, la industria ocupa entre el segundo y tercer puesto en importancia por su contribución al PIB y como fuente de empleo.

El transporte terrestre se ha convertido en un elemento primario para el desarrollo de todas las actividades relacionadas con el comercio, por tanto, contar con la infraestructura adecuada permite lograr un mayor dinamismo y cobertura del sector. El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP,

2016) informa que la infraestructura vial terrestre en el Ecuador resulta adecuada en relación a la cobertura espacial, la misma que permite una normal conexión – aunque no necesariamente eficiente – entre los puntos de origen y destino de las cargas. No obstante, se evidencia en los últimos años una mejora significativa en la red vial nacional como consecuencia de la construcción y rehabilitación de las carreteras de primer y segundo orden, a pesar de encontrarse en zonas con difícil acceso debido a las condiciones geográficas existentes. Tal es el caso de la provincia de Esmeraldas, la misma que se encuentra ubicada al noroeste del país en donde solo por transporte fluvial se puede acceder a ciertas zonas, así mismo podría notarse que las provincias de la región amazónica en su mayoría se encuentran separadas de los grandes centros de producción y consumo.

La presente investigación se enfoca en el “diseño metodológico sobre la logística de la distribución óptima aplicando modelos matemáticos apropiados que satisfagan las variables del sistema”; el desarrollo metodológico de la representación del proceso se analizará en detalle en apartados posteriores: (3.1.1) en la *Definición* se orienta la investigación hacia la delimitación de las áreas geográficas, la ubicación de los puntos de entrega y la georreferenciación de los centros de distribución, (3.1.2) la *Estructura logística* se enfoca en el organigrama institucional y la cadena de mando dentro del área a fin de identificar los distintos niveles de responsabilidad existentes, (3.1.3) la *Segmentación del proceso de distribución* tiene como objetivo identificar a los distintos integrantes del proceso de distribución y su importancia dentro de la cadena de abastecimiento. Finalmente, el apartado (3.2) se orienta a realizar un *Diagnóstico de la situación actual* en tal virtud se analizan exhaustivamente sus factores críticos, los problemas detectados y causas que lo originan, de tal manera que se logre una visión general del desempeño del proceso de distribución, en la búsqueda de posibles oportunidades de mejora para el negocio.

1.1 Antecedentes y Justificación

Las industrias actualmente se encuentran afectadas por las exigencias de un mundo cada vez más globalizado, fruto de lo cual el ámbito empresarial se torna muy cambiante y competitivo; esto obliga a que los procesos de toma de decisiones deban responder a un análisis profundo y complejo que debe abordar varias direcciones y enfoques. Muchas organizaciones en la actualidad enfrentan problemas relacionados al transporte de mercancías, personas y otros, y las redes existentes procuran satisfacer la demanda de movilidad, constituyéndose en sí mismas como una función de creciente relevancia; de igual manera, una creciente demanda de servicios impulsa a las empresas a la implementación de nuevas tecnologías dado que las necesidades de los clientes son cada vez más complejas e impulsan una mayor inversión en términos de innovación y competitividad.

Las empresas concentran gran parte de sus esfuerzos en encontrar la manera de diferenciar sus productos de aquellos que oferta la competencia; sin embargo, cuando las directrices reconocen que la logística afecta a una parte importante de los costos de producción y que consecuentemente el resultado de sus decisiones en relación a los procesos de la cadena de abastecimiento produce utilidad en los diferentes niveles de servicio al cliente, se da por entendido que la organización está en la posición de usar este mecanismo para penetrar mayormente en el mercado. De manera simplificada se puede inferir que una correcta dirección en la cadena de abastecimiento implica no solo una reducción de costos, sino también una generación en ventas.

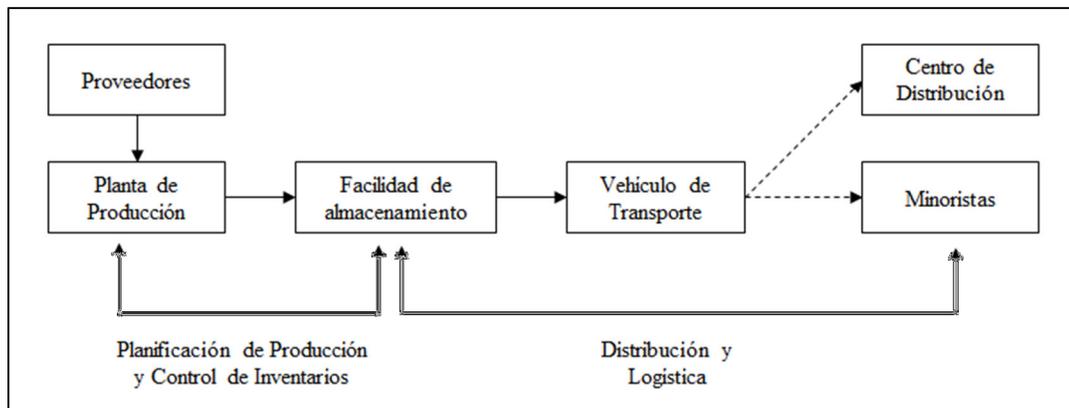
Un producto tiene poco valor si no está disponible en el lugar y momento adecuado para el cliente, por tal razón cuando las empresas incurren en costos relacionados al movimiento de sus productos o aprovisionarse de manera oportuna, intuitivamente han creado un valor para el cliente que en el pasado no era percibido en su real magnitud; este valor es indudablemente tan importante como el creado en la fabricación de un producto de buena calidad o mediante un precio competitivo.

La actualidad de los negocios ha ocasionado que los consumidores esperen que sus productos estén disponibles en tiempos cada vez menores. La gran variedad y mejora en los sistemas de información y comunicaciones, así como la flexibilización de los procesos de manufactura prácticamente han llevado a las empresas a la “fabricación personal en masa”, de igual manera los proveedores están ofreciendo satisfacer la demanda del mercado con más detenimiento.

De acuerdo a los autores (Vidal & Goetschalckx, 1997), el análisis y el diseño de nuevos y eficientes sistemas de producción y distribución ha sido un área activa de investigación durante muchos años. La mayoría de las investigaciones se ocupan de un solo componente del sistema general de producción y distribución, como la compra, la producción y la programación, el inventario, el almacenamiento o el transporte. Hasta la fecha, existe una limitada investigación que aborde la integración de estos componentes en la cadena de suministro global; sin embargo, se presentan oportunidades de mejora de la competitividad en temas relacionados a la incorporación de todos los procesos de la red logística con la participación de todos sus componentes. En tanto, el problema se resume en la “coordinación total”, la cual se clasifica en tres categorías: coordinación entre las actividades de suministro y producción, coordinación entre actividades de producción y distribución, y coordinación entre actividades de inventario y distribución.

Según describe (Yepes, 2002), los problemas inherentes a la toma de decisiones rentables para las empresas se suscitan entorno a la cantidad de recursos disponibles, esto es: personal, presupuesto, tiempo, etc., o en relación al cumplimiento de determinados requisitos mínimos como: nivel de producción, horas de descanso, tiempos de entrega, calidad de servicio, etc. los mismos que condicionan la elección de una solución óptima, ya sea en el ámbito estratégico, táctico u operativo. El propósito final al tomar la decisión será llevar a cabo el plan propuesto de manera óptima, considerando los siguientes criterios: costos mínimos, máximos beneficios, máxima satisfacción al cliente, entre otros.

El autor (Beamon, 1998) expresa que, una cadena de suministro se define básicamente como un proceso integrado en el que varias entidades trabajan juntas en un esfuerzo común para: (1) adquirir materias primas necesarias para el proceso, (2) convertir las materias primas adquiridas en productos terminados y listos para el consumo, y (3) entregar estos productos finales a los minoristas para su distribución; al mismo tiempo que en el presente el concepto de cadena de suministro tradicional se extiende, al incluir a la “logística inversa” como el proceso de recuperación del producto con fines de reciclaje, reproceso y reutilización. Sin embargo como se aprecia a continuación en la Figura 1, en su nivel más amplio, una cadena de suministro se compone de dos procesos básicos integrados: (1) el proceso de planificación de producción y control de inventarios, y (2) el proceso de distribución logística.



**Figura 1. Supply chain design and analysis: Models and methods
(Beamon, 1998)**

En resumen, los procesos anteriormente descritos proporcionan el marco referencial para la transformación y el movimiento de materias primas en productos finales.

El diseño más completo apunta a la optimización de toda la cadena de abastecimiento, para lo cual se requiere de la toma de decisiones a un nivel estratégico, entre las que se destacan:

- El número, ubicación, capacidad y tipo de plantas de fabricación y almacenes a utilizar;

- El conjunto de proveedores para seleccionar;
- Los canales de transporte a utilizar;
- La cantidad de materias primas y productos para producir y enviar entre proveedores, plantas, almacenes y clientes; y
- La cantidad de materias primas, productos intermedios y productos terminados para mantener en diferentes ubicaciones en el inventario.

1.1.1 Producción lechera nacional

De acuerdo a (INEC, 2017) y como se muestra a continuación en la Figura 2 en la última década la producción nacional se ha mantenido en niveles importantes, en particular en los años 2011 y 2013 se superó los 6 millones de litros diarios; así mismo, para el periodo 2016 la producción superó los 5.3 millones de litros para el consumo interno.

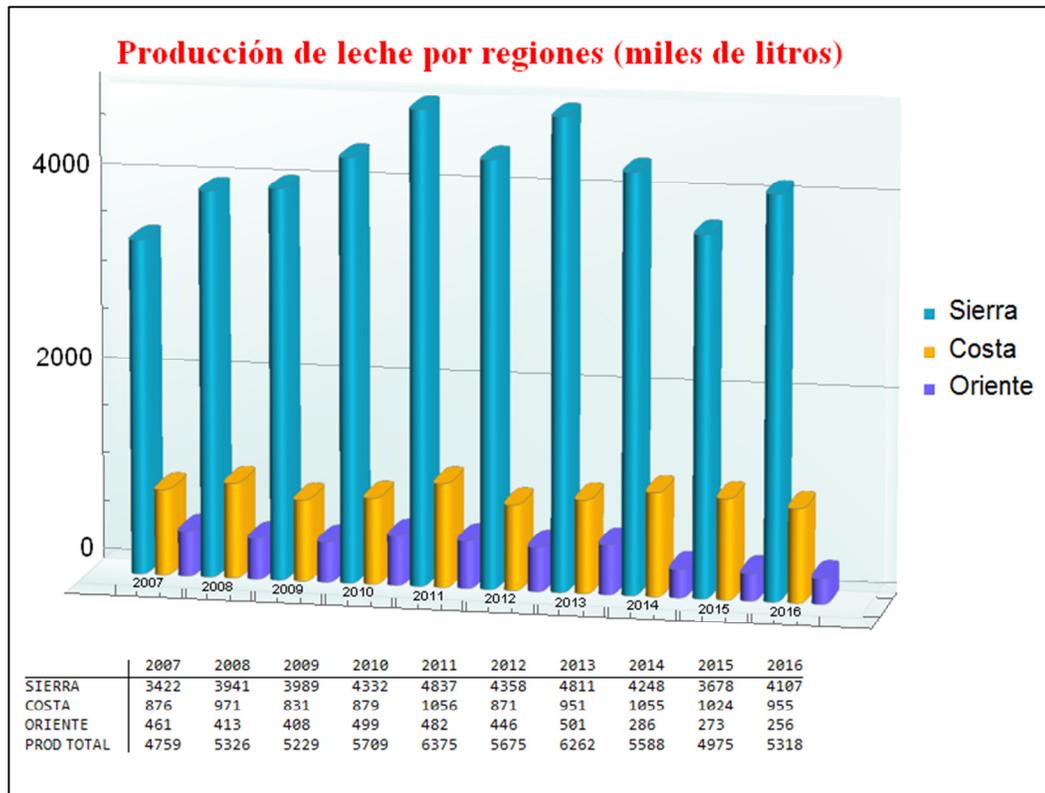


Figura 2. Producción de leche en la última década

En concordancia a los volúmenes de producción alcanzados, se nota claramente que la ganadería lechera representa una fuente importante de ingresos para el sector, en especial para el pequeño productor, sector en el cual el campesino es dueño de su hato de ganado con una producción promedio diaria de 50 litros, los que posteriormente son recolectados y transportados a las plantas procesadoras para su proceso de pasteurización y elaboración de los distintos tipos de productos como son principalmente las leches y menor proporción los derivados del mismo. Es importante notar que para efectos de hacer un negocio sustentable, los ganaderos se han organizado en busca de acuerdos con los distintos sectores industriales, principalmente las procesadoras y la transportación de alimentos, así también los gobiernos de turno.

Según un informe de la Asociación de Ganaderos de la Sierra y Oriente (AGSO, 2017), la producción de leche se concentra en cinco provincias, de las

cuales cuatro pertenecen a la región Sierra y una a la región Costa. Entre ellas la principal productora es la provincia de Pichincha, en donde se extraen diariamente producto del ordeño 970,000 litros en promedio. Así mismo el 48% de esta producción se distribuye a las industrias procesadoras, el 21% se queda como autoconsumo y para alimentación a las crías, el restante 31% se comercializa directamente como leche cruda y derivados sin pasteurizar.

De acuerdo a la clasificación CIIU; las actividades de elaboración de productos lácteos el cual en su forma general comprende la pasteurización y embotellamiento de: leches, bebidas lácteas, quesos, mantequillas, yogures, helados, entre otros, están considerados dentro de la industria manufacturera, de acuerdo a la publicación de (Revista Líderes, 2017) para el periodo 2016 las ventas de lácteos cerraron en USD 782.4 millones (7% más que en 2015), esto como resultado de un consumo promedio anual de 110 litros por persona (El Telégrafo, 2014), con lo que claramente se constituye como un sector importante para la economía de nuestro país; en general, en países desarrollados este tipo de industria concentra en gran porcentaje la fuerza laboral y dinamiza otros sectores generando empleos directos e indirectos.

En la Figura 3. Distribución espacial empresas procesadoras de lácteos. Figura 3 se representa espacialmente la distribución de las empresas autorizadas dedicadas a la elaboración de productos lácteos, del cual se observa gráficamente que el diámetro de la circunferencia es proporcional al nivel de producción en cada una de las regiones, esto denota que existe mayor concentración en la región Sierra, específicamente en Pichincha como efecto de ser la provincia con mayores niveles de producción. En el caso de la región costa, se observa que las industrias se concentran en la provincia del Guayas, como consecuencia de ser una de las provincias con mayor nivel de consumo.

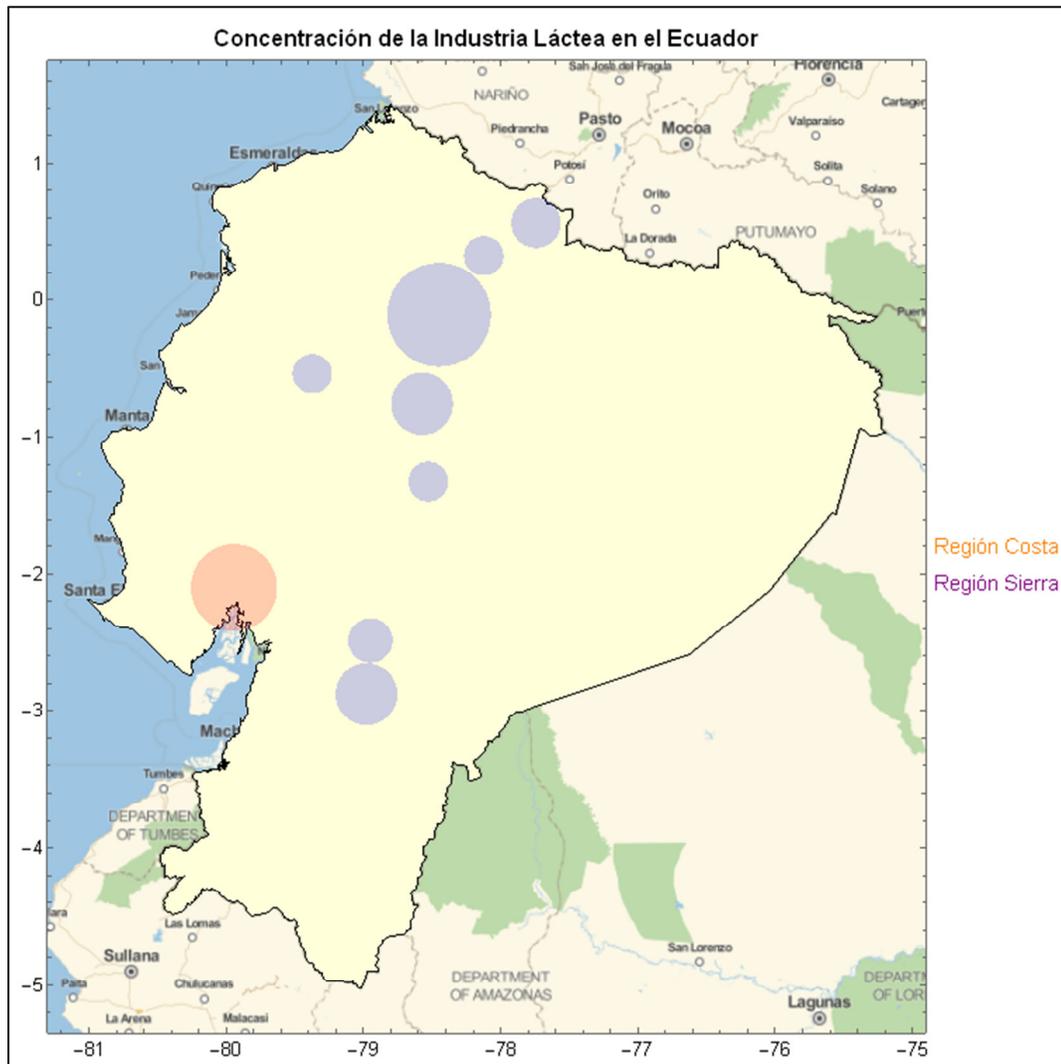


Figura 3. Distribución espacial empresas procesadoras de lácteos

En la Tabla 1 y Tabla 2, se detallan por regiones las industrias legalmente constituidas más representativas dedicadas a la elaboración de productos lácteos pasteurizados y con registro sanitario en el Ecuador.

PROVINCIA	EMPRESA	TIPO DE ALIMENTO
Azuay	Lácteos San Antonio C.A.	Leche y derivados
	Parmalat del Ecuador S.A.	Leche y derivados
Cañar	Lácteos San Antonio C.A.	Leche y derivados
Carchi	Alpina productos alimenticios Alpiecuador S.A.	Leche y derivados
	Floralp s.a.	Leche y derivados
Cotopaxi	Parmalat del Ecuador S.A.	Leche y derivados

	Pasteurizadora El Ranchito Cia. Ltda.	Leche y derivados
Imbabura	Floralp S.A.	Leche y derivados
Pichincha	Alimentos Ecuatorianos S.A. Alimec	Leche y derivados
	Alpina productos alimenticios Alpiecuador S.A.	Leche y derivados, gelatinas
	Ecuajugos S.A.	Leche y derivados
	Lechera Andina S.A.	Leche y derivados
	Pasteurizadora Quito	Leche y derivados
	Quala Ecuador S.A.	Leche y derivados
	Reybanpac Rey Banano del Pacifico	Leche y derivados
Tungurahua	Industrias Lácteas Chimborazo	Leche y derivados

Tabla 1. Empresas procesadoras en la región Sierra

PROVINCIA	EMPRESA	TIPO DE ALIMENTO
Guayas	Degeremcia S.A.	Leche y derivados, comidas listas empacadas
	Industrias Lácteas S.A. Indulac	Leche y derivados
	Industrias Lácteas Toni	Leche y derivados, bebidas no alcohólicas, gelatinas, refrescos en polvos, preparaciones para postres
	Prolachiv S.A.	Leche y derivados, bebidas no alcohólicas
	Unilever Andina Ecuador S.A.	Leche y derivados
Los Ríos	Reybanpac Rey Banano del Pacifico	Leche y derivados

Tabla 2. Empresas procesadoras en la región Costa

1.1.2 Proyección del negocio

Según perspectivas de la industria láctea (Tetra Pak, 2014), se espera que hasta el 2024 el consumo de lácteos en el mundo crezca en total un 36% y aunque para Ecuador el crecimiento se promedia entre 25% y 30% (El Telégrafo, 2014) esta cifra resulta ser bastante prometedora, por tal razón el sector busca consolidarse en nuevos mercados para vender el alimento. Al momento ya existe la experiencia de exportaciones realizadas a Venezuela por lo que de la misma forma se espera introducir los productos lácteos a países vecinos como Perú y Colombia, así como al mercado centroamericano y algunos países de Europa.

A propósito del crecimiento de la producción mundial y nacional, la oferta de productos lácteos en los últimos años está sufriendo un proceso de sustitución de leche por una variedad conocida como bebida láctea, la cual tiene un menor precio para el consumidor dado que contiene distintos (menores) elementos nutricionales, esto es: 60% leche y 40% lacto-suero.

En el mercado ecuatoriano se encuentran con facilidad todas las variedades de productos elaborados en base a leche y/o lacto-suero, tales como: leche entera, leche descremada, leche semidescremada, leche deslactosada, leche fortificada, leche saborizada, avena con leche, crema de leche, queso fresco, queso bajo en grasa, queso mozzarella, queso crema, manjar, mantequilla, yogurt, yogurt con frutas, yogurt dietético, bebida láctea, bebida láctea saborizada, bebida de yogurt, etc.

En la medida en que la producción nacional se incrementa, consecuentemente la demanda de servicios logísticos directos y complementarios, se incrementan. El desarrollo de las cadenas productivas, junto a un mayor grado de especialización de productos, requiere necesariamente de servicios logísticos en igual medida, en relación al nivel de inventarios adecuado para toda la cadena de abastecimiento así como la eficiencia en la transportación del mismo para el comercio interno y externo.

De acuerdo a las condiciones geográficas de nuestro país, la localización de las ciudades, los centros de producción y los mercados de consumo, es necesario reconocer el impacto que el transporte de carga tiene sobre la calidad y el servicio en términos logísticos. Esto implica que algunas empresas han desarrollado indicadores de gestión adecuados de acuerdo a su cadena de abastecimiento; sin embargo, existen ciertas empresas medianas y pequeñas a las que les resulta complicado modernizar sus procesos logísticos. Las acciones enfocadas a mejorar el desempeño de las empresas se orientan en apoyar y promover el desarrollo logístico de los diferentes sectores.

En tal virtud, para el estado ecuatoriano el desarrollo del sector de transporte y logística es considerado como prioritario en vista del impulso al cambio de la

matriz productiva y considerando que los servicios de transporte y logística tienen una afectación transversal sobre varios sectores económicos en nuestro país y son un componente básico para la competitividad sistémica según se muestra en la Figura 4.

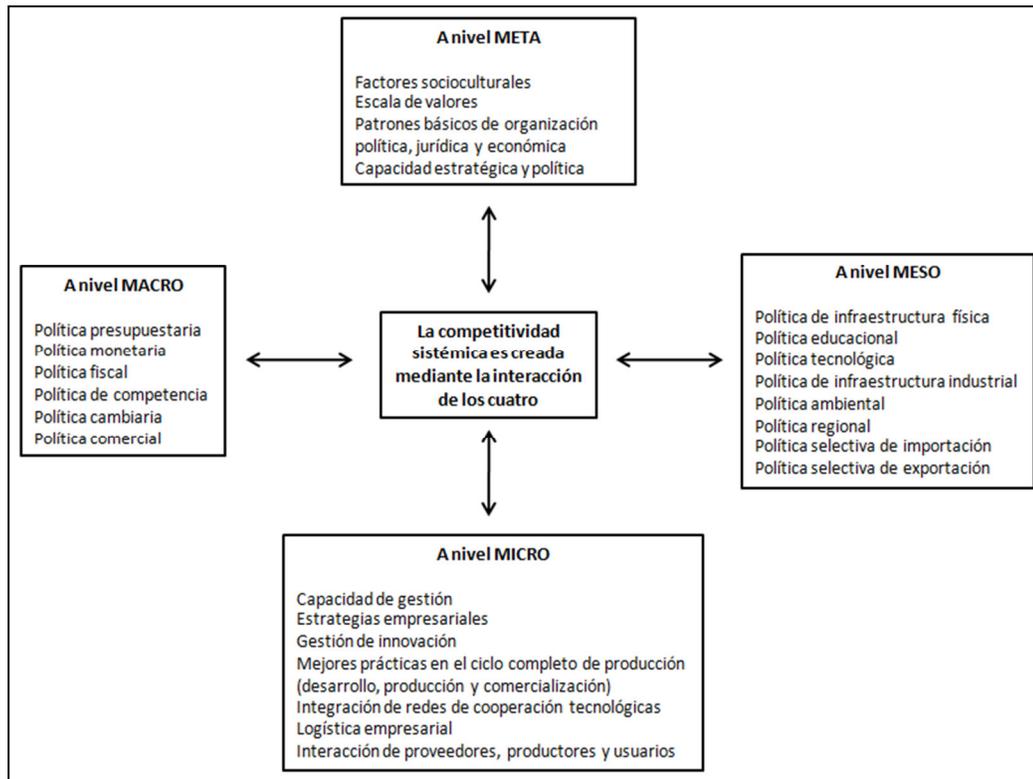


Figura 4. Competitividad Sistémica: Nuevo desafío para las empresas y la política (CEPAL, 1996)

Existen importantes oportunidades de inversión en el área de transporte y logística que se ejecutarán en los próximos 10 años, los mismos que impulsarán este sector de la economía. Entre estos están: la ampliación y concesión del Puerto de Aguas Profundas de Manta, construcción del Puerto de Aguas Profundas del Golfo de Guayaquil, concesión y operación de Aeropuerto Internacional de Manta, ZEDE Petroquímica y Logística de Manta, Puertos Fluviales en la cuenca Amazónica, Metro de Quito, construcción de red ferroviaria entre Guayaquil y Quito, Zonas Logísticas y Puerto Seco en Latacunga y Santo Domingo, construcción de Astillero del Pacífico, Zonas Logísticas de Frontera, etc. Finalmente, El PEM plantea una inversión anual del

4% del PIB para los siguientes 25 años (US\$ 118 miles de millones hasta el año 2037).

Según (Revista Lideres, 2016), la economía de nuestro país genera 423 millones de toneladas de carga, para una capacidad de transporte de 334 millones de toneladas; considerando 22 días laborables. Esto nos indica que el nivel de utilización corresponde a solo el 78% de la capacidad operativa, existiendo una oportunidad de crecimiento de alrededor del 20% para cubrir el total de la demanda existente.

La dinámica de las redes de transporte es uno de los pilares más relevantes en cuanto a los cambios generados por la evolución en términos de globalización y nuevas tecnologías disponibles. Dado esto, ya en los últimos años el transporte se ha convertido de a poco en el motor del movimiento de la economía y en un sector fundamental desde una perspectiva social y económica, ya que no solo permite potenciar el acceso a recursos, bienes, servicios e insumos, sino también es una actividad primordial para el desarrollo de las relaciones humanas.

Entre otras funciones el transporte fomenta la integración entre consumidores y productores, potencia la especialización productiva, moviliza mercaderías y personas, y articula territorios y naciones por lo que su planificación y buen desempeño es importante para mejorar la dinámica económica del país y alcanzar el crecimiento y desarrollo de las regiones.

Por lo descrito en los párrafos anteriores, se hace necesario abordar a continuación dos temas fundamentales que destacan la relevancia de este sector en la economía en su conjunto: PIB del sector de transporte y la tasa de ocupación del sector.

1.1.3 El sector de transporte y logística en el Producto Interno Bruto.

El transporte se ha constituido en un factor determinante en la competitividad de las empresas modernas por lo que su manejo se asocia directamente con el desarrollo de las demás actividades productivas.

De acuerdo a informes de (Ekos, 2015), en la Figura 5 se aprecia como en Ecuador a partir del año 2009 la aportación del sector transporte ha representado un componente importante en el PIB nacional, dado que se ha mantenido constante entre 6.5% - 6.6%, y como consecuencia a estos niveles ya desde el año 2013 se ha considerado como el quinto rubro en cuanto a contribución al PIB.

Es importante notar que el crecimiento del sector se ha dado por la ejecución de obras de infraestructura impulsadas por el Estado; como es el caso de la construcción de las nuevas hidroeléctricas, termoeléctricas y obras de compensación por las actividades de extracción.

Estas obras y otras han demandado la contratación de transportistas para la ejecución de las operaciones, por lo que es de notar que gran parte de los recursos del Estado se han asignado a programas y proyectos de inversión en infraestructura.

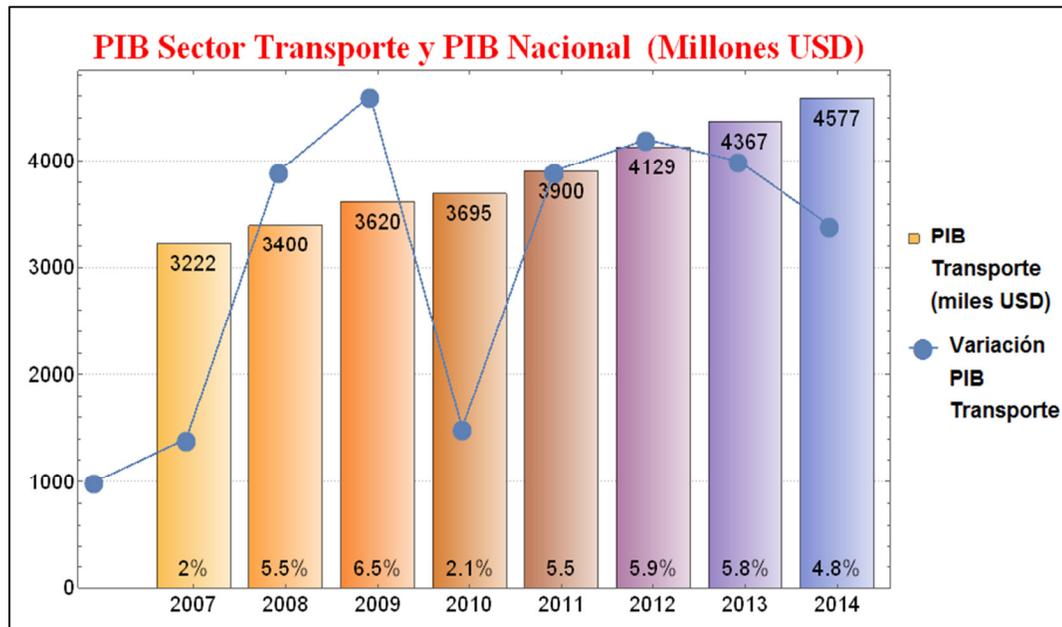


Figura 5. PIB del sector transporte y logística (Ekos, 2015)

No obstante, cifras del Banco Central del Ecuador denotan que el PIB del sector transporte sufrió un menor crecimiento para el periodo 2014, tal como se muestra en la figura anterior, esto principalmente ocasionado por ciertos factores exógenos como la disminución en los niveles de dinamismo e inversión de la economía en general.

1.1.4 Empleo del sector del transporte y logística

En relación al mercado laboral ecuatoriano, indica la revista (Ekos, 2015) que el sector del transporte evidencia una evolución notable en los últimos años considerando como tal el concepto de empleo adecuado, lo que demuestra un mejoramiento sostenido en el tiempo. Haciendo un comparativo con las cinco ramas de actividad con mayor ocupación, como se muestra en la Figura 6 para el año 2014 las actividades relacionadas al transporte poseen una proporción de 8.1% de ocupados plenos, ubicándose en el cuarto lugar más alto después del comercio, enseñanza, servicios sociales y salud, y manufactura. Esto refleja la mayor participación que tiene el sector en el empleo adecuado frente al inadecuado.

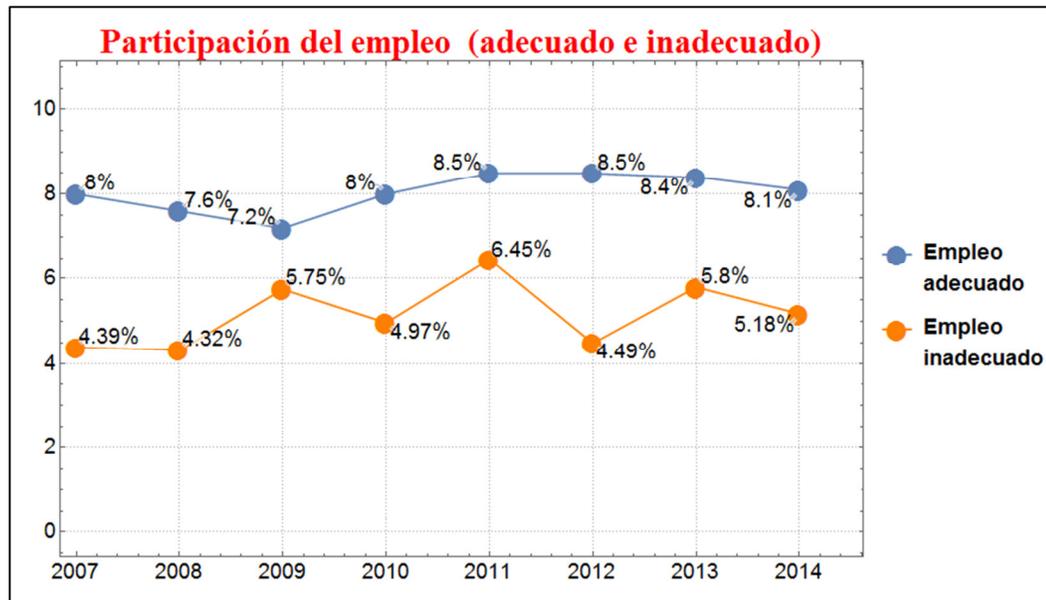


Figura 6. Empleo del sector transporte y logística (Ekos, 2015)

De acuerdo a (Ekos, 2015), en comparación con los últimos periodos se conoce que existe un crecimiento en el número de operadores logísticos específicamente las enfocadas en la transportación. Como dato referencial para el año 2013, el 73.3% de estas empresas facturaron entre 100 mil y 1 millón de dólares al año (pequeñas empresas), seguidos del 24.1% que facturaron entre uno y diez millones (medianas empresas) y finalmente, el 2.6% que facturaron más de 10 millones (grandes empresas).

En los últimos años las empresas han experimentado un cambio importante en la perspectiva de sus negocios, de tal manera en la actualidad mayormente no están dispuestas a mantener una flota propia para la distribución de sus productos debido a los altos costos de mantenimiento, razón que ha impulsado el crecimiento de los operadores logísticos. Se conoce también que la demanda de servicios de transporte se deriva del comercio y de manera general el costo del mismo es determinado por la oferta y demanda en la cual preferentemente se establece un valor estándar por destino (dentro y fuera de la ciudad); por consiguiente, al realizar un análisis calidad–costo se evidencia que la producción de servicios de transporte al igual que la producción de bienes en general, se ve afectada por los continuos avances tecnológicos

(rastreo satelital, apertura de puertas, temperatura y humedad de la carga, etc.) como resultado de las necesidades y exigencias del mercado.

Para los operadores logísticos, la utilización de nuevas y mejores tecnologías de información y comunicación así como disponer de una infraestructura que garantice la calidad a sus clientes son un factor importante al momento de establecer el costo por flete, el mismo que las empresas deben contratar necesariamente de tal forma que se garantice su operación diaria.

Finalmente; en los tiempos actuales, tanto las redes de distribución como los flujos de inventario se deben diseñar, planificar, organizar y gestionar, de tal forma que se alcancen los objetivos económicos esperados por las empresas; adicionalmente, estos sistemas logísticos deben también respetar las regulaciones legales en términos de tránsito y seguridad vial, leyes laborales, régimen tributario, manipulación de la carga, medio ambiente, entre otras; aspectos que son necesarios a considerar dado que las organizaciones interactúan dentro una sociedad formada por diversos sectores.

1.2 Planteamiento del Problema

El entorno en el que se desempeñan las empresas procesadoras de lácteos está determinado por la gran variedad de productos y presentaciones disponibles en el mercado, así como el cuidado en la calidad de los mismos. A decir de este tema el propósito de la empresa es atender los pedidos minimizando los costos asociados a la operación y a la vez satisfacer el nivel de servicio (> 90%) acordado previamente con los clientes.

Para las empresas del sector, la distribución de sus productos ha dejado de ser un tema trivial y por el contrario se ha tornado en un problema complejo analizado en varias direcciones; en primera instancia las organizaciones procuran realizar una adecuada gestión del transporte maximizando la utilización de la flota (propia o contratada) para disminuir sus costos, al mismo tiempo que crean mecanismos que les permitan maximizar el servicio a sus clientes. Esta política como es de esperarse puede resultar en un incremento

en los costos logísticos y por consiguiente una afectación directa en los costos de producción; sin embargo, el establecimiento de rutas cuidando la calidad en el servicio requiere de un análisis exhaustivo en vista de su complejidad y constante evolución, por lo que se orienta a la aplicación de técnicas que puedan ofrecer soluciones óptimas – sin que esto signifique encontrar la mejor solución – que cumplan en alguna medida con el nivel de satisfacción esperado, lo que en resumen implica mantener un equilibrio entre los costos de distribución y el nivel de servicio.

La planificación de cada ruta implica para las empresas la asignación de recursos, tales como mano de obra directa para el alistamiento de cada pedido, trámites administrativos internos y con los entes reguladores, costo de fletes asignados o contratados, entre otros; esto se traduce en dinero que las organizaciones dejan de recibir si la gestión no es la adecuada, o podría convertirse en el peor de los casos en la porción de mercado que las empresas competidoras están dispuestas a aprovechar.

Para la presente investigación se conoce que la demanda de las ventas es de tipo determinística, considerando el PVO en base a la estacionalidad del mercado; así mismo se considera la existencia de variabilidad en los días de entrega a los diferentes clientes lo que obliga a mantener una planificación diaria de rutas que depende de las siguientes variables: volumen de cada pedido, hora de entrega pactada, capacidad de carga del vehículo; de igual manera, cada ruta tiene un costo fijo asignado según la zona que debe visitar el transportista, por lo que es imprescindible para el empresa operar en función de un mayor factor de aprovechamiento (%) de la flota.

Un factor importante a considerar es que no todos los medios de transporte son adecuados para la distribución (transporte secundario) de productos lácteos, las características del mismo limita las opciones en cuanto a disponer de vehículos para realizar una cobertura eficiente – estas variables representan restricciones del modelo –, sin embargo la empresa objeto de nuestro estudio mantiene contratos vigentes con varias empresas debidamente certificadas

como operadores logísticos, quienes ponen a disposición una flota heterogénea para el servicio de distribución en todas las regiones del país.

A continuación en la Tabla 3 se detallan las variables enfocadas en el producto, donde se denota que el tipo de empaque y el contenido determinan su forma de conservación, de tal forma se garantice al máximo la calidad del mismo y se minimicen las devoluciones de los clientes, sobre el cual la empresa debe asumir el costo de la venta perdida.

Variables	Característica	Clasificación del producto			
		Leche y Bebida láctea	Queso	Yogurt	Leche saborizada
Empaque y lugar de almacenamiento	Funda plástica	N/A	Bodega de frío	N/A	N/A
	Funda de polietileno de baja densidad, con capa negra que protege de la luz al producto	Bodega de seco	N/A	Bodega de frío	Bodega de frío
	Botella de polietileno	N/A	N/A	Bodega de frío	N/A
	Tetra brik, tetra classic y tetra fino	Bodega de seco	N/A	N/A	Bodega de seco
Conservación en bodega	Funda plástica	N/A	[2°- 8°C]	N/A	N/A
	Funda de polietileno de baja densidad, con capa negra que protege de la luz al producto	Ambiente fresco, seco y protegido de la luz del sol	N/A	[2°- 8°C]	[2°- 8°C]
	Botella de polietileno	N/A	N/A	[2°- 8°C]	N/A
	Tetra brik, tetra classic y tetra fino	Ambiente fresco, seco y protegido de la luz del sol	N/A	N/A	Ambiente fresco, seco y protegido de la luz del sol

Tabla 3. Variables de estudio: Tipo de empaque y producto

A continuación en la Tabla 4 se detallan las variables relevantes relacionadas con la distribución de los pedidos y las características de la transportación, en donde básicamente se espera que el operador logístico garantice que el producto mantenga los niveles de calidad esperados por el cliente en cuanto a la temperatura del producto y condición del empaque.

Variables	Característica	Clasificación del producto			
		Leche y Bebida láctea	Queso	Yogurt	Leche saborizada

Medio de transporte	Furgón para transporte de alimentos	Isotérmico	Refrigerado	Refrigerado	Refrigerado
	Capacidad de carga	Variable entre 3.5 - 12 Ton.			
Transportación	Distancia	Entre 5 – 300 Km.			
	Cuidado del producto	Movimientos bruscos deben reducirse al mínimo			
Entrega	Clientes Mayoristas	Temp. ambiente	Temp. igual o menor a 8° C.	Temp. igual o menor a 8° C.	Temp. igual o menor a 8° C. (funda de polietileno)
	Autoservicios	Temp. ambiente	Temp. igual o menor a 3° C.	Temp. igual o menor a 3° C.	Temp. ambiente (tetra classic)

Tabla 4. Variables de estudio: Medio de transporte y entrega

En relación a los costos de fletes, en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 se detallan los valores referenciales según la capacidad del vehículo, desde los Centros de Distribución de la Compañía hacia los principales destinos. Estos valores se pactan previamente dentro de un contrato de concesión, existiendo ciertas variaciones (costo extra) sobre rutas de mayor recorrido, a la vez que en todo momento se sujetan a las disposiciones de los entes reguladores.

Origen	Capacidad	Destinos				
		Daule	Babahoyo	Machala	Península	Samborondón
CD1	4 Ton.	110.00	120.00	180.00	120.00	100.00
CD1	6 Ton.	140.00	160.00	210.00	170.00	120.00
CD1	8 Ton.	170.00	190.00	230.00	190.00	160.00
CD1	10 Ton.	190.00	210.00	245.00	210.00	180.00
CD1	12 Ton.	205.00	225.00	260.00	235.00	205.00

Tabla 5. Costos de fletes CD1 – Provincia del Guayas (USD.)

Origen	Capacidad	Destinos				
		Quito	Ibarra	Sto. Domingo	Cuenca	Lago Agrio
CD2	4 Ton.	70.00	190.00	140.00	260.00	270.00
CD2	6 Ton.	78.00	220.00	160.00	385.00	290.00
CD2	8 Ton.	85.00	225.00	180.00	395.00	320.00
CD2	10 Ton.	145.00	260.00	200.00	450.00	380.00
CD2	12 Ton.	150.00	265.00	220.00	460.00	400.00

Tabla 6. Costos de fletes CD2 – Provincia de Pichincha (USD.)

Origen	Capacidad	Destinos				
		Esmeraldas	Quevedo	Vinces	El Carmen	Manta
CD3	4 Ton.	126.00	81.00	126.00	88.00	160.00
CD3	6 Ton.	158.00	124.00	175.00	135.00	270.00
CD3	8 Ton.	230.00	130.00	190.00	145.00	290.00
CD3	10 Ton.	290.00	135.00	210.00	155.00	310.00
CD3	12 Ton.	330.00	145.00	210.00	150.00	340.00

Tabla 7. Costos de fletes CD3 – Provincia de Los Ríos (USD.)

Por lo anteriormente descrito, la asignación de rutas para la distribución es un área importante dentro del desempeño de toda la cadena, en relación a sus altos costos operativos constituye un margen de ganancia mayor o menor según sea la gestión realizada por el Departamento y Jefatura responsables.

Para el presente caso, una estrategia basada en criterios de modelos de ruteo de vehículos VRP podría ser una alternativa funcional, en búsqueda de un ahorro importante en el costo de distribución a la vez que se maximice el nivel de servicio, en tanto se consideren las características reales del sistema y se empleen las herramientas informáticas adecuadas que permitan lograr los resultados esperados.

Finalmente, es necesario resaltar que el presente proyecto pretende hacer un aporte significativo a la organización, en cuanto al diseño de rutas aplicando programación matemática para la distribución óptima de lácteos de la empresa.

1.3 Objetivo General

El objetivo de la presente investigación es diseñar un modelo para la optimización de rutas en función del costo mínimo para la distribución de lácteos, considerando el nivel de servicio propuesto para satisfacción de sus clientes; fundamentalmente basado en modelos matemáticos, que permita atender a todas las condiciones y restricciones que presenta el negocio: capacidad limitada de los vehículos, flota heterogénea, múltiples depósitos, ventanas de tiempo, crecimiento del nivel de ventas, nivel de servicio, incremento del número de clientes y aumento de la cobertura a nivel nacional, el modelo desarrollado podrá servir como herramienta para una mejor toma de decisiones considerando el cumplimiento de las metas económicas y de calidad que persigue la organización.

1.4 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que persigue la presente investigación son:

- Hacer un diagnóstico de las principales variables que influyen en la distribución de productos lácteos (ruteo).
- Conocer el tipo de demanda de los productos e identificar las variables que afectan el desempeño de la cadena de abastecimiento.
- Determinar una matriz de costos del transporte de los productos de la empresa en función de las características de la flota de transporte.
- Diseñar un modelo de optimización matemática identificando la función objetivo y restricciones.
- Implementar el modelo de optimización en un programa informático que permita el diseño de escenarios.
- Validar el modelo de optimización propuesto y presentar sus resultados.

1.5 Estructura de la Investigación

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en las siguientes fases:

Fase 1: Estudio del proceso de distribución

En esta fase se procede a recopilar información histórica correspondiente al período 2017, relacionada con el proceso de distribución en las tres zonas (CD1 – Guayas, CD2 – Pichincha, CD3 – Los Ríos) de acuerdo a su rango de cobertura; el mismo que sirve para ilustrar la forma en que se asignan las rutas, encontrando en muchos casos patrones repetitivos como resultado de las decisiones estratégicas del área responsable.

Fase 2: Desarrollo del modelo de optimización e implementación del algoritmo

Posterior a la recolección de información se procede a tabular los datos, los mismos que sirven como punto de partida para el desarrollo del modelo de optimización que maximice la función objetivo tomando en consideración todas las restricciones. De la misma forma, implementar el algoritmo adecuado para la resolución del modelo matemático permitirá encontrar soluciones factibles para una distribución eficiente en la medida en que tanto la data como el modelo sean una representación apropiada del mundo real.

Fase 3: Análisis de resultados

En esta última fase y posterior a la obtención de resultados se procede a realizar un estudio comparativo considerando los distintos escenarios existentes; a priori se conoce que la asignación de rutas dentro de la organización no responde a criterios de optimalidad por lo que es necesario llevar a cabo un diagnóstico cuantitativo del desempeño logístico de tal manera se pueda cumplir plenamente con los objetivos de la investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El transporte es una actividad tan importante dentro de la cadena de abastecimiento que a menudo representa el mayor costo variable y por tanto controlable dentro del ámbito de la logística, así mismo se asemeja al pegamento que permite que el modelo funcione de acuerdo a la gestión realizada; los resultados esperados van en función de entregar el producto correcto, en el momento correcto, en la calidad y cantidad pactada, al costo y en el destino correcto. Otro concepto importante del transporte se enfoca en las estrategias que las empresas utilizan para ser competitivos económicamente y sostenibles en el tiempo, esto es, inventario justo a tiempo, logística y producción ajustada, y entregas programadas, entre otros.

Muchas decisiones en el ámbito estratégico de la logística pueden ser complementadas con modelos matemáticos, por lo que para el presente estudio abordaremos inicialmente el concepto general de un clásico Problema de Ruteo de Vehículos conocido ampliamente por ser un NP–Hard en el ámbito de la optimización combinatoria. La solución de este problema busca minimizar la distancia total recorrida satisfaciendo la demanda de los clientes, sujeto a la capacidad limitada de los vehículos, así como respetando los tiempos de entrega.

Para satisfacer las necesidades de las empresas, se necesita de soluciones adecuadas que permitan aprovechar los recursos disponibles, es así que surgen métodos que los investigadores han desarrollado para mejorar la eficacia y eficiencia operativa, cuyo propósito inicial es construir modelos matemáticos que sean una correcta representación de la realidad de las organizaciones y que les permita tomar una decisión acertada, a pesar de que no se trata únicamente de aplicar modelos de alta complejidad, sino que adicionalmente se requiere de una correcta interpretación de los resultados que arrojen dichos modelos para lograr una distribución física eficiente.

De acuerdo a (Yepes, 2002), todas las actividades que se enmarcan dentro de la planificación operativa de la distribución física conllevan a una gran cantidad de posibles decisiones interrelacionadas entre sí. Adicionalmente, se conoce que el número de alternativas posibles crece de forma exponencial según la dimensión del problema, incluso para una flota pequeña y con un moderado número de destinos, la planificación de las rutas termina siendo una tarea altamente compleja. De tal manera que, no es ajeno a la realidad que los responsables de la gestión del transporte faciliten la solución a estos problemas utilizando procedimientos particulares basados en experiencias y errores previos. Por tal razón, se evidencia que existe un amplio potencial de mejora en términos de rentabilidad para los diferentes negocios que utilizan una flota para distribución de sus productos.

En síntesis, planificar y gestionar las redes de distribución genera una importante variedad de problemas de decisión; el éxito de las mismas tiene relación directa y depende primordialmente de la optimización de operaciones, donde el espectro de posibles soluciones es grande y creciente exponencialmente según el número de destinos, tamaño de la flota y demás restricciones. Es de notar que, por la complejidad de las situaciones reales termina siendo inviable encontrar un método de solución exacta, de modo que se debe recurrir a métodos aproximados que al menos proporcionen un conjunto de soluciones de calidad para problemas cotidianos, los cuales por lo general se resumen en llevar a cabo el plan propuesto de una forma óptima: máximos beneficios o mínimos costos.

2.1 El Problema del Ruteo de Vehículos (VRP)

Como se ha dicho anteriormente, la asignación de rutas es uno de los problemas de optimización combinatoria más importantes y estudiados en el ámbito de las operaciones logísticas, cuyo objetivo principal es reducir los costos relacionados con esta actividad; así, estos ahorros potenciales justifican la aplicación de técnicas de Investigación de Operaciones para simplificar la planificación de rutas, del cual se estima que este componente representa generalmente entre el 5% – 20% del costo total del transporte y entre el 10% –

20% del costo final de los bienes. Dado esto, se sabe que el campo de *Ruteo de Vehículos* ha crecido de manera explosiva; por un lado, hacia *modelos* que incorporen cada vez más características del mundo real, y, por otro lado, en la búsqueda de *algoritmos* que permitan resolver problemas de manera eficiente (Toth & Vigo, 2001) (Olivera, 2004).

En forma general, el VRP se describe como: dado un conjunto finito de nodos (clientes y depósitos) geográficamente dispersos, y una flota de vehículos con capacidad ilimitada; buscando calcular un conjunto óptimo de rutas de costo mínimo que empiecen y terminen en el depósito origen, de tal manera que los vehículos visiten a cada uno de los clientes. Las características de los clientes, depósitos y vehículos, así como las diferentes restricciones de tipo operativas sobre las rutas, que se tienen en el sistema real, dan lugar a las diferentes variantes del problema.

2.1.1 Los Clientes

Cada cliente tiene cierta demanda (bien o servicio) que debe ser satisfecha en su totalidad por algún vehículo; en muchas ocasiones, esta demanda ocupa un espacio en el vehículo y es común que más de un vehículo sea necesario para satisfacer la demanda de todos los clientes y en varias rutas. Es usual que los clientes sean visitados exactamente una sola vez; sin embargo, en ciertas variantes del problema se admite que la demanda de los clientes sea satisfecha en tiempos distintos y por vehículos diferentes.

Los clientes también pueden tener restricciones referentes al horario de entrega, esto generalmente se expresa en intervalos de tiempo (llamados *ventanas de tiempo*), que determinan los lapsos de tiempo en los cuales el vehículo debe arribar para atender al cliente asignado.

Otro tipo de restricciones tienen relación con la capacidad de los vehículos disponibles, en este caso se debe cuidar su compatibilidad con cada cliente, es decir, ciertos vehículos de gran peso no podrían ingresar a ciertas localidades.

2.1.2 Los Depósitos

Tanto los vehículos como la mercadería a distribuir (de existir) deben posicionarse en los depósitos como punto de partida. Frecuentemente se requiere que cada ruta inicie y termine en un mismo depósito, aunque podría ocurrir que el viaje finalice en el domicilio del conductor. Para problemas con múltiples depósitos cada uno tiene diferentes características; tales como la ubicación geográfica, la capacidad máxima de producción, incluso podría ocurrir que cada depósito posea su propia flota asignada a *priori* o que dicha asignación forme parte de aquello que se busca definir.

De igual manera que los clientes, cada depósito podría manejar sus propios horarios de atención (ventanas de tiempo) asociados a su operación, esto implica muchas veces que se debe considerar el tiempo necesario para cargar cada vehículo previo al inicio de su ruta.

2.1.3 Los Vehículos

En relación a los vehículos, la importancia radica en conocer su real dimensionamiento, esto podría ser, peso y/o volumen disponibles para transportar la mercadería. Se conoce que cada vehículo tiene un costo fijo asociado en el que se debe incurrir, así como un costo variable que debe ser proporcional a la distancia total recorrida.

Existen dos clasificaciones en cuanto a la disposición de vehículos, el mismo que depende de sus atributos (capacidad de carga, costo de flete, etc.). Bajo esta consideración, cuando se tienen los mismos atributos se denomina *flota homogénea* y cuando se tienen atributos diferentes se denomina *flota heterogénea*. El objetivo más común se enfoca en utilizar la menor cantidad de vehículos y en segundo lugar se busca minimizar la distancia recorrida por los vehículos.

Retomando el análisis general del VRP, se denota que el ruteo de vehículos tiene varios planteamientos basados en el TSP: el cual por definición consiste en visitar una y solo una vez a un conjunto de clientes, partiendo y retornando a un mismo punto conocido como nodo origen y siguiendo una ruta de menor

costo, donde no se plantea una demanda asociada a los clientes y tampoco existen restricciones de tiempo. Visto de esta manera, se denota que el VRP guarda una estrecha analogía con el TSP, donde la única diferencia radica en que para el TSP la cantidad de rutas está fijada previamente.

Según lo describe (Laporte, 1992), se define formalmente el VRP en su forma general de la siguiente manera: Sea $G = (V, A)$ un grafo donde $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ es un conjunto de vértices que representan ciudades – para efecto de esta investigación serían clientes – con el depósito/almacén situado en el vértice 1, y A es un conjunto de arcos. Con cada arco (i, j) $i \neq j$ se asocia una matriz de distancias no negativas $C = (c_{ij})$. Se puede interpretar c_{ij} como el costo de viaje o tiempo de viaje. Cuando C es simétrico, a menudo es conveniente reemplazar A por un conjunto E de bordes no dirigidos. Además, se supone que hay m vehículos en el depósito, donde $m_L \leq m \leq m_U$.

Cuando $m_L = m_U$ se dice que m es fijo. Cuando $m_L = 1$ y $m_U = n - 1$, se dice que m es libre. Cuando m no es fijo, a menudo tiene sentido asociar un costo fijo f al uso del vehículo. Generalmente, se ignoran estos costos, se asume que todos los vehículos son idénticos y tienen la misma capacidad D .

El VRP consiste en diseñar un conjunto de rutas de menor costo tal que:

- (i) Cada ciudad en $V \setminus \{1\}$ es visitada exactamente una vez por exactamente un vehículo;
- (ii) Todas las rutas de los vehículos comienzan y terminan en el depósito.
- (iii) Algunas restricciones adyacentes se satisfacen.

Las condiciones adyacentes más comunes incluyen:

- (i) Restricciones de capacidad: un peso no negativo (o demanda) d_i se adjunta cada ciudad $i > 1$ y la suma de pesos de cualquier ruta del vehículo no puede exceder la capacidad del vehículo. El VRP con capacidad limitada se denominarán CVRP;

- (ii) El número de ciudades: en cualquier ruta está limitado por q (este es un caso especial de (i). con $d_i = 1$ para todo $i > 1$ y $D = q$);
- (iii) Restricciones de tiempo total: la longitud de cualquier ruta no puede exceder un límite prescrito L ; Esta longitud se compone de tiempos de viaje interurbanos c_{ij} y de tiempos de parada δ_i en cada ciudad i de la ruta. El VRP con restricciones de tiempo – o distancia – se denominarán DVRP;
- (iv) Ventanas de tiempo: la ciudad i debe ser visitada dentro del intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ y la espera es permitida en la ciudad i ;
- (v) Relaciones de precedencia entre pares de ciudades: ciudad i puede tener que ser visitado antes de la ciudad j .

2.2 Modelos y métodos de solución

La investigación enfocada en VRP se aceleró fundamentalmente por el desarrollo y mejora de la tecnología; facilidad de acceso a microprocesadores cada vez con mayor poder de cómputo permitió que los investigadores desarrollen y posteriormente implementen algoritmos de búsqueda más complejos. A la par se introdujo el concepto de *metaheurística* para nombrar al conjunto de algoritmos de búsqueda que permiten resolver problemas de ruteo de vehículos y demás en el ámbito de la optimización combinatoria, tales como: (1) Método GRASP, (2) Búsqueda Tabú, (3) Recocido Simulado, (4) Métodos Evolutivos, (5) Métodos de Evolución Diferencial, (6) Redes Neuronales, entre otros.

Como se indicó anteriormente, debido al mejorado desempeño logrado en varios ámbitos de la ciencia, el número de publicaciones al respecto se ha incrementado de manera significativa particularmente en la década de 1990. Según lo citan los autores (Eksioglu, Volkan, & Reisman, 2009), la literatura enfocada específicamente en VRP mantiene un crecimiento exponencial con una tasa anual de 6.09%, teniendo con mayor frecuencia dentro de este campo a los autores: Gilbert Laporte (66 veces), Michel Gendreau (42 veces), Jean-

Yves Potvin (41 veces), Bruce L. Golden (34 veces), Marius M. Solomon (22 veces), y Christos D. Tarantilis (19 veces).

En búsqueda para representar el contexto real de los diferentes problemas de transporte por medio de modelos matemáticos, los investigadores han propuesto múltiples variantes del VRP clásico que se fundamentan en variables y restricciones adicionales, los cuales se citan a continuación y se representan en la Figura 7 (Restrepo, Medina, & Cruz, 2008) (Soto, Soto, & Pinzón, 2008):

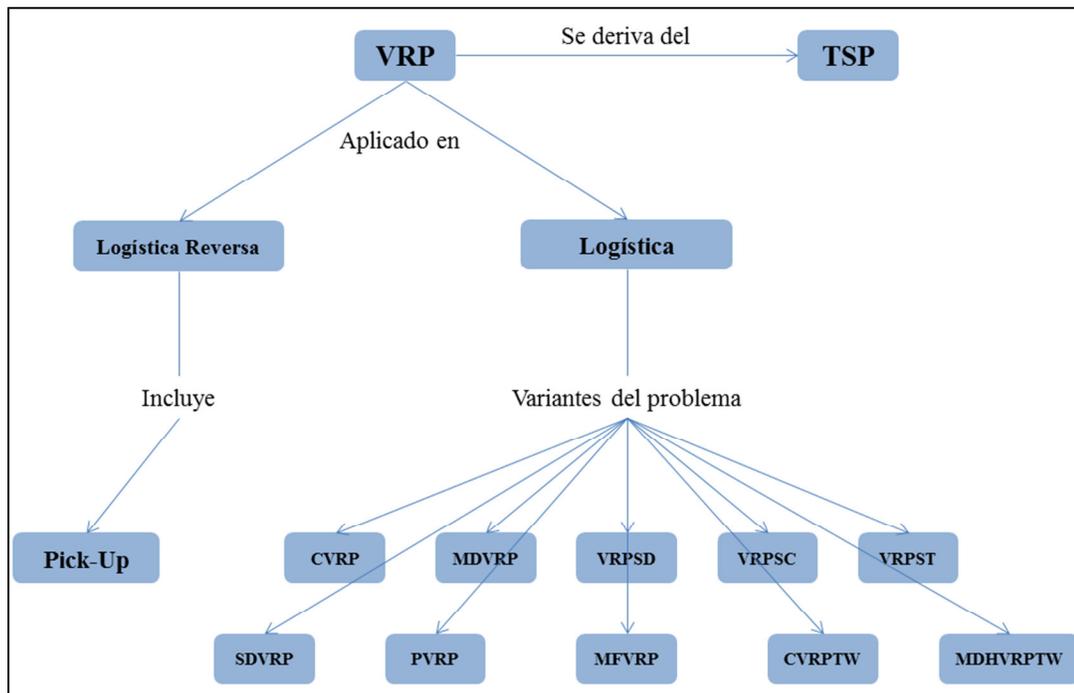


Figura 7. Variantes del VRP (Restrepo, Medina, & Cruz, 2008) (Soto, Soto, & Pinzón, 2008) (Xu, Wang, & Yang, 2012)

- **CVRP** (*Capacited Vehicle Routing Problem*), variante del VRP clásico en donde la flota de vehículos tiene capacidad limitada y homogénea, en donde las rutas empiezan y terminan en un único punto conocido como nodo origen.
- **MDVRP** (*Multi – Depot Vehicle Routing Problem*), variante del problema original donde existen múltiples depósitos de los cuales deben partir los vehículos.

- **VRPSD** (*Vehicle Routing Problem Stochastic Demand*), variante que contempla la demanda de los clientes a través de una distribución de probabilidad.
- **VRPSC** (*Vehicle Routing Problem Stochastic Customer*), variante que determina el número de clientes como una variable aleatoria del cual se conoce su probabilidad de ocurrencia.
- **VRPST** (*Vehicle Routing Problem Stochastic Time*), variante en donde los tiempos de viaje y de servicio son variables de tipo probabilísticas.
- **SDVRP** (*Split Delivery Vehicle Routing Problem*), variante del problema en donde un mismo cliente puede ser atendido por más de un vehículo, aplica para demandas superiores a la capacidad del vehículo.
- **PVRP** (*Period Vehicle Routing Problem*), variante en donde el horizonte de planeación corresponde a varios días bajo la premisa de una sola visita por cada cliente.
- **MFVRP** (*Mix Fleet vehicle Routing Problem*), variante del problema que considera una flota de vehículos de distintas capacidades con un solo depósito.
- **CVRPTW** (*Capacited VRP with Time Windows*), una de las variantes más importantes del VRP. Consiste en una flota de vehículos con capacidad homogénea el cual realiza el servicio dentro de las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente, en el cual el vehículo permanece con el cliente mientras realiza el servicio.
- **MDHVRPTW** (*Multi – Depot Heterogeneous VRP with Time Windows*), el problema de enrutamiento de vehículos heterogéneos con varios depósitos y con ventanas de tiempo es una de las variantes del VRP que más se asemeja al mundo real de las empresas; en donde los vehículos no necesariamente tienen la misma capacidad de carga, sin embargo, se debe atender a un conjunto de clientes cuyas demandas son

previamente conocidas, a la vez que los vehículos pertenecen a diferentes centros de distribución o depósitos, y el servicio se realiza dentro de las ventanas de tiempo asociadas a cada cliente. Como lo indican los autores (Xu, Wang, & Yang, 2012), esto resulta ser un problema complejo que aún no se resuelve de manera concluyente, por lo cual se ha propuesto varios algoritmos, entre ellos un algoritmo de búsqueda en vecindades variables modificado.

Se evidencia claramente que existen varios entornos sobre los cuales las investigaciones relacionadas con VRP han sido significativas, estos tienen relación con actividades cotidianas y de gran relevancia como: mensajería, recolección de basura, transporte de valores, transporte por contenedores, transporte de pasajeros, transporte de combustibles, transporte de alimentos, entre otros.

Se han desarrollado diferentes métodos basados en algoritmos de optimización en búsqueda de una solución al problema del VRP; estos están categorizados en dos grandes grupos: métodos exactos y métodos aproximados. Los métodos exactos son adecuados para problemas pequeños o relativamente fáciles de resolver, por ejemplo, los problemas de *programación lineal*. Así mismo, los métodos aproximados son apropiados para problemas complejos o de gran tamaño, por ejemplo, problemas reales en el ámbito del transporte, la producción, etc.

En su real dimensión se conoce que, los métodos aproximados no garantizan una solución óptima del problema, pero si al menos permiten encontrar *buenas soluciones*, cercanas a la solución óptima. Estos métodos aproximados se clasifican en heurísticos y metaheurísticos (Yepes, 2002):

Heurísticos.- Son procedimientos simples, que permiten encontrar con rapidez y facilidad estas soluciones – cercana al óptimo – a través de la exploración limitada del espacio solución. Estos métodos dependen generalmente del problema concreto para el cual fueron diseñados, por lo que muchos de ellos

resuelven problemas específicos y sin la posibilidad de generalización a otros problemas similares.

A continuación, se detallan los métodos heurísticos más conocidos:

- **Métodos constructivos:** Se basan en incorporar un nuevo elemento a la solución en cada iteración, hasta obtener una opción viable. Algunos de los más utilizados son los algoritmos glotones (o “greedy” por su terminología en inglés), que construyen una solución paso a paso buscando obtener el máximo beneficio en cada etapa, son fáciles de implementar pero sus soluciones son de baja calidad.
- **Métodos de descomposición:** Estos métodos consisten en fragmentar el problema en sub-problemas de manera que al resolverlos todos se obtenga finalmente una solución para el problema global.
- **Métodos de reducción:** Estos métodos simplifican el problema tratando de distinguir ciertas características o propiedades que se presume cumplen las buenas soluciones e introducirlas como restricciones del problema, de modo que, se pretende restringir el espacio de soluciones, encogiendo el espacio de búsqueda y simplificando el problema. El riesgo de estos métodos implica dejar fuera aquellas buenas soluciones, inclusive la solución óptima del problema original.
- **Métodos de manipulación:** Consisten en simplificar el esquema teórico del problema para encontrar con facilidad los valores de las variables de decisión, posteriormente deduciendo la solución del problema original.
- **Métodos de búsqueda local:** Estos métodos de mejora iterativa se basan en la exploración del entorno “neighborhood – vecindario” de una solución encontrada. Un procedimiento de búsqueda local queda determinado al especificar un movimiento y el criterio de selección de una solución dentro del entorno, así mismo, se pueden definir varias estrategias para seleccionar nuevas soluciones. El algoritmo finaliza cuando la solución ya no pueda mejorarse, constituyéndose ésta en un

óptimo local del problema. Sin embargo, es lógico esperar que la solución encontrada no sea el óptimo global dada la “miopía” del procedimiento. Otro condicionante de estos métodos constituye la dependencia de una solución inicial.

Metaheurísticas.- Son métodos concebidos con el propósito de obtener mejores resultados que aquellos alcanzados por los métodos heurísticos tradicionales y es por eso que conceptualmente se sitúan “por encima” de éstos. Existen varios métodos que se enmarcan dentro del concepto de metaheurísticas y actualmente son el centro de investigación más contemporáneo entorno al VRPTW, estos métodos buscan explorar una mayor superficie del espacio de soluciones con el fin de aproximarse cada vez más a la solución óptima del problema (Yepes, 2002). A continuación, se detallan los metaheurísticos más conocidos:

- **Método GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*):**

Estos métodos fueron desarrollados al final de la década de 1980, en primera instancia con el propósito de resolver problemas de recubrimiento de conjuntos (Set Covering Problem), sin embargo, nuevas investigaciones en la década de 1990 impulsaron este método como una técnica de propósito general. Autores como (Kontoravdis & Bard, 1995) emplearon GRASP como un proceso de búsqueda aleatorio y adaptativo de dos fases para resolver el problema del VRPTW: (1) En la fase de construcción se comienza con un número inicial de r itinerarios, agregando en cada paso un cliente a alguna de las rutas que cumplan con las reglas de tipo adaptativas. La función empleada se basa en la métrica (Solomon, 1987) para evaluar el costo de insertar un nodo no asignado a rutas parcialmente construidas, pero modificándolas para incluir primero a los clientes con mayor demanda, considerando que si en algún paso se encuentra un cliente con demanda insatisfecha que no pueda ser insertado, se debe crear una ruta nueva. (2) En la fase de mejora se realiza un proceso de búsqueda local que procura reducir el número de rutas, analizando la posibilidad de que los clientes

asignados a las rutas en la fase de construcción puedan ser reasignados a otras rutas, este procedimiento se repite hasta que no se pueda encontrar una mejor solución. En un apartado posterior, el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se realizará un estudio en profundidad de este método que nos permitirá encontrar una solución óptima al problema de distribución planteado en la presente investigación.

- **Búsqueda Tabú (*Tabu Search, TS*):** Este método tiene sus orígenes a finales de la década de 1970 (Glover, 1977), sin embargo, posteriormente el mismo autor a finales de la década de 1980 oficializó el TS como una metodología (Glover, Tabu Search - Part I, 1989); en general, la Búsqueda Tabú es un método que puede utilizarse para resolver problemas combinatorios utilizando un procedimiento de búsqueda local o por vecindades para moverse de manera iterativa desde una solución x hacia una solución x^* en la vecindad de x , hasta satisfacer algún criterio de parada. La estrategia del método se basa en una memoria que guía hacia zonas del espacio de soluciones que aún no han sido exploradas. TS toma de los principios generales de la Inteligencia Artificial (IA) el concepto de memoria cuyo objetivo es direccionar la exploración guardando los resultados de la historia más reciente, es decir, el método busca extraer información de los eventos anteriores y actuar en consecuencia a estos. Este comportamiento tiene similitud al proceso de aprendizaje, a la vez que la búsqueda se hace de forma inteligente; en resumen, de cierta forma el principio fundamental del método consiste en suponer que una mala elección basada en información es preferible a una buena decisión fruto del azar, ya que ésta última no proporciona claves útiles o información para acciones posteriores.
- **Recocido Simulado (*Simulated Annealing, SA*):** Conceptualmente es un algoritmo de búsqueda por entornos, el mismo que selecciona candidatos de forma aleatoria. Se basa en un algoritmo propuesto por

los autores (Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller, & Teller, 1953) en el marco de la termodinámica estadística, para simular el proceso de enfriamiento de un material (recocido); la energía de un sistema termodinámico se coteja con la función de coste evaluada para una solución factible de un problema combinatorio, en ambas funciones se busca evolucionar de un estado a otro de menor energía o coste. El acceso de un estado metaestable a otro se logra introduciendo “ruido” con un parámetro de control al que se denomina *temperatura* y su disminución adecuada permite con una alta probabilidad que el sistema adquiera un mínimo global de energía (Yepes, 2002).

- **Algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms, GA*):** Básicamente, estos algoritmos procuran simular el proceso evolutivo de las especies, las cuales se reproducen sexualmente. De forma generalizada se puede decir que en la evolución de los seres vivos, el problema al que cada individuo se enfrenta diariamente es el de la supervivencia. Para ello dispone de cualidades naturales provistas en su material genético. A nivel de los genes, el problema se enfoca en la búsqueda de aquellas adaptaciones beneficiosas en un medio hostil y variable. En parte, debido a la selección natural, cada especie obtiene cierto “conocimiento/información” el cual se incorpora a sus cromosomas. Durante la reproducción sexual, se genera un nuevo individuo distinto de sus padres a través de la acción de dos mecanismos esenciales: (1) el *cruciamiento*, que combina parte del patrimonio genético de cada progenitor para formar las propiedades del nuevo individuo; y (2) la *mutación*, que supone una modificación voluntaria de esta información genética. Al final, la descendencia será obligatoriamente diferente a sus progenitores, pero mantendrá parte de sus características. Se concluye luego que, si los hijos heredan buenos atributos de sus padres, estos tendrán mayor probabilidad de supervivencia que aquellos que no lo tengan y de esta manera los mejores candidatos tendrán mayor probabilidad de reproducirse y esparcir su información genética a su descendencia (Yepes, 2002).

- **Búsqueda dispersa (*Scatter Search, SS*):** La búsqueda dispersa es un método evolutivo basado en estrategias para combinar reglas de decisión; la SS se basa en el principio de que la información sobre la calidad, restricciones o soluciones puede ser utilizado mediante una combinación de estas. En específico, dadas dos soluciones se puede obtener una nueva mediante su combinación de forma tal que mejore a las dos soluciones originales. Este método guarda mucha similitud con los algoritmos genéticos (GA); en principio, una heurística produce un conjunto de soluciones que evolucionan mediante la selección, combinación lineal y transformación de vectores. La SS tiene varias características que suponen una generalización de los GA: (1) Los vectores binarios se sustituyen por otros vectores de valores enteros, (2) el nuevo vector puede generarse a partir de más de dos padres, (3) el *cruzamiento* se reemplaza por una combinación lineal de dos o más vectores y (4) la *mutación* se reemplaza por un procedimiento que recompone los nuevos vectores generados en el espacio de configuraciones factibles. Autores como (Rochat & Taillard, 1995) utilizan la memoria adaptativa como elemento fundamental de la búsqueda dispersa. Para tal efecto, en primera instancia se genera un conjunto de soluciones iniciales con un procedimiento basado en TS, luego se ordenan estas rutas en función del valor de la función objetivo, posteriormente, se elige una ruta de la memoria en función de una probabilidad creciente de acuerdo al valor de la *Función Objetivo*; considerar que los nodos inconexos deben insertarse en las rutas definidas anteriormente para finalmente realizar una post-optimización de la solución construida encontrando el óptimo relativo e incorporando los nuevos recorridos a la memoria adaptativa. Este procedimiento se debe repetir un número de veces previamente definido.
- **Métodos de Evolución Diferencial (*Differential Evolution, DE*):** Este método fue presentado en 1997, enfocado en primera instancia en la resolución de problemas de optimización continuos; posteriormente, se extendió su aplicación hacia los problemas de tipo combinatorios

basados en permutaciones. Los autores (Storn & Price, 1997) justifican su investigación bajo las siguientes consideraciones: (1) se diseñó como un método de búsqueda directa estocástico, y estos tienen la ventaja de ser aplicados con facilidad en problemas de minimización experimental, donde el valor del costo se deriva de un experimento físico en lugar de una simulación computacional, (2) posee versatilidad para realizar cálculos intensivos, es así que, si una evaluación de la función de costos generalmente toma mucho tiempo, al usar los métodos de DE se pueden obtener resultados utilizables en tiempos razonables, haciendo viable la ejecución de computación en paralelo o mediante una red de computadoras, (3) existe una considerable ventaja al requerir de poca información o pocos parámetros de control de tal manera que se facilita su utilización y (4) buenas propiedades de convergencia bajo pruebas exhaustivas en diferentes condiciones.

- **Redes Neuronales (*Neural Networks, NN*):** Estos métodos forman parte de un significativo desarrollo tecnológico, cuyo sistema de procesamiento de información es altamente complejo, no lineal y en paralelo. En general, se asemejan a las características biológicas del cerebro y están siendo adaptadas para su uso en una gran variedad de aplicaciones de tipo comercial, militar y tecnológico, estas comprenden desde el reconocimiento de patrones hasta la optimización y planificación de operaciones. Varios investigadores en la década de 1980 impulsaron el desarrollo de aplicaciones de las NN en aproximaciones basadas en la física estadística y en las redes competitivas, describiendo cualitativamente la búsqueda de la mejor solución a los problemas de optimización. Si bien, en el mundo real se buscan *buenas soluciones*, es de notar que resulta ser nominalmente más conveniente obtener una solución de menor calidad calculada en un tiempo más corto siempre que permita tomar una acción apropiada, antes que perseguir aquellas buenas soluciones. Esto se aplica en las tareas biológicas, robóticas de percepción y reconocimiento de patrones, las mismas que por su naturaleza se consideran de mayor dificultad

combinatoria dado que suelen tener un número mayor de variables, por lo tanto, también requieren de mayor tiempo para ser resueltas. Las potencias computacionales usadas de forma rutinaria por los sistemas nerviosos para resolver estos problemas de percepción deben ser realmente grandes dadas las siguientes condicionantes: (1) la masiva cantidad de datos sensoriales a procesar continuamente, (2) la dificultad inherente de las tareas de reconocimiento y (3) el corto tiempo en el cual las respuestas deben ser encontradas. La mayoría de las computadoras digitales de uso común no proporcionarían la correcta combinación de potencia – velocidad, por lo que uno de los objetivos de la investigación en neurociencia se enfoca en conocer cómo las propiedades biofísicas de las neuronas y la organización neuronal se acoplan para producir un poder de cómputo y una velocidad extraordinaria. El conocimiento de la computación biológica permite encontrar soluciones a problemas relacionados con la robótica y procesamiento de datos utilizando hardware y software no biológicos. Así también, de los estudios en anatomía, neurofisiología y psicofísica se deriva que parte de la solución a la incógnita de cómo los sistemas nerviosos proporcionan potencia y velocidad computacional es por medio del procesamiento en paralelo (Hopfield & Tank, 1985).

2.3 Modelo matemático para el Problema de Enrutamiento de Vehículos Heterogéneos con Múltiples Depósitos y Ventanas de Tiempo (MDHVRPTW)

Como se dijo anteriormente en el apartado 2.2, el problema de enrutamiento multidepósito con ventanas de tiempo y vehículos heterogéneos es una variante importante del VRP, el mismo que se deriva de un problema VRPTW dentro del marco de la optimización heurística, por lo que, en primera instancia se debe plantear un modelo matemático MIP (Mixed Integer Programming) riguroso para el problema de VRPTW.

El objetivo primordial en el presente modelo de transporte MDHVRPTW es la gestión rentable de la flota heterogénea de vehículos que proporcionan el servicio de entrega a un conjunto dado de clientes, con demandas conocidas en horarios previamente acordados, desde sus centros de distribución o depósitos y manteniendo siempre el nivel de servicio establecido por la organización; por tal razón, el responsable de la distribución en la organización no solo debe enfocarse en el número y tipo de vehículos que utilizará para su operación, sino que también, debe establecer la secuencia a seguir en la entrega de tal manera que se respeten todas las condiciones dadas.

A continuación, se detalla la nomenclatura a utilizar en el posterior planteamiento del modelo:

Índices:

- I* clientes / nodos destino
- K* clústeres / grupos / zonas
- P* depósitos / almacenes / nodos origen
- V* vehículos

Parámetros:

- Δ tiempo de espera máximo permitido entre nodos dentro del clúster
- ρ_i costo de penalización por unidad de tiempo, por violación de ventana de tiempo especificada para el nodo *i*
- ρ_v costo de penalización por violación de tiempo de trabajo máximo del vehículo *v*
- a_i tiempo de inicio de servicio del nodo *i*
- aC_k tiempo de inicio de servicio del clúster C_k
- b_i tiempo de fin de servicio del nodo *i*
- bC_k tiempo de fin de servicio del clúster C_k
- c_{ij}^v matriz de costos (distancia) por vehículo
- cf_v costo fijo por usar el vehículo *v*

d^{max}	<i>distancia máxima permitida entre nodos dentro de un clúster</i>
l	<i>conjunto cardinalidad de depósitos / almacenes</i>
m	<i>conjunto cardinalidad de vehículos</i>
n	<i>conjunto cardinalidad de nodos clientes</i>
nC	<i>conjunto cardinalidad de clústeres / zonas</i>
q_v	<i>capacidad del vehículo v</i>
st_i^v	<i>tiempo de servicio en el nodo i del vehículo v</i>
stC_k	<i>tiempo de servicio efectivo en el clúster C_k</i>
t_{ij}^v	<i>menor costo por viaje (tiempo) desde el nodo i hasta el nodo j</i>
tv_v^{max}	<i>tiempo máximo de trabajo del vehículo v</i>
w_i	<i>demanda del nodo i</i>
wC_k	<i>demanda del clúster C_k</i>

Variables:

S_{ij}	<i>variable binaria, denota si el nodo i se visita antes o después del nodo j</i>
X_{pv}	<i>variable binaria, denota si el vehículo v es asignado al depósito p</i>
Y_{iv}	<i>variable binaria, denota si el vehículo v es asignado al nodo i</i>
Δa_i	<i>i-ésima violación de la ventana de tiempo debido a un servicio temprano</i>
Δb_i	<i>i-ésima violación de la ventana de tiempo debido a un servicio tardío</i>
ΔT_v	<i>violación de tiempo de trabajo para el vehículo v</i>
C_i	<i>costo acumulado (distancia) hasta el nodo i</i>
CV_v	<i>costo total (distancia) para el vehículo v</i>
T_i	<i>tiempo de llegada del vehículo al nodo i</i>
TV_v	<i>duración del tour para el vehículo v</i>

Definición del problema:

Los autores (Dondo & Cerdá, 2004) definen formalmente el problema de la siguiente forma:

Sea la siguiente red, representada por el grafo dirigido $G\{I, P, A\}$, que conecta los nodos clientes $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\}$ y los nodos depósitos $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ a través de un conjunto de aristas dirigidas $A = \{(i, j) / i, j \in (I \cup P)\}$; el borde $(i, j) \in A$ se supone que es la ruta de menor costo que conecta el nodo i con el nodo j . En cada ubicación del cliente $i \in I$ se entregará una carga fija w_i dentro de una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$, donde a_i es la hora más temprana y b_i es la última hora a la que se puede comenzar el servicio. Sea también una flota de vehículos heterogéneos $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$ con diferentes capacidades de carga (q_v) y alojados en múltiples depósitos $p \in P$ con disponibilidad para realizar tareas de entrega requeridas. Cada vehículo v debe salir del depósito $p \in P$ asignado para entregar la carga completa de varios clientes y luego retornar al mismo terminal de carga p . Entonces, la ruta para el vehículo v es un tour de nodos $r = (p, \dots, i, (i + 1), \dots, p)$ conectados por aristas dirigidas que pertenecen a A , que comienzan y terminan en el depósito p asignado al vehículo v . Asociado al conjunto de aristas $a_{ij} \in A$ existen las matrices vehículo–dependientes $C = \{c_{ij}^v\}$ y $T = \{t_{ij}^v\}$ que denotan el costo y el tiempo de viaje desde el nodo i al nodo j usando el vehículo v , respectivamente. Se asume que la desigualdad triangular se satisface con los c_{ij} y t_{ij} , es decir, $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij}$ y $t_{ik} + t_{kj} \geq t_{ij}$. La demanda (w_i) y el tiempo de servicio por vehículo v (st_i^v) para el nodo i deben ser datos conocidos del problema.

Por lo tanto, una solución factible para el problema VRPTW debe cumplir las siguientes restricciones: (i) cada ruta debe comenzar y finalizar en el mismo depósito; (ii) cada nodo debe ser atendido por un solo vehículo; (iii) la carga total asignada al vehículo v nunca debe exceder su capacidad de carga q_v ; (iv) el período de tiempo durante el cual un vehículo v puede estar en servicio debería ser más corto que el tiempo de trabajo máximo permitido tv_v^{max} ; (v) el servicio de entrega en cada cliente debe comenzar en el intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ ya que de lo contrario se aplica un costo de penalización.

El objetivo del problema es minimizar el costo total de realizar los servicios de entrega en todos los nodos clientes. En la función objetivo se consideran cuatro

tipos de costos: (1) los costos fijos por el uso del vehículo, (2) los costos variables correspondientes a la distancias recorridas y tiempos de viaje de las rutas seleccionadas, (3) los costos de los tiempos de espera y (4) los costos de las penalizaciones resultantes de las violaciones a las restricciones de horario y tiempo total de trabajo.

Variables de decisión del problema:

En la formulación matemática propuesta por los autores (Dondo & Cerdá, 2004) se definen tres conjuntos diferentes de variables binarias (0 – 1) detalladas a continuación:

$$Y_{iv} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna el vehículo } v \text{ al cliente } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad i \in I, v \in V$$

$$X_{pv} = \begin{cases} 1, & \text{si se asigna el vehículo } v \text{ al depósito } p \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad v \in V, p \in P$$

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } i \text{ se visita antes del nodo } j \\ 0, & \text{si el nodo } i \text{ se visita después del nodo } j \end{cases} \quad i \in I, j \in I$$

$Y_{iv} = Y_{jv} = 1$, solo si los clientes i, j son atendidos por el mismo vehículo v

Se define una sola variable S_{ij} para cada par de nodos (i, j) que comparten el mismo recorrido. Por lo tanto, el orden relativo de los nodos (i, j) se establece mediante la variable s_{ij} , tal que $ord(i) < ord(j)$, donde $ord(i)$ indica la posición relativa del elemento i en el conjunto de clientes I .

2.3.1 Función Objetivo y Restricciones

La *Función Objetivo* (2.3.1.1) busca minimizar los costos generales del servicio, incluidos los costos fijos de utilización del vehículo, los costos de distancia y tiempo de viaje, los costos de espera y del tiempo de servicio y los costos de penalización. El parámetro cf_v representa el costo fijo de usar el vehículo v y la variable binaria X_{pv} llega a ser igual a uno solo si se emplea el vehículo v , esto se da cada vez que un vehículo es asignado a un depósito p . Como la duración del tour incluye todos los tiempos de viajes, los tiempos de espera y los

tiempos de servicio, se incluye un solo término en la función objetivo para cargar en ella todos los costos basados en los tiempos, así como los costos de mano de obra. Se supone que este tipo de costo es una función lineal de tiempo y el parámetro c_t denota el costo de mano de obra por unidad de tiempo. Además, CV_v representa el costo total de viaje basado en la distancia y los dos últimos términos penalizan las infracciones ya sea en el tiempo de trabajo máximo permitido o en las ventanas de tiempo de cada nodo.

A continuación se describe la función objetivo y restricciones del modelo para una mejor comprensión:

$$MinZ = \sum_{v \in V} \left(cf_v \sum_{p \in P} X_{pv} + c_t TV_v + CV_v \right) + \rho_v \Delta T_v + \sum_{i \in I} \rho_i (\Delta a_i + \Delta b_i) \quad (2.3.1.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{v \in V} Y_{iv} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2.3.1.2)$$

$$\sum_{p \in P} X_{pv} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (2.3.1.3)$$

$$C_i \geq c_{pi}^v (X_{pv} + Y_{iv} - 1) \quad \forall i \in I, p \in P, v \in V \quad (2.3.1.4)$$

$$C_j \geq C_i + c_{ij}^v - M_c (1 - S_{ij}) - M_c (2 - Y_{iv} - Y_{jv}) \quad (2.3.1.5)$$

$$C_i \geq C_j + c_{ji}^v - M_c S_{ij} - M_c (2 - Y_{iv} - Y_{jv}) \quad \forall i, j \in I, v \in V: i < j \quad (2.3.1.6)$$

$$CV_u \geq C_i + c_{ip}^v - M_c (2 - X_{pv} - Y_{iv}) \quad \forall i \in I, p \in P, v \in V \quad (2.3.1.7)$$

$$T_i \geq t_{pi}^v (X_{pv} + Y_{iv} - 1) \quad \forall i \in I, p \in P, v \in V \quad (2.3.1.8)$$

$$T_j \geq T_i + st_i + t_{ij}^v - M_t (1 - S_{ij}) - M (2 - Y_{iv} - Y_{jv}) \quad (2.3.1.9)$$

$$T_i \geq T_j + st_j + t_{ji}^v - M_T S_{ij} - M (2 - Y_{iv} - Y_{jv}) \quad \forall i, j \in I, v \in V: i < j \quad (2.3.1.10)$$

$$TV_v \geq T_i + st_i + t_{ip}^v - M_T(2 - X_{pv} - Y_{iv}) \quad \forall i \in I, p \in P, v \in V \quad (2.3.1.11)$$

$$\Delta a_i \geq a_i - T_i \quad \forall i \in I \quad (2.3.1.12)$$

$$\Delta b_i \geq T_i - b_i \quad \forall i \in I \quad (2.3.1.13)$$

$$\Delta T_v \geq TV_v - tv_v^{max} \quad \forall v \in V \quad (2.3.1.14)$$

$$\sum_{i \in I} w_i Y_{iv} \leq q_v \sum_{p \in P} X_{pv} \quad \forall v \in V \quad (2.3.1.15)$$

Restricciones del problema:

- **Asignación de nodos a vehículos:** La restricción (2.3.1.2) establece que cada nodo cliente $i \in I$ debe ser atendido por un solo vehículo $v \in V$. La división de la carga es una opción no permitida.
- **Asignación de vehículos a depósitos:** La restricción (2.3.1.3) establece que cada vehículo usado v debe asignarse a un único depósito p , al que debe retornar luego de visitar a todos los clientes asignados en la ruta. En relación al tamaño requerido de la flota es una variable del problema que se determina simultáneamente con el mejor conjunto de rutas y horarios.
- **Menor costo de viaje para el vehículo v al llegar al nodo i :** La restricción (2.3.1.4) establece que el costo de viajar (C_i) del depósito p al nodo i debe ser mayor o igual que c_{pi}^v solo si el nodo $i \in I$ recibe servicio del vehículo v ($Y_{iv} = 1$) desde el depósito p ($X_{pv} = 1$). Esto es así debido a que por definición, c_{pi}^v denota el menor costo de viaje del depósito p al nodo i .
- **Relación entre los costos de viaje hasta los nodos $i, j \in I$ en el mismo tour:** Sea c_{ij}^v el menor costo de viaje del nodo i al nodo j en el vehículo v . Si los nodos (i, j) pertenecen al mismo tour ($Y_{iv} = Y_{jv} = 1$, para algún vehículo v) y si el nodo i es visitado antes ($S_{ij} = 1$), en la restricción (2.3.1.5) se establece que el costo de viaje basado en la

distancia desde el depósito al nodo j (C_j) siempre debe ser mayor que C_i por al menos c_{ij}^v . Por el contrario, si el nodo j es visitado antes ($S_{ij} = 0$), se cumple la instrucción inversa. Las restricciones (2.3.1.5) y (2.3.1.6) resultan ser redundantes cuando los nodos $i, j \in I$ son atendidos por vehículos diferentes ($Y_{iv} + Y_{jv} < 2$, por cualquier v). Por definición, M_C es un gran número positivo.

- **Costo total del viaje a lo largo del recorrido asignado al vehículo v :** La restricción (2.3.1.7) establece que el costo total del viaje correspondiente al vehículo v (CV_v) para cumplir con la asignación siempre debe ser mayor que los costos de viaje desde el depósito a cualquier nodo i (C_i). De hecho, el último nodo visitado por el vehículo v es el que define el valor de CV_v . Por lo tanto, la restricción (2.3.1.7) relacionada con tal nodo y el vehículo asignado v es solo la que se une al nivel óptimo. Si los nodos $i, i' \in I$ pertenecen a la misma ruta y el nodo i' es el último en ser visitado, entonces esta restricción para el nodo i sería redundante porque por definición el costo de viaje C_{ip}^v es menor o como máximo igual a los costos de viaje de i a p a través de al menos otro nodo i' , es decir, $c_{ip}^v \leq c_{ii'}^v + c_{i'p}^v$.
- **Tiempo de inicio del servicio más temprano en el nodo i :** La restricción (2.3.1.8) establece que el vehículo v nunca comenzará el servicio en el nodo i asignado antes del tiempo t_{pi}^v , donde t_{pi}^v es el menor tiempo de viaje desde el depósito p al nodo i . La restricción supone que el vehículo v está listo en $t = 0$. De lo contrario, el tiempo de preparación del vehículo v debe agregarse a t_{pi}^v . Por definición, M_T es un gran número positivo.
- **Relación entre las horas de inicio del servicio en el par de nodos (i, j) en el mismo tour:** Suponiendo que los nodos i y j son atendidos por el mismo vehículo v ; si el nodo i es visitado antes ($S_{ij} = 1$), entonces la restricción (2.3.1.9) establece que el tiempo de inicio del

servicio en el nodo j (T_j) debería ser mayor que T_i por al menos la suma del tiempo de viaje t_{ij}^v y el tiempo de servicio (st_i) en el nodo i . Sino, ($S_{ij} = 0$) la declaración inversa se cumple y la restricción (2.3.1.10) se activará. Si uno de los nodos no está en el tour, entonces $Y_{iv} + Y_{jv} < 2$ y las restricciones (2.3.1.9) y (2.3.1.10) se vuelven redundantes.

- **Tiempo total de viaje para el vehículo v :** La restricción (2.3.1.11) indica que el tiempo total requerido por el vehículo v para completar el recorrido resulta de la suma del tiempo de servicio st_i en el nodo i y el tiempo de viaje t_{ip}^v a lo largo del borde (i, p) al tiempo inicial de servicio en el nodo visitado por última vez i , es decir, el servicio inicial más grande. Como el nodo visitado por última vez por el vehículo v no se conoce de antemano, entonces, la restricción planteada debe escribirse para cada nodo i .
- **Violación de las restricciones de tiempo debido a servicios tempranos/tardíos:** Las ventanas de tiempo pueden ser duras o suaves; cuando se consideran duras, la restricción (2.3.1.12) establece que un vehículo no puede iniciar el servicio en el nodo i asignado antes del primer tiempo a_i , se concluye que $\Delta a_i = 0$. De igual manera la restricción (2.3.1.13) prohíbe iniciar el servicio en el nodo i después del último tiempo permitido b_i , se establece $\Delta b_i = 0$. Si el vehículo llega demasiado temprano al punto de entrega, este debe esperar hasta que el cliente esté listo para comenzar el servicio. Cuando las ventanas de tiempo son suaves, las restricciones establecidas se pueden violar a un costo finito y el vehículo puede iniciar el servicio en el nodo asignado antes del tiempo a_i . Por lo tanto, las variables Δa_i y Δb_i representan el tamaño de las violaciones referente a las restricciones de las ventanas de tiempo.
- **Violación de las restricciones de tiempo para el vehículo v :** La restricción (2.3.1.14) se aplica solo en el caso de que el tiempo de trabajo máximo permitido tv_v^{max} se considere como una restricción de

tipo suave que puede ser violada con un determinado costo de penalización. De lo contrario, TV_v no debería ser mayor que tv_v^{max} .

- **Restricciones de capacidad:** La restricción (2.3.1.15) establece que la carga total para entregar a los clientes asignados a un vehículo v nunca debe exceder la capacidad de carga del vehículo q_v . Todo vehículo v seleccionado es asignado a un solo depósito p , por lo tanto, $\sum_p X_{pv} = 1$.

Por definición, las variables T_i , TV_v , C_i , CV_v , Δa_i , Δb_i y ΔT_v son no-negativas; las restricciones de asignación (2.3.1.2) y (2.3.1.3) junto con las restricciones de costo de viaje (2.3.1.4), (2.3.1.5), (2.3.1.6) y (2.3.1.7), y las restricciones de capacidad del vehículo (2.3.1.15) definen el espacio solución factible para un problema VRP tradicional.

Las ventanas de tiempo del problema incluyen restricciones de tiempo de llegada (2.3.1.8), (2.3.1.9), (2.3.1.10) y (2.3.1.11), y restricciones de violación de tiempo suaves (2.3.1.12), (2.3.1.13) y (2.3.1.14). Para el problema no son necesarias restricciones de interrupción de sub-tour. Así mismo, las restricciones de ventanas de tiempo y tiempo de servicio se pueden ajustar a restricciones duras igualando las siguientes variables a una constante cero: $\Delta a_i = 0$, $\Delta b_i = 0$ y $\Delta T_v = 0$.

En resumen, el modelo matemático general detallado anteriormente permite representar una flota de tamaño fijo o variable compuesta por vehículos homogéneos o heterogéneos y alojados en depósitos únicos o múltiples. Inclusive, se puede aplicar si se consideran recorridos abiertos que no comienzan ni terminan en el mismo depósito.

2.4 Método de solución

Para el desarrollo del problema planteado y considerando todas las variables del modelo, es necesaria la aplicación de una técnica de solución compuesta de dos etapas, descrita en su forma general de la siguiente manera:

(1) Primero *agrupar*; y,

(2) Después *rutear*.

Para la etapa de agrupamiento se necesita de un método práctico que se adapte a la realidad del problema y que permita segmentar eficientemente el espacio de coordenadas geográficas en un número determinado de clústeres; para este propósito se utiliza el método denominado *k-means*, el cual pertenece a la familia de algoritmos de clustering basados en centros y usa una cantidad conocida de “centros” para particionar en subgrupos los datos de entrada. Cada centro define un clúster con un punto central (centroide) y el algoritmo comienza con una aproximación sobre la solución para posteriormente mejorar/refinar iterativamente las posiciones de los centros hasta que el algoritmo converja, es decir, hasta que los centroides se estabilicen.

A continuación se presenta la definición de un modelo general de agrupación iterativa basada en centros:

Algoritmo *k-means*

1. *Inicializar el algoritmo con los centros dados C .*
2. *Para cada punto de datos x_i , calcular su pertenencia $m(c_j|x_i)$ en cada centro c_j y su peso $w(x_i)$.*
3. *Para cada centro c_j , recalculer su ubicación desde todos los puntos de datos x_i de acuerdo con sus pertenencias y ponderaciones:*

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n m(c_j|x_i)w(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n m(c_j|x_i)w(x_i)}$$

4. *Repetir los pasos 2 y 3 hasta la convergencia.*
-

El algoritmo *k-means* permite delimitar las regiones en k conjuntos y la solución encontrada sería un conjunto compuesto de k centros, cada uno de los cuales se encuentra en el centro de gravedad de los datos, y siendo este el centro más cercano; de tal manera que, para la función de pertenencia, cada punto pertenece a su centro más cercano, formando k particiones *Voronoi*.

Por concepto, cada partición se fundamenta en un criterio de proximidad, tomando en cuenta el radio de búsqueda y una distancia (d) que separa a un clúster de otro: A continuación, en la Figura 8 se aprecia que dado un conjunto de centros de clúster $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\} \subset \mathbb{X}$, el diagrama *Voronoi* se define como la subdivisión del espacio en k áreas ($k=3$), tal que $x \in Area(C_i)$ si y sólo si $d(x, C_i) < d(x, C_j)$, para $j \neq i$ (Uribe, Solar, Brisaboa, Pedreira, & Seco, 2008).

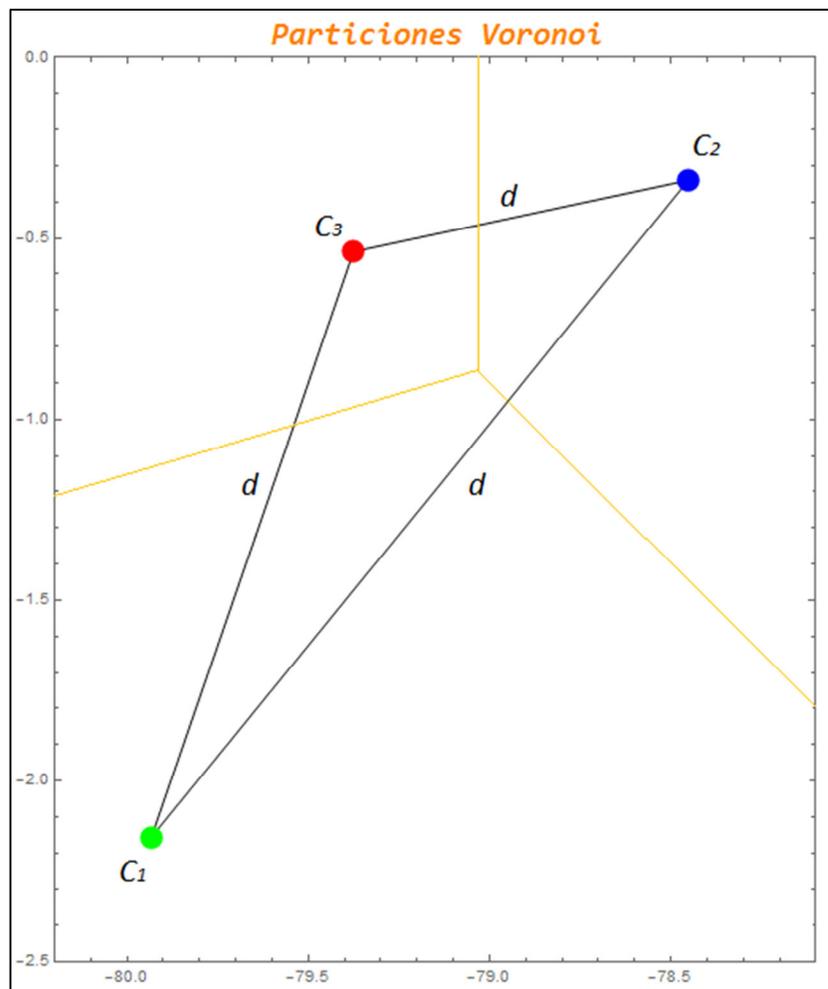


Figura 8. División del espacio en k áreas

El algoritmo *K-means* busca minimizar la varianza dentro del clúster, es decir, la distancia cuadrada entre cada centro y sus puntos asignados, el mismo que tiene una función de pertenencia dura y una función de peso constante que otorga la misma importancia a todos los puntos.

A continuación, en la Figura 9 se muestran gráficamente los clústeres/zonas encontrados aplicando el algoritmo propuesto sobre toda la matriz de nodos, sin diferenciación alguna, los mismos que se calcularon en función de la menor distancia geográfica desde cada punto (clientes) hacia los 3 centros inicializados, los cuales representan a cada uno de los nodos origen (múltiples depósitos) del modelo matemático planteado en el apartado 2.3.

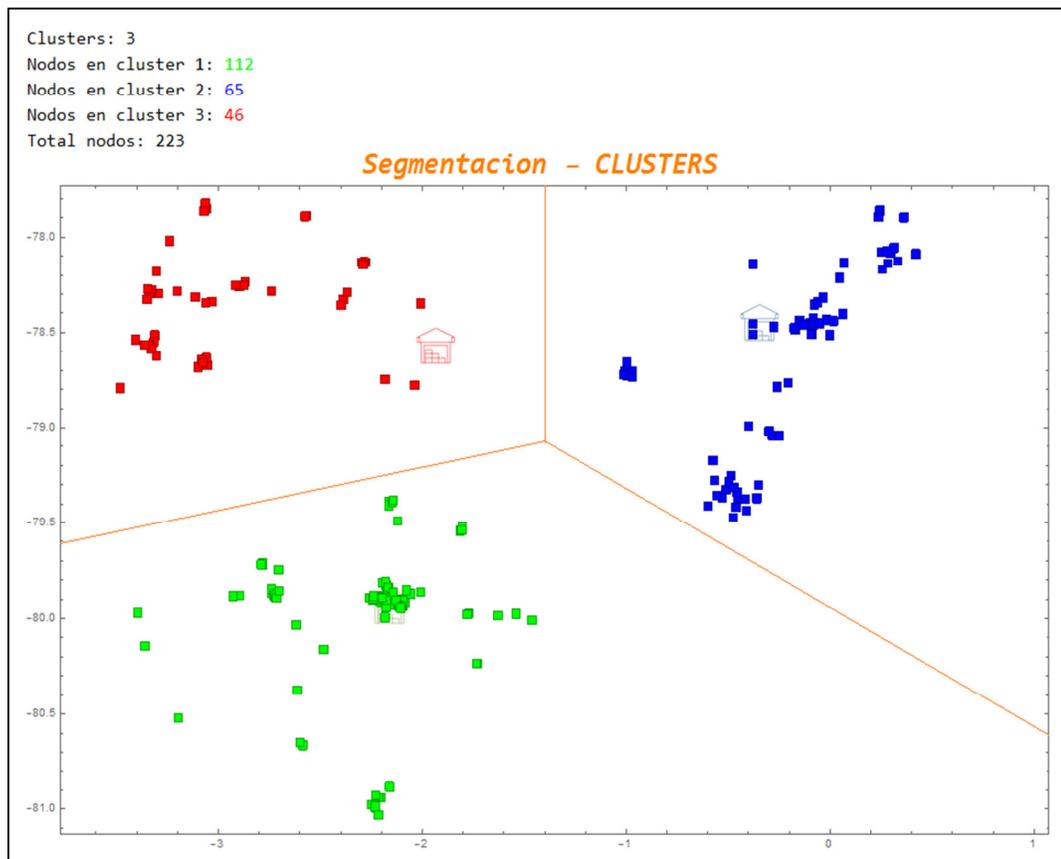


Figura 9. Segmentación de datos espaciales

En la siguiente etapa del desarrollo se realiza el ruteo con los nodos de cada cluster, considerando previamente que existen clientes con determinada frecuencia de entrega. Para este propósito, es necesario la aplicación de una metaheurística apropiada dentro del ámbito de estudio de los problemas VRP, tomando como mejor alternativa el uso de GRASP, según la metodología mencionada en el apéndice 2.2.

2.4.1 GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)

GRASP es un procedimiento multi-arranque en el que cada iteración consiste en una fase de construcción *greedy* aleatorizada y una fase de mejora, este proceso se repite hasta que se cumpla el criterio de parada (número determinado de iteraciones). Esta metodología también es de tipo adaptativo, dado que en cada iteración se actualizan los beneficios obtenidos al añadir un elemento seleccionado a la solución parcial del problema. Es decir, el resultado que se obtenga de añadir un determinado elemento a la solución en la iteración i no coincidirá necesariamente con la que se tenga en la iteración $i + 1$.

De igual manera, se conoce que GRASP es un heurístico de tipo aleatorio dado que no selecciona el mejor candidato según la función *greedy* adaptada, sino que, bajo el criterio de diversificación se construye una lista con los mejores candidatos (LRC) de entre los cuales se selecciona uno al azar.

A continuación se muestra el esquema del funcionamiento global del algoritmo:

Algoritmo GRASP

Mientras (condición de parada)

Fase Constructiva

- *Seleccionar una lista de elementos candidatos.*
- *Considerar una lista restringida de los mejores candidatos.*
- *Seleccionar un elemento aleatoriamente de la lista restringida.*

Fase de Mejora

- *Realizar un proceso de búsqueda local a partir de la solución construida hasta que no se pueda mejorar más.*

Actualización

- *Si la solución obtenida mejora a la mejor almacenada, actualizarla.*
-

En la fase constructiva se aplica un procedimiento heurístico que permite obtener una solución inicial factible, la misma que procura ser mejorada posteriormente mediante un algoritmo de búsqueda local en vecindad.

2.4.2 Fase constructiva

Para obtener la solución inicial del caso de estudio planteado, en la fase constructiva se aplicó una variante de fácil implementación por medio de un heurístico basado en *ahorros*. Este procedimiento consiste en combinar sucesivamente los subtours hasta obtener un ciclo Hamiltoniano, lo que implica la eliminación de las aristas que conectan dos vértices de diferentes subtours con un vertice común entre ellos llamado *base*, para posteriormente unir estos vértices entre sí. En la Figura 10 se ilustra una iteración del procedimiento.

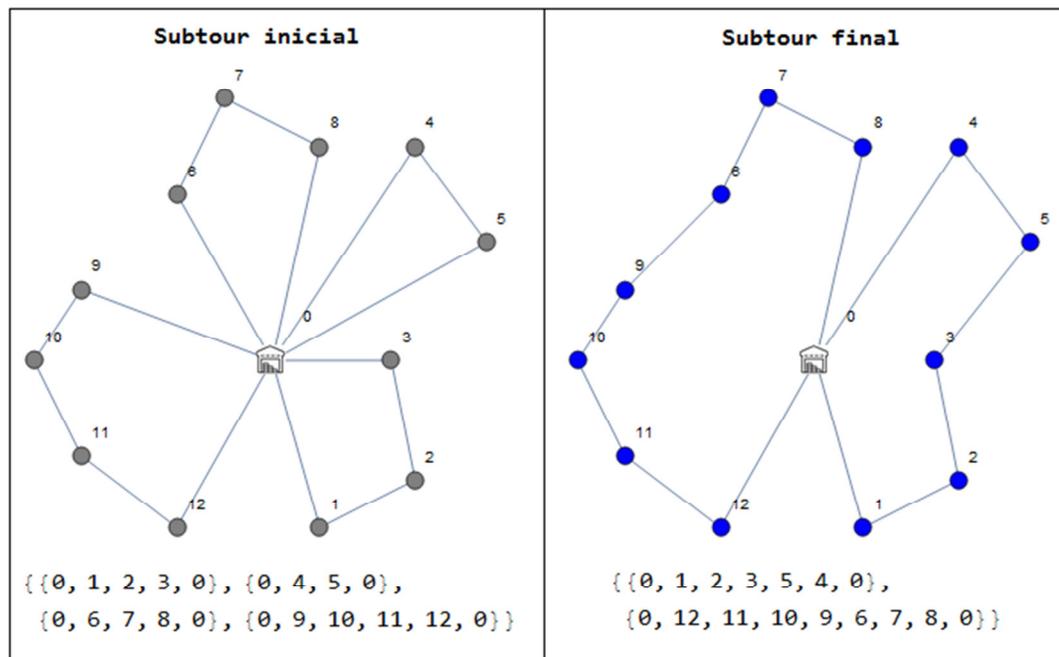


Figura 10. Combinación de subtour

A continuación, en la Figura 11 se muestra un ciclo Hamiltoniano resultante de la aplicación del procedimiento para la obtención del ciclo al tour inicial dado, el cual se fundamenta teóricamente en: (1) recorrer los vértices una sola vez y (2) iniciar y terminar en el mismo vértice.

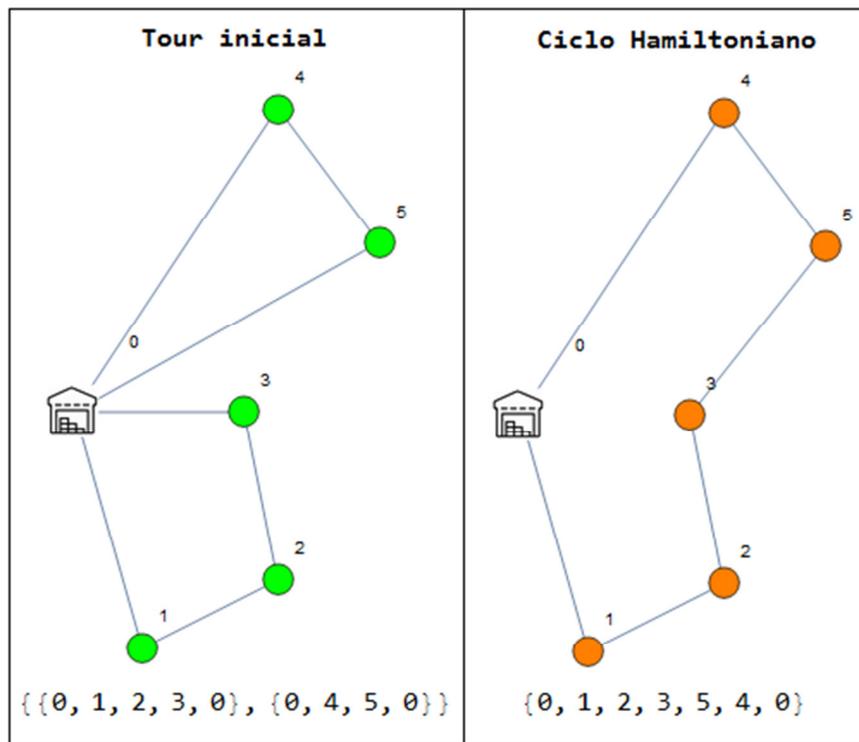


Figura 11. Ciclo Hamiltoniano

El concepto de *ahorro* planteado inicialmente corresponde a la diferencia del costo entre las aristas eliminadas y añadidas al tour.

2.4.3 Fase de mejora

Dado que las soluciones encontradas en la fase constructiva no garantizan la optimalidad local respecto a una vecindad, se hace necesario realizar una búsqueda posterior. Este procedimiento de búsqueda local parte de la solución inicial encontrada, en donde se calcula el valor de la función objetivo sobre su vecindad, considerando que cada solución del problema tiene un conjunto de soluciones asociadas.

Al realizar un movimiento sobre la solución obtenida en la fase anterior, se tiene como resultado una nueva solución que pertenece a la vecindad de partida. En cada iteración el algoritmo hace un movimiento "visitando" una nueva solución del entorno de la solución inicial, tal como se aprecia en la Figura 12.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología se desarrolla en base a los lineamientos descritos en la presente investigación, en donde se espera realizar un análisis enfocado en todos los parámetros y variantes que definen el comportamiento del proceso de distribución de la organización, con énfasis en determinados factores críticos, cuantificando los costos atribuibles a la operación de tal manera que se refleje la realidad del sistema objeto de estudio y de ser posible se logre identificar potenciales oportunidades de mejora en busca de la eficiencia en términos logísticos.

3.1 Desarrollo metodológico

Considerando que el objeto de la investigación se enfoca únicamente en el proceso de distribución, y previo al desarrollo del modelo de optimización de rutas se consideró necesario conocer el marco sobre el cual se ejecutan las operaciones diariamente; con el propósito que se contemple en su real magnitud todos los condicionantes que delimitan su funcionamiento, de tal forma que, se obtengan posteriormente resultados coherentes apegados a la realidad del negocio.

A continuación, se presentan todas las etapas del desarrollo metodológico que permiten abordar en primera instancia el presente problema de investigación.

3.1.1 Definición

En la definición se abordan varios puntos relevantes relacionados con el *proceso de distribución* de la organización (almacenes – clientes) que enmarcan el tamaño y el nivel de complejidad del problema objeto del presente estudio, tales como: territorio y zonas, centros de distribución y puntos de entrega, cobertura del transporte contratado, tamaño de la flota y alcance funcional de la solución del modelo.

Territorio: la organización realiza una importante cobertura en varios cantones de las principales provincias de la región Costa y Sierra dentro del territorio ecuatoriano; con enfoque único en clientes del segmento Mayorista y Autoservicio con los que se tiene acuerdos de entrega de sus pedidos en cada uno de sus establecimientos, dado por los altos volúmenes de compra que justifican la contratación de fletes a los distintos operadores logísticos. A continuación en la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 se detallan el número de clientes (nodos destino) en cada una de las provincias.

Provincia	Cantón	No. Clientes
El Oro	El Guabo	1
	Huaquillas	1
	Machala	9
	Pasaje	4
	Piñas	2
	Santa Rosa	2
	Total El Oro	19
Esmeraldas	Atacames	1
	Esmeraldas	4
	Muisne	1
	Súa	1
	Tonsupa	1
	Total Esmeraldas	8
Guayas	Colimes	1
	Daule	2
	Duran	13
	El Triunfo	1
	Gral. Villamil	2
	Guayaquil	40
	Milagro	8
	Naranjal	1
	Palestina	1
	Pedro Carbo	2
	Salitre	1
	Samborondón	2
	Santa Lucía	2
Yaguachi	1	
Total Guayas	77	
Los Ríos	Babahoyo	3
	Quevedo	5
	Total Los Ríos	8

Manabí	Abdón Calderón	1
	Bahía de Caráquez	3
	Canoa	1
	Charapotó	1
	Chone	3
	El Carmen	2
	Flavio Alfaro	1
	Jama	1
	Jaramijó	1
	Manta	5
	Montecristi	1
	Portoviejo	5
	Rocafuerte	1
	San Clemente	1
	San Jacinto	1
	San Lorenzo	1
	San Vicente	1
	Sucre	1
Tosagua	1	
Total Manabí	32	
Santa Elena	Ballenita	2
	La Libertad	6
	Punta Blanca	1
	Salinas	1
	Santa Elena	1
Total Santa Elena	11	
Total general	155	

Tabla 8. Clientes Región Costa

Provincia	Cantón	No. Clientes
Cañar	Cochancay	1
	Total Cañar	1
Carchi	Bolivar	1
	El Angel	1
	Los Andes	1
	Total Carchi	3
Cotopaxi	Latacunga	3
	Total Cotopaxi	3
Imbabura	Ibarra	6
	Salinas	1
	Yachay	1
	Total Imbabura	8
Pichincha	Amaguaña	1
	Calacalí	1
	Cayambe	1

	General Rumiñahui	2
	Guayllabamba	2
	Machachi	2
	Puellaro	1
	Quito	12
	San Antonio	2
	Tabacundo	1
	Total Pichincha	25
Santo Domingo	Santo Domingo	6
	Total Santo Domingo	6
	Ambato	7
	Baños	1
	Cevallos	1
	Huambaló	1
	Mocha	1
	Patate	1
Tungurahua	Pelileo	1
	Pillaro	1
	Quero	1
	Salasaca	2
	Salcedo	1
	Total Tungurahua	18
	Total general	64

Tabla 9. Clientes Región Sierra

Provincia	Cantón	No. Clientes
Napó	Papallacta	1
	Total Napó	1
Total general		1

Tabla 10. Clientes Región Oriente

Zonas: la organización divide geográficamente el territorio nacional en tres zonas/clústeres (K_1, K_2, K_3) de cobertura, asociada cada una de ellas a un almacén y un número fijo de clientes, en función de su cercanía; es decir, la menor distancia desde un depósito (P_1, P_2, P_3) a un determinado cliente ($I_1, I_2, I_3, \dots, I_{220}$). A continuación en la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se describen en detalle los almacenes y sus clientes respectivamente por cada una de las zonas.

Nodo	ID Nodo	Provincia	Ubicación
P_1	Almacén 01	Guayas	Guayaquil
I_1	Cliente 01	Los Ríos	Babahoyo

I_2	Cliente 02	Los Ríos	Babahoyo
I_3	Cliente 03	Los Ríos	Babahoyo
...	...		
I_{27}	Cliente 27	Guayas	Guayaquil
I_{28}	Cliente 28	Guayas	Guayaquil
...	...		
I_{66}	Cliente 66	Guayas	Guayaquil
I_{67}	Cliente 67	El Oro	Huaquillas
I_{68}	Cliente 68	Santa Elena	La Libertad
...	...		
I_{82}	Cliente 82	El Oro	Machala
I_{83}	Cliente 83	Guayas	Milagro
...	...		
I_{92}	Cliente 92	Guayas	Palestina
I_{93}	Cliente 93	El Oro	Pasaje
...	...		
I_{98}	Cliente 98	Guayas	Pedro Carbo
...	...		
I_{105}	Cliente 105	Guayas	Samborondón
I_{106}	Cliente 106	Santa Elena	Santa Elena
I_{107}	Cliente 107	Guayas	Santa Lucía
...	...		
I_{111}	Cliente 111	Guayas	Yaguachi

Tabla 11. Distribución zona 1 (K_1)

Nodo	ID Nodo	Provincia	Ubicación
P_2	Almacén 02	Pichincha	Sangolqui
I_{112}	Cliente 112	Pichincha	Amaguaña
I_{113}	Cliente 113	Tungurahua	Ambato
I_{114}	Cliente 114	Tungurahua	Ambato
...	...		
I_{120}	Cliente 120	Tungurahua	Baños
I_{121}	Cliente 121	Carchi	Bolivar
I_{122}	Cliente 122	Pichincha	Calacalí
I_{123}	Cliente 123	Pichincha	Cayambe
...	...		
I_{126}	Cliente 126	Pichincha	General Rumiñahui
I_{127}	Cliente 127	Pichincha	General Rumiñahui
I_{128}	Cliente 128	Pichincha	Guayllabamba
...	...		
I_{131}	Cliente 131	Imbabura	Ibarra
I_{132}	Cliente 132	Imbabura	Ibarra
...	...		
I_{137}	Cliente 137	Cotopaxi	Latacunga
...	...		

I_{145}	Ciente 145	Tungurahua	Patate
I_{146}	Ciente 146	Tungurahua	Pelileo
...	...		
I_{150}	Ciente 150	Pichincha	Quito
...	...		
I_{160}	Ciente 160	Pichincha	Quito
...	...		
I_{167}	Ciente 167	Pichincha	San Antonio
I_{168}	Ciente 168	Pichincha	Tabacundo
I_{169}	Ciente 169	Imbabura	Yachay

Tabla 12. Distribución zona 2 (K_2)

Nodo	ID Nodo	Provincia	Ubicación
P_3	Almacén 03	Los Ríos	Buena Fe / Patricia Pilar
I_{170}	Ciente 170	Manabí	Abdón Calderón
I_{171}	Ciente 171	Esmeraldas	Atacames
I_{172}	Ciente 172	Manabí	Bahía de Caráquez
...	...		
I_{182}	Ciente 182	Esmeraldas	Esmeraldas
I_{183}	Ciente 183	Esmeraldas	Esmeraldas
...	...		
I_{189}	Ciente 189	Manabí	Manta
I_{190}	Ciente 190	Manabí	Manta
...	...		
I_{197}	Ciente 197	Manabí	Portoviejo
...	...		
I_{204}	Ciente 204	Los Ríos	Quevedo
I_{205}	Ciente 205	Los Ríos	Quevedo
I_{206}	Ciente 206	Manabí	Rocafuerte
I_{207}	Ciente 207	Manabí	San Clemente
I_{208}	Ciente 208	Manabí	San Jacinto
I_{209}	Ciente 209	Manabí	San Lorenzo
I_{210}	Ciente 210	Manabí	San Vicente
I_{211}	Ciente 211	Santo Domingo	Santo Domingo
...	...		
I_{220}	Ciente 220	Manabí	Tosagua

Tabla 13. Distribución zona 3 (K_3)

A continuación, en la Figura 13 se muestra gráficamente la distribución espacial de los clientes por cada zona para el proceso de distribución secundaria, en donde se evidencia mayor concentración en las ciudades de Guayaquil y Quito con 40 y 20 puntos de entrega respectivamente (nodos destino).

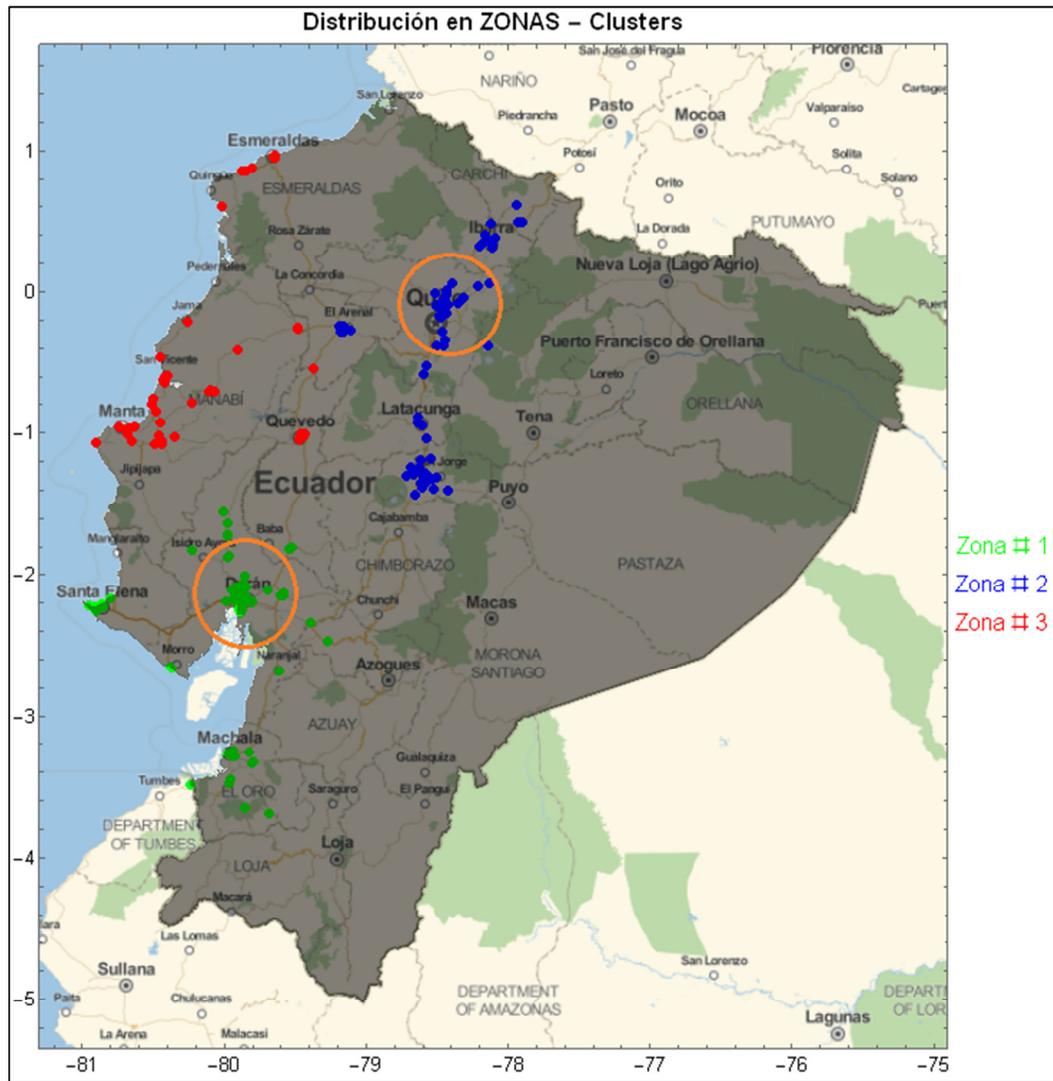


Figura 13. Distribución espacial de clientes por zonas

Centros de Distribución: los depósitos tienen un rol fundamental en el proceso de distribución para la organización, son el punto de partida y llegada de todas las rutas asignadas diariamente. A continuación, en la Tabla 14 se muestran en detalle las ubicaciones de los almacenes por cada zona, los mismos que están asentados en localidades estratégicas y de alta influencia que les facilita el acceso a sus clientes por medio de las vías primarias y secundarias existentes.

Nodo	C. Operaciones	Provincia	Ubicación	Latitud	Longitud
Almacén # 1	Zona # 1	Guayas	Guayaquil	-2.1555	-79.9330

Almacén # 2	Zona # 2	Pichincha	Sangolquí	-0.3396	-78.4520
Almacén # 3	Zona # 3	Los Ríos	Buena Fe / Patricia Pilar	-0.5375	-79.3753

Tabla 14. Ubicación de almacenes

En la Figura 14 se muestra la ubicación geográfica de los tres almacenes que funcionan para cada una de las zonas como su centro de operaciones, en cuanto a la gestión de inventarios, contratación de fletes y asignación de rutas.

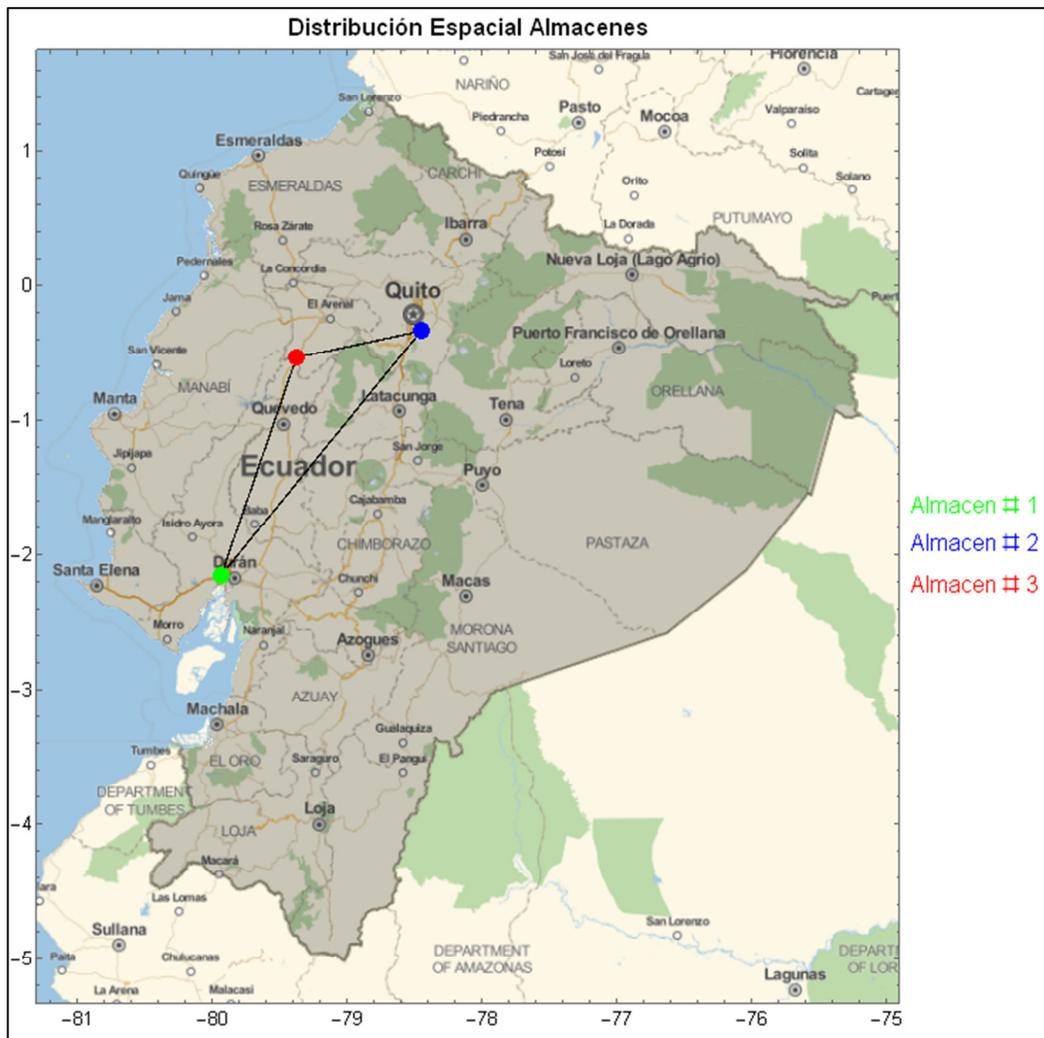


Figura 14. Distribución espacial de Almacenes

Es necesario resaltar que cada zona mantiene independencia en cuanto a la gestión de transporte, considerando como pilar fundamental el cumplimiento de

las entregas a cada uno de los clientes, según la gestión previa del Departamento de Ventas, de tal manera se alcance el nivel de servicio esperado por la organización al menor costo posible.

Puntos de entrega: en la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se mostró un breve resumen de los puntos de entrega que forman parte del proceso de distribución de la organización; los cuales en total suman 220 clientes en el territorio ecuatoriano, de igual manera como se ha descrito en los apartados anteriores, estos están divididos en tres zonas conforme su cercanía a un determinado depósito.

Es necesario acotar que la organización mantiene tres categorías de clientes como ocurre en la mayoría de las empresas del sector: *Distribuidores (DZO)*, *Mayoristas (MAY)* y *Autoservicios (AUT)*; siendo que para el primer grupo se consideran distintas condiciones en la negociación, como son: (1) no se fija un volumen determinado de compras por lo que se entiende que será inferior a las demás categorías, (2) mayor precio por unidad, (3) máximo un día de crédito y (4) el cliente debe retirar su pedido en el depósito/almacén en un horario establecido lo que implica \$0.00 por costo de distribución para la empresa, es decir que, este tipo de clientes no forman parte de la problemática que se aborda en el presente desarrollo, sino únicamente los mayoristas y autoservicios.

Cada cliente previo al inicio de las relaciones comerciales, fue calificado y categorizado por la organización, de tal forma que se asegure un importante y constante volumen de ventas, sin mayor fluctuación; que entre otros beneficios para la compañía y particularmente con enfoque en los *MAY* y *AUT*, le permita realizar una mejor planificación de la flota a contratar en un período determinado. Así mismo, estos clientes reciben precios preferenciales (descuentos por volumen) y extensión en los plazos de pagos (más días de crédito).

Todos los clientes, posterior a la categorización son parametrizados en relación a su cupo de crédito y la demanda semanal esperada (preparación del PVO) de

acuerdo al detalle mostrado a continuación en la Tabla 15, en donde también es de notar que la organización acuerda con los clientes *MAY* y *AUT* la comercialización de todos los productos de su portafolio (leches y derivados), de tal manera exista una correcta rotación de inventario en todas sus bodegas y un impulso constante a su marca.

Cliente	Producto	Demanda Semanal Esperada [Litros]	Días Crédito
MAY	Leches	220,000	15 días
	Derivados	85,000	30 días
AUT	Leches	350,000	30 días
	Derivados	140,000	45 días

Tabla 15. Demanda Semanal

Es necesario notar que la frecuencia en las entregas para cada cliente durante la semana (lunes – sábado) guarda un determinado patrón, en relación a su nivel de ventas y rotación de inventario; por lo general, se establece una frecuencia de tres pedidos por semana por cada cliente y en intervalos de un día, es decir, ciertos clientes son atendidos en horario de lunes, miércoles y viernes, y otros tantos en horario de martes, jueves y sábado, existiendo siempre la posibilidad de atender eventos puntuales (pedidos fuera de horario) considerando que exista la disponibilidad de vehículos para este propósito.

Cobertura del transporte contratado: en relación al transporte, al momento se mantienen contratos con varios operadores logísticos con los que la organización establece ciertos parámetros en relación al servicio recibido como son: confiabilidad y rapidez en las entregas, flexibilidad en las rutas y costos por fletes definidos según la localidad asignada.

En relación a la confiabilidad en la entrega, la organización espera que el pedido llegue a su destino en las condiciones apropiadas, de acuerdo a lo establecido en la ficha técnica de cada producto, donde se tiene especial cuidado en la temperatura de los productos que deben mantenerse en refrigeración de tal manera se eviten reclamos y devoluciones posteriores de los clientes.

En relación a la rapidez en la entrega, la organización espera que cada pedido llegue a su destino en el horario asignado para cada cliente (cronograma de ruta), previo a esto se calculan los tiempos de viaje de acuerdo a la matriz de datos de los clientes (ubicación geográfica) y el tiempo de servicio el cual es proporcional al tamaño de su pedido.

En relación a la flexibilidad de la ruta, no existen preferencias en cuanto a las asignaciones diarias, considerando que un vehículo puede visitar a cualquier cliente sin restricción alguna.

Tamaño de la flota: en la actualidad se cuenta con un número adecuado de vehículos de capacidades heterogéneas para la realización del 100% del proceso de distribución según los parámetros esperados por la organización. A continuación, en la Tabla 16 se presenta el tamaño de la flota contratada correspondiente a cada uno de los centros de operaciones y la capacidad máxima de carga por día.

Centro Operaciones	No. Vehículos	Cap. Carga [Ton/día]
Zona # 1	20	128.00
Zona # 2	18	109.00
Zona # 3	18	104.50
Totales	56	341.50

Tabla 16. Tamaño de la flota contratada

Alcance funcional de la solución del modelo: posterior al levantamiento de información y la implementación del modelo en una herramienta informática robusta, los resultados esperados van orientados en encontrar una mejor programación diaria de las rutas por cada zona, con enfoque en un menor número de fletes (flota de menor tamaño) asignados y/o una menor distancia total recorrida por cada vehículo, con tiempos de ruta equilibrados y razonables por cada ruta, evitando recorridos innecesarios y la subutilización de la flota contratada; enmarcado en los parámetros de costos y nivel de servicio previamente establecidos, de tal manera que al momento de validar el modelo vigente en relación al modelo de optimización propuesto se cumpla con la premisa de obtener un ahorro importante para la organización.

En la Tabla 17 se presentan en promedio varios datos referenciales de las rutas actuales programadas en cada zona, como son: peso de la carga transportada, total de rutas programadas, número de rutas con tiempo de duración mayor a 12 horas y número de rutas con tiempo de duración menor a 8 horas. Estas mediciones evidencian preliminarmente que en ciertos días las horas de trabajo por vehículo están por encima de lo establecido en las leyes laborales vigentes (máximo 12 horas), así mismo, en otros casos no se completa la jornada laboral.

		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Semana
Zona #1	Peso [Ton.]	65	71	65.2	70.8	65.5	71.2	408.7
	Rutas Contratadas	17	15	18	14	17	15	96
	Rutas t > 12 h.	6	7	5	7	8	9	42
	Rutas t > 12 h. [%]	35.29%	46.67%	27.78%	50.00%	47.06%	60.00%	44.47%
	Rutas t < 8 h.	4	3	2	2	2	3	16
	Rutas t < 8 h. [%]	28.53%	20.00%	11.11%	14.29%	11.76%	20.00%	16.78%
Zona #2	Peso [Ton.]	46	45	46.8	44.7	46.5	45.4	274.4
	Rutas Contratadas	14	11	13	11	14	12	75
	Rutas t > 12 h.	5	4	4	6	7	8	34
	Rutas t > 12 h. [%]	35.71%	36.36%	30.77%	54.55%	50.00%	66.67%	45.68%
	Rutas t < 8 h.	2	2	2	2	1	3	12
	Rutas t < 8 h. [%]	14.29%	18.18%	15.38%	18.18%	7.14%	25.00%	16.36%
Zona #3	Peso [Ton.]	47	49	46.9	48	47.5	49.7	288.1
	Rutas Contratadas	11	12	12	11	11	12	67
	Rutas t > 12 h.	6	4	3	5	6	7	31
	Rutas t > 12 h. [%]	54.55%	33.33%	25.00%	45.45%	54.55%	58.33%	45.20%
	Rutas t < 8 h.	1	1	1	2	3	1	9
	Rutas t < 8 h. [%]	9.09%	8.33%	8.33%	18.18%	27.27%	8.33%	13.26%

Tabla 17. Parámetros generales de la asignación diaria de rutas

3.1.2 Estructura logística

Las operaciones logísticas se gestionan independientemente desde cada centro de operaciones por su Departamento de Transporte, según fue abordado ampliamente en el apartado anterior 3.1.1; el cual es parte importante de la cadena de suministro de la organización y posee estructuras similares para cada una de las zonas. A decir de esto, cada departamento cuenta con un Jefe de área y el personal operativo necesario para la ejecución de las tareas diarias.

El proceso de distribución es netamente responsabilidad del departamento, teniendo funciones propias debidamente documentadas en los manuales, así como en las políticas internas de la organización, y con la jerarquía que le permite a cada centro de costos tomar las decisiones estratégicas de mayor conveniencia en función de alcanzar los objetivos propuestos.

Cabe recalcar que la función de asignación de rutas (*ruteo*) actualmente no está considerada como una función de relevancia dentro del proceso de distribución y más bien resulta de un análisis diario y hasta cierto punto empírico, en función de la cercanía sobre un determinado grupo clientes.

A continuación, en la Figura 15 se muestra como está conformada la estructura logística (*Cadena de Abastecimiento*) el cual evidencia similitud en cada zona, por lo que se interpreta que la operación no tiene mayores variaciones, sin embargo, dentro de los resultados de la presente investigación podría notarse que este tipo de modelo de gestión no necesariamente es el más eficiente.

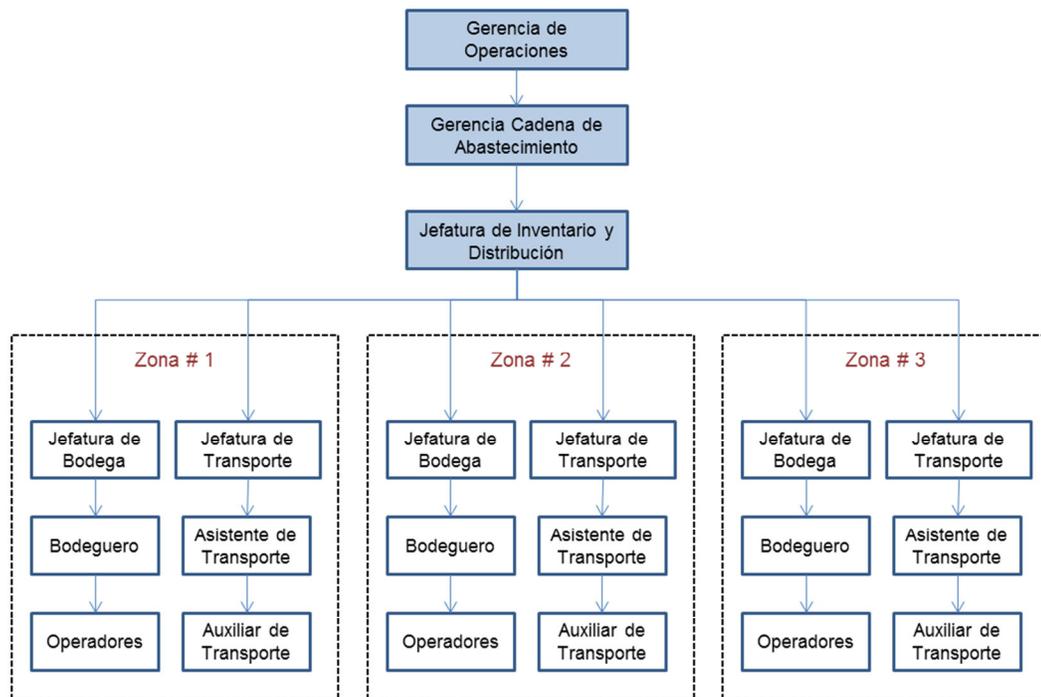


Figura 15. Organigrama de CDA de la organización

3.1.3 Segmentación del proceso de distribución

En esta parte de la investigación se identifican los eslabones que contribuyen al proceso de distribución, como parte fundamental de la *Cadena de Abastecimiento*; considerando la gestión de bodegas e inventario, así como los proveedores de servicio de transporte de carga.

La gestión de bodega es operativamente el punto de partida para el proceso de distribución y comprende primordialmente llevar a cabo todos los procesos internos que permitan la preparación de los pedidos para cada uno de los clientes. Tal como se muestra en la Figura 16; las actividades principales realizadas diariamente en la operación son: (1) alistamiento o Picking, (2) consolidación de los pedidos según la ruta asignada – uno o varios clientes por vehículo – y ubicación temporal en los muelles de carga, y (3) carga y sellado del vehículo. La gestión de inventario es un complemento necesario que procura dar el soporte necesario para mantener niveles adecuados de stock en

cada uno de los SKU, de tal manera que el proceso de Picking sea completado en su totalidad.

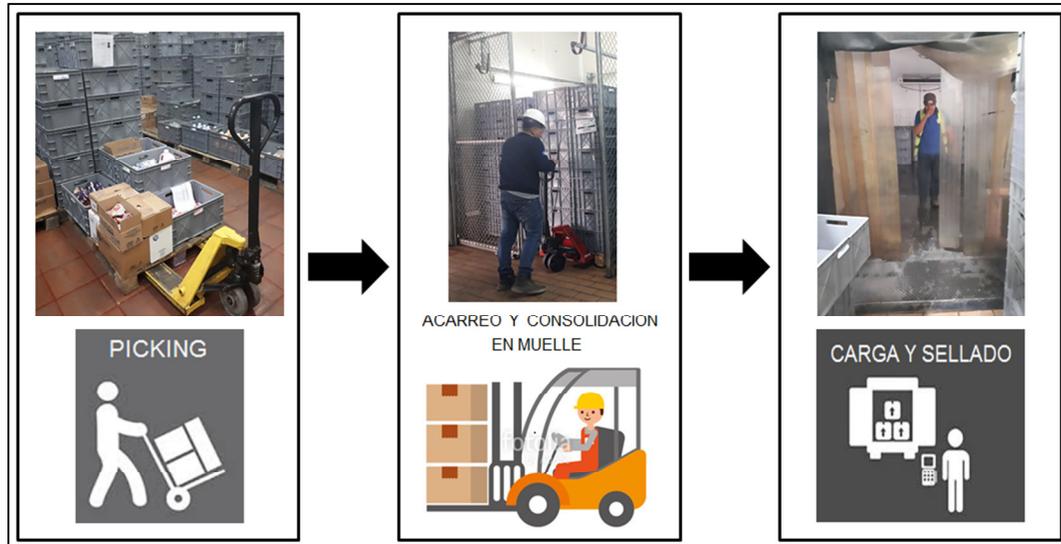


Figura 16. Etapas de la gestión de pedidos

En relación a los proveedores, un aspecto a considerar es la revisión periódica de cada vehículo contratado, actividad realizada en cada centro de operaciones en relación a su documentación y los permisos de circulación necesarios para operar en los distintos cantones, así como las condiciones mecánicas básicas y estructurales del furgón que garanticen posteriormente la operación y permitan conservar la calidad del producto durante el trayecto (almacén – clientes). Así mismo, la actividad operativa principal que realizan diariamente los transportistas asignados a una determinada ruta es el shipping de la carga en cuanto a cantidades, condiciones del producto y transporte hacia el destino acordado, dado que, normalmente una ruta contiene a varios clientes.

Finalmente, en la Figura 17 se muestra las etapas del proceso de distribución, el cual evidentemente empieza con la preparación del pedido en bodega y termina en la etapa de entrega.

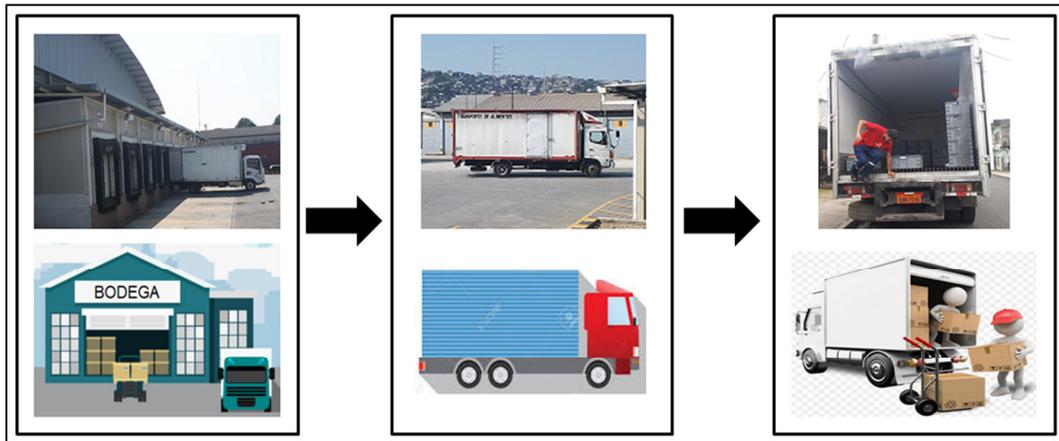


Figura 17. Etapas del proceso de distribución

A continuación, en el apartado 3.2 se realiza un análisis exhaustivo de la situación actual que enmarca la problemática existente en el proceso de distribución, previo a la resolución del modelo propuesto.

3.2 Diagnóstico de la situación actual

El presente apartado se orienta a describir la forma en que interactúan todas las variables que determinan el comportamiento de este eslabón de la cadena de abastecimiento dentro de la organización, haciendo énfasis en ciertos factores considerados como críticos del proceso, tales como: ubicación geográfica, horario de entrega, tiempo de servicio, peso total de la carga, capacidad de la flota, duración del tour, entre otros. A continuación, en la Figura 18 se representa gráficamente las variables que condicionan el proceso de asignación de rutas, en donde es de notar también que existen elementos no deliberantes a decir de aquellos que no tienen peso en la toma de decisiones, como es el caso de: (1) tipo de cliente, dado que una ruta puede indistintamente incluir clientes *MAY* y *AUT*, y (2) tipo de carga, en vista de que la flota contratada posee en su totalidad furgones térmicos para carga refrigerada del tal manera que se conserve el producto a bajas temperaturas de ser necesario.

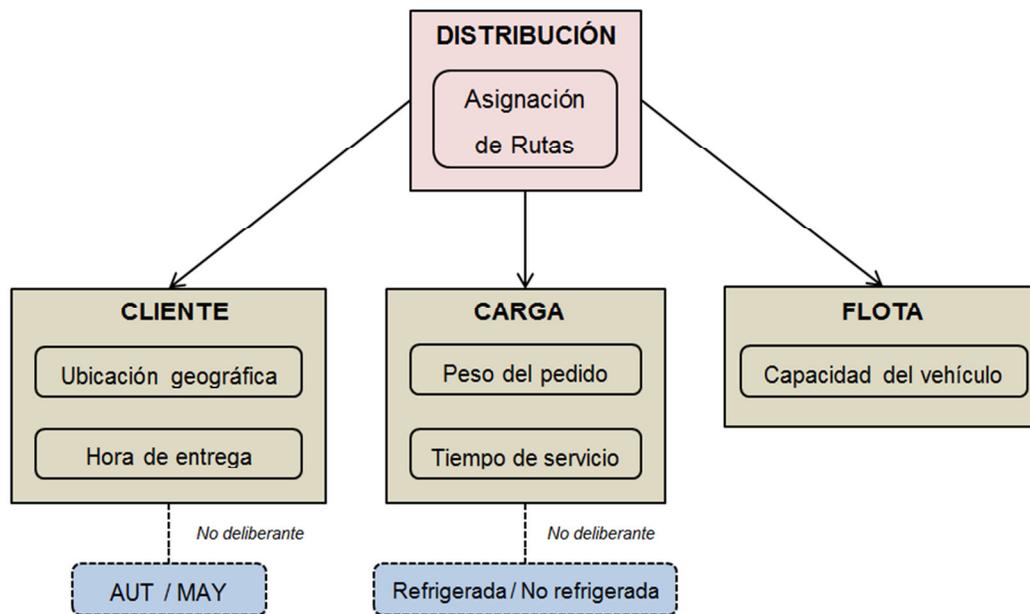


Figura 18. Variables deliberantes en la asignación de rutas

3.2.1 Factores críticos del proceso de distribución

En la presente sección, se realiza un análisis descriptivo de las variables más importantes que delimitan el desempeño del proceso.

Ubicación geográfica: cada cliente (I_i) tiene registrada una única posición geográfica ($GeoPosition[\{latitud, longitud\}]$) en donde se realizan las entregas acordadas, esto permite asociar preliminarmente a ciertos grupos de clientes de ubicaciones cercanas a una determinada ruta. Este proceso tiene su funcionalidad dado que empieza con la (1) *pre-asignación de rutas* sobre el cual se coordina con los operadores logísticos contratados la necesidad de fletes para las entregas del día, quedando posteriormente un proceso de (2) *ajuste* para asignar nuevos clientes a las rutas pre-asignadas siempre que exista disponibilidad de espacio o capacidad de carga (q_v) en el vehículo seleccionado, caso contrario se asignan nuevas rutas hasta completar las entregas dado que todos los clientes deben ser visitados obligatoriamente.

Horario de entrega: indistintamente de la zona, cada cliente tiene asignado un horario el cual es previamente acordado en base a su disponibilidad de tiempo,

su demanda diaria (w_i) y frecuencia de compras por semana, el cual en primera instancia se usa para la planificación diaria de las rutas, considerando también que en promedio se tiene un amplio intervalo de tiempo en horas ($b_i - a_i \geq 5$) entre el inicio (a_i) y el fin del servicio (b_i) en cada nodo i ; existiendo también la alternativa para ciertos casos en donde las ventanas de tiempo se superponen, se pueda manejar esta restricción como blanda (*soft*) dentro del contexto del problema VRP, en virtud de que puede ser levemente modificada ($\Delta a_i \leq 1, \Delta b_i \leq 1$) según la necesidad de la ruta.

Tiempo de servicio: este parámetro es el tiempo consumido por un determinado vehículo (st_i^v) mientras se realiza el proceso de descarga del pedido del cliente (I_i), el cual tiene relación directa con la demanda del cliente (w_i) y debe ser considerado al momento de la asignación diaria de rutas. El tiempo de servicio se parametriza entre 45 minutos y 2:30 horas ($0.75 \leq st_i^v \leq 2.5$) por cliente (I_i) visitado, adicional se considera por regla un tiempo de espera máximo permitido entre nodos de 30 minutos ($\Delta = 0.5$) sobre cualquier eventualidad que pudiese presentarse; de no respetarse los tiempos calculados, el vehículo no realiza la entrega – afectando el nivel de servicio – y continúa la ruta con destino al siguiente cliente.

Peso total de la carga: como primer punto se establece que cada ruta asignada (flete contratado) debe estar debidamente justificada, a partir de esto se tienen ciertos lineamientos que son motivo de revisión constante en relación al (%) real aprovechamiento de la flota; dado que por política interna del departamento, el peso total de la carga debe ser mayor al 70% de la capacidad (q_v) del vehículo asignado y sin que supere su capacidad máxima. Bajo este parámetro, se agrupan varios clientes cercanos – generalmente los mismos – y se asigna un vehículo para transportar la carga – generalmente el mismo vehículo para la misma ruta –, dado este procedimiento se entiende de forma preliminar que no necesariamente se puede cumplir con lo estipulado.

Capacidad de la flota: los vehículos contratados para el cumplimiento de las rutas son contactados y una vez confirmada su disponibilidad para la próxima asignación – debe cargar el mismo día y entregar al día siguiente – son

puestos en estatus de *libre*, de tal forma se puede realizar la planificación de las rutas en base a todos los vehículos disponibles. Esto es necesario dado que el índice de operatividad de la flota no es igual a 1, básicamente debido a los mantenimientos que deben realizarse. En general, se sabe preliminarmente que para el presente caso de estudio, el tamaño de la flota permite cumplir con holgura las entregas diarias, sin embargo, esto no implica una óptima asignación de este recurso, y por el contrario se analizará en posteriores apartados si con un menor número de fletes contratados se puede cumplir con la demanda diaria (w_i) de los clientes.

Duración del tour: en virtud de los reglamentos vigentes en temas laborales, se establece como política interna de la organización de estricto cumplimiento una jornada de trabajo en general de máximo 12 horas por día, el cual es extensivo para el personal operativo asignado al proceso de distribución (inclusive empresas sub-contratadas), de tal manera que para todos los vehículos se parametriza un tiempo máximo de trabajo de 12 horas diarias ($TV_v^{max} = 12$), en consecuencia, el tiempo de duración de cada ruta (TV_v) no puede ser mayor al tiempo máximo de trabajo establecido ($TV_v \leq TV_v^{max}$).

Se considera también que el tiempo de inicio de servicio de cada clúster ($aC_{k=1}, aC_{k=2}, aC_{k=3}$) es a las 6 am., y se define como tiempo de inicio de duración del tour la hora de salida del depósito de cada vehículo de manera independiente y posterior al proceso de carga; así mismo, la duración del tour se extiende hasta la hora de ingreso de cada vehículo al depósito origen ($P_{i=1}, P_{i=2}, P_{i=3}$) luego de haber completado todas sus entregas, el cual no puede ser posterior al tiempo de fin de servicio de cada clúster ($bC_{k=1}, bC_{k=2}, bC_{k=3}$) a las 2 am. del día siguiente.

3.2.2 Problemas detectados en el proceso de distribución

Para este análisis se realiza una investigación sobre el proceso de distribución desde la perspectiva de las operaciones diarias desde cada uno de los tres depósitos o centros de distribución hacia sus clientes relacionados, es así que los principales problemas identificados se detallan a continuación:

1. Demora en el ruteo diario.- La planificación diaria de las rutas de distribución tiende a ser extenso en cuanto a la gestión administrativa; el proceso de asignación (*ruteo*) se prolonga casi hasta el final de la jornada de trabajo incluso llegando a retrasar las operaciones de otras áreas, dado que todas las actividades deben cumplirse de acuerdo al horario establecido según se muestra en la Tabla 18. En consecuencia, la asignación de rutas debe completarse en su totalidad para que posteriormente bodega pueda preparar todos los pedidos, a la vez que en los muelles disponibles se consolida la carga de uno o varios clientes en los vehículos previamente asignados para la realización de las rutas al día siguiente, considerando también que la operación relacionada con la carga requiere de un tiempo mínimo de 45 minutos por vehículo de acuerdo a lo estimado por la administración de cada centro de distribución (CD). Así mismo, los muelles deben ser desocupados a tiempo para que puedan ser utilizados para la carga de todos los vehículos.

DIAS DE PEDIDO Y ENTREGA					
CLIENTES	PROCESOS	TIEMPO ACUM	LU-MI-VI	MA-JU-SA	ÁREA
PEDIDOS LOCALES: DISTRIBUIDORES (DZO)	Generación de pedidos	-	15:30	15:30	Ventas
	Liberación de pedidos cartera	0H15	15:45	15:45	Facturación
	Proceso alistamiento	0H30	16:00	16:00	Bodega
	Confirmación de pedidos	0H45	16:15	16:15	Bodega
	Recepción de gavetas vacías	0H50	16:20	16:20	Bodega
	Impresión de shipping	1H00	16:30	16:30	Bodega
	Picking	1H05	16:35	16:35	Bodega
	Generación de facturas	1H10	16:40	16:40	Facturación
	Revisión de carga	1H30	17:00	17:00	Bodega
	Carga del producto	1H40	17:10	17:10	Clientes
PEDIDOS FORANEOS: MAYORISTAS (MAY)	Generación de pedidos	-	17:00	17:00	Ventas
	Liberación de pedidos cartera	0H15	17:15	17:15	Facturación
	Proceso alistamiento	0H30	17:30	17:30	Bodega
	Revisión de picking	0H45	17:45	17:45	Bodega
	Confirmación de picking	1H00	18:00	18:00	Bodega

	Coordinación de rutas	3H00	20:00	20:00	Transporte
	Asignación de rutas	4H00	21:00	21:00	Transporte
	Generación de facturas	4H30	21:30	21:30	Facturación
	Picking y consolidación muelle	5H00	22:00	22:00	Bodega
	Generación guías de remisión	5H30	22:30	22:30	Bodega
	Revisión de carga	5H30	22:30	22:30	Bodega
	Despachos	6H00	23:00	23:00	Bodega
PEDIDOS LOCALES Y FORANEOS: AUTOSERVICIOS (AUT)	Generación de pedidos	-	17:30	17:30	Ventas
	Confirmación de picking	0H30	18:00	18:00	Bodega
	Coordinación de rutas	2H30	20:00	20:00	Transporte
	Asignación de rutas	3H30	21:00	21:00	Transporte
	Generación de facturas	4H00	21:30	21:30	Facturación
	Picking y consolidación muelle	4H30	22:00	22:00	Bodega
	Generación guías de remisión	5H00	22:30	22:30	Bodega
	Revisión de carga	5H00	22:30	22:30	Bodega
	Despachos	5H30	23:00	23:00	Bodega

Tabla 18. Tiempos acumulados de procesos por día

2. Programación ineficiente de las entregas.- Los resultados obtenidos en la operación diaria reflejan que algunos parámetros de medición tienen un comportamiento diferente a lo esperado. Los tiempos totales de ciertas rutas se completan en tiempos extensos superiores a 12 horas de trabajo, así como en otros casos los tiempos no superan las 8 horas, la variación en los tiempos totales de viaje ($TV_v = T_i + st_i^v + t_{ij}^v$) generan por un lado una sobrecarga de trabajo para ciertos vehículos y por otro lado una falta de aprovechamiento de la flota, generando la percepción de que los tiempos pudiesen equilibrarse en beneficio de los intereses de la organización.

Eventualmente, los tiempos de servicio reales son superiores a los calculados de acuerdo al tamaño del pedido, esto como efecto de los altos tiempos de espera que suelen presentarse al momento de la llegada de los vehículos a los puntos de entrega.

Todo lo nombrado previamente se traduce en un considerable número de retornos (pedidos completos) en la operación de ciertos días, dado que los horarios de entrega planificados no son concordantes con las ventanas de tiempos de ciertos clientes, y estos no pueden recibir el pedido en sus establecimientos, finalmente, el vehículo debe regresar con la carga al depósito origen y se genera la respectiva nota de crédito a favor del cliente con motivo atribuible a la gestión del transporte.

En la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se muestra de forma gráfica la cantidad de retornos durante los últimos 12 meses (agosto 2017 – julio 2018) en cada zona; cuyos promedios anuales corresponden al 8%, 7% y 5% en cada clúster respectivamente.

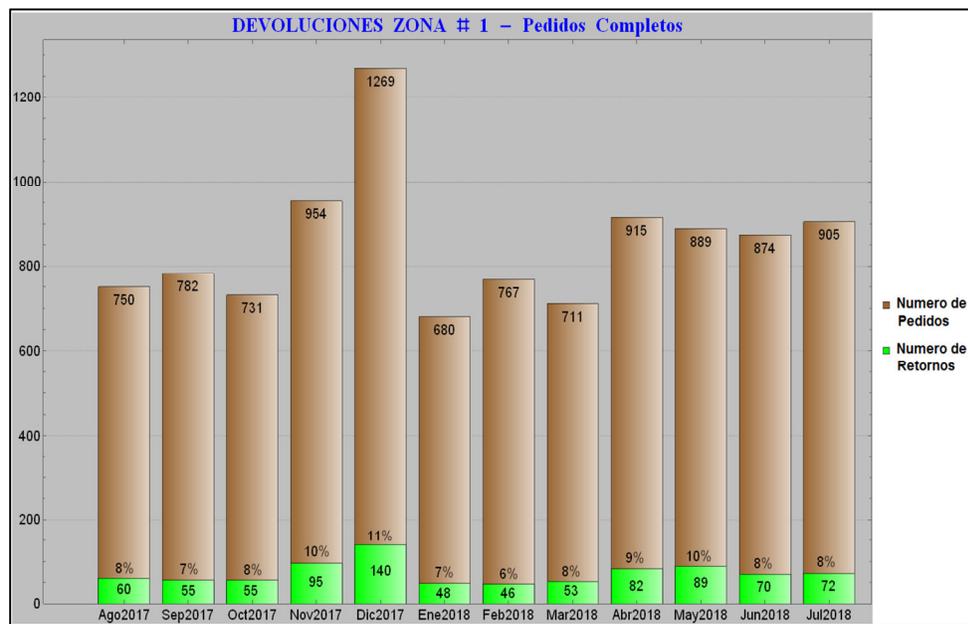


Figura 19. Pedidos devueltos Clúster # 1

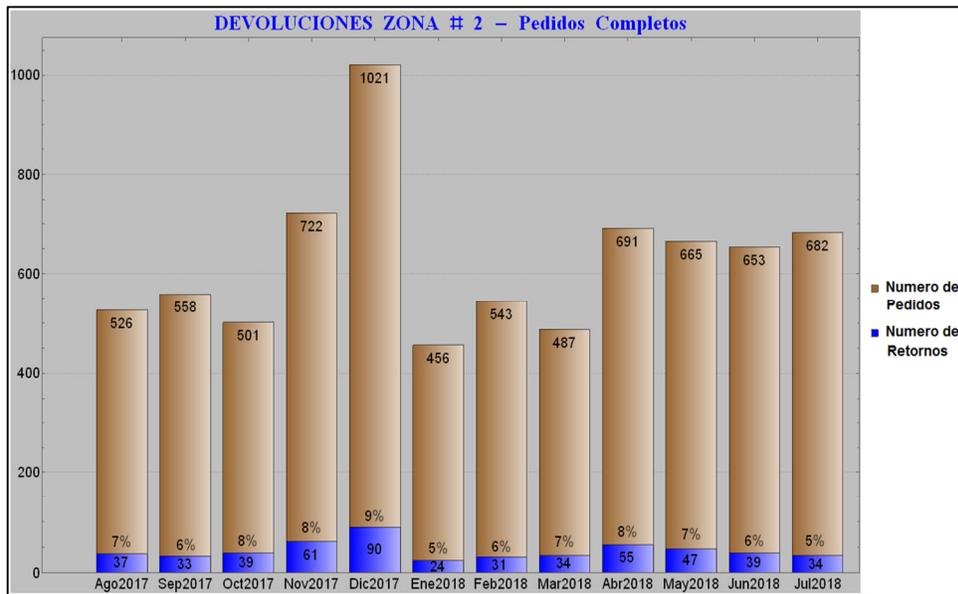


Figura 20. Pedidos devueltos Clúster # 2

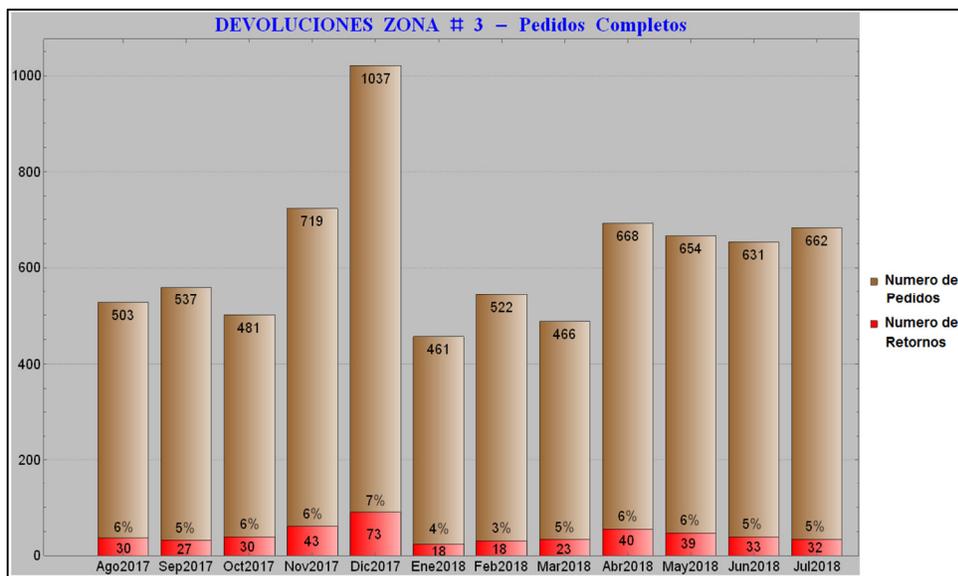


Figura 21. Pedidos devueltos Clúster # 3

En resumen, los retornos ocasionan una disminución en el nivel de servicio relacionado con las entregas efectivas de los pedidos a los clientes, indicador que es medido y espera ser mejorado dado que tiene relación directa con el cumplimiento del presupuesto de ventas, la

presencia de la marca en un mercado altamente competitivo y el nivel de utilización de la flota contratada.

3. Sub-utilización de la flota.- En parte surge como consecuencia del problema anterior, así como por la falta de conocimientos apropiados para lograr una mejor eficiencia y productividad. El indicador de desempeño que mide el nivel de aprovechamiento de la flota demuestra que para todas las zonas y en varios tipos de vehículos, su real utilización está por debajo de lo esperado (<70%) según los resultados del primer semestre del año 2018 presentados en la Tabla 19. En consecuencia, el costo de distribución actual corresponde a 0.0376 \$/litro, debiendo ser mejorado en un esfuerzo orientado a la contratación de una menor cantidad de fletes (menor costo fijo), en vehículos de mayor capacidad (economías de escala) para cubrir la misma demanda diaria, en la medida en que se pueda coordinar de manera conveniente las ventanas de tiempo de ciertos clientes, siempre que sea factible desde el punto de vista operativo.

Mes	Tipo Vehículo	Clúster		
		Zona # 1	Zona # 2	Zona # 3
ene-18	T04	72.80%	69.36%	67.56%
	T06	48.74%	71.69%	64.15%
	T08	64.48%	73.84%	69.56%
	T10	68.58%	58.56%	68.24%
	T12	61.89%	76.30%	64.46%
	Promedio	63.30%	69.95%	66.79%
feb-18	T04	77.34%	51.36%	71.26%
	T06	64.85%	69.74%	53.69%
	T08	66.65%	64.19%	64.52%
	T10	47.15%	69.29%	67.51%
	T12	64.36%	66.49%	72.36%
	Promedio	64.07%	64.21%	65.87%
mar-18	T04	69.36%	70.74%	67.26%
	T06	51.56%	66.29%	64.29%
	T08	62.39%	53.69%	70.69%
	T10	49.66%	56.25%	59.26%
	T12	69.36%	74.57%	40.23%
	Promedio	60.47%	64.31%	60.35%

abr-18	T04	66.36%	64.45%	66.39%
	T06	64.36%	66.26%	64.94%
	T08	77.49%	47.36%	70.65%
	T10	55.36%	66.00%	69.66%
	T12	61.89%	69.36%	53.69%
	Promedio	65.09%	62.69%	65.07%
may-18	T04	56.33%	69.26%	52.37%
	T06	69.73%	47.63%	70.69%
	T08	59.48%	76.11%	69.26%
	T10	68.25%	63.26%	69.95%
	T12	61.89%	58.26%	71.86%
	Promedio	63.14%	62.90%	66.83%
jun-18	T04	52.80%	67.37%	70.63%
	T06	62.34%	64.26%	71.26%
	T08	64.48%	59.56%	70.49%
	T10	73.56%	54.26%	72.69%
	T12	68.99%	78.21%	50.12%
	Promedio	64.43%	64.73%	67.04%
jul-18	T04	74.90%	48.26%	69.36%
	T06	63.45%	69.26%	61.05%
	T08	61.89%	63.25%	69.25%
	T10	71.79%	77.36%	73.26%
	T12	53.65%	73.26%	41.26%
	Promedio	65.14%	66.28%	62.84%
Promedio Semestral Zona		63.66%	65.01%	64.97%
Promedio General		64.55%		

Tabla 19. Indicador del nivel de aprovechamiento de la flota

3.2.3 Causa origen de los problemas encontrados

1. La causa raíz del problema de **demora en el ruteo diario** tiene relación directa con la nula implementación de una metodología apropiada para abordar y solucionar los problemas cotidianos del transporte. De principio, la falta de conocimientos sobre nuevos procedimientos desarrollados en el ámbito de la optimización y el manejo de múltiples herramientas que cuente con interfaz gráfica y demás recursos tecnológicos adecuados que analicen matemáticamente las diferentes alternativas y permitan lograr una programación eficiente de las entregas, de tal forma que las rutas sean asignadas en el tiempo

adecuado, es decir, que se respeten los horarios establecidos por cada centro de distribución, con el propósito de evitar retrasos en la operación diaria, considerando también la existencia de múltiples escenarios dados por el comportamiento normal de la industria. Así mismo, el efecto secundario que podría lograrse en un largo plazo y en beneficio de la empresa sería la disminución de la jornada laboral, como consecuencia del ajuste en los tiempos de servicios de los depósitos.

2. El segundo problema relacionado con la **programación ineficiente de las entregas** que se planteó de manera general, se da básicamente por una inadecuada gestión de los tiempos; no contar con información suficiente de las ventanas de tiempos de los clientes o una constante actualización de los mismos ocasiona que la programación actual probablemente se realice con información irreal, en consecuencia, se genera una descordinación en los tiempos de servicio y aumento en los tiempos de espera del transportista. Como se ha dicho previamente, esto ocasiona que ciertos clientes no puedan recibir la carga dado que como es lógico deben atender a sus demás proveedores.

3. El problema de la **sub-utilización de la flota** se origina debido a que el método utilizado actualmente para la programación de las entregas carece de una métrica apropiada, es decir, las rutas se planifican siempre en base al mismo esquema (clientes – vehículos). En la práctica, este método de asignación no permite crear rutas en función de los tiempos, pesos y capacidades; sino que, por simplicidad se crean rutas que priorizan únicamente el concepto de efectividad (cumplimiento). Esto implica que en ciertos días se asignen rutas con un nivel de aprovechamiento menor al esperado (<70%) y en otros días cuando las demandas de los clientes superan (>100%) la capacidad del vehículo, los pedidos se particionan para ser entregados en dos fletes (menor eficiencia); esto resulta en que no se logren los objetivos propuestos en relación al nivel de productividad esperado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El modelo matemático planteado en el apartado 2.3 fue implementado en Wolfram Mathematica versión 11.1.1 y los resultados computacionales fueron obtenidos a partir de la corrida del algoritmo con los datos de entrada detallados en la Tabla 20, en un tiempo de ejecución razonable:

	Clientes	Clúster
Datos de entrada	<ul style="list-style-type: none">• ID nodo• Coordenada geográfica• Volumen de pedido• Ventana de tiempo• Tiempo de servicio	<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de la flota en cada clúster

Tabla 20. Indices del modelo

La data de los clientes y los clústeres le permite al programa realizar todos los cálculos necesarios conforme a la estructura desarrollada en el algoritmo, el cual se alinea al método de solución planteado y de acuerdo a las restricciones contenidas en el modelo matemático.

A continuación, en la Figura 22 para el cálculo de las rutas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra como ejemplo la matriz de clientes con determinada frecuencia de entrega (días establecidos por semana) y su respectiva demanda promedio, en donde en primera instancia es necesario que la información sea depurada diariamente (eliminar clientes sin pedido / agregar clientes de otra frecuencia con pedido) como paso previo a la generación de los datos de entrada del problema.

Matriz Frecuencia 1:		Lunes - Miércoles - Viernes			AGREGAR		ELIMINAR	
ID Nodo	Frecuencia Entrega	Zona	Latitud	Longitud	Demanda	Inicio Ventana	Fin Ventana	Tiempo Servicio
Almacén 01	-	Guayaquil	-2.155505	-79.9330	0.00	0.00	0.00	0.00
Almacén 02	-	Sangolqui	-0.339620	-78.4520	0.00	0.00	0.00	0.00
Almacén 03	-	Patricia Pilar	-0.537540	-79.3753	0.00	0.00	0.00	0.00
Cliente 01	Lu-Mi-Vi	Babahoyo	-1.802400	-79.5268	525.00	2.00	7.00	0.58
Cliente 03	Lu-Mi-Vi	Babahoyo	-1.803761	-79.5397	806.00	3.00	10.00	0.58
Cliente 05	Lu-Mi-Vi	Ballenita	-2.211320	-80.8683	978.00	8.00	13.00	0.58
Cliente 07	Lu-Mi-Vi	Colimes	-1.545859	-80.0096	482.00	3.00	10.00	0.58
Cliente 09	Lu-Mi-Vi	Daule	-1.864171	-79.9795	0.00	2.00	7.00	0.00
Cliente 11	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.172386	-79.8288	1960.00	4.00	11.00	1.00
Cliente 12	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.172386	-79.8288	1617.00	5.00	13.00	1.00
Cliente 13	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.161738	-79.8416	1420.00	2.00	7.00	1.00
Cliente 15	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.191070	-79.8147	1430.00	5.00	12.00	1.00
Cliente 16	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.169158	-79.8414	1247.00	8.00	13.00	1.00
Cliente 17	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.176667	-79.8264	720.00	8.00	13.00	0.58
Cliente 19	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.172386	-79.8288	1420.00	2.00	9.00	1.00
Cliente 21	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.179765	-79.8122	0.00	3.00	8.00	0.00
Cliente 23	Lu-Mi-Vi	El Guabo	-3.245739	-79.8336	1700.00	5.00	12.00	1.00
Cliente 25	Lu-Mi-Vi	Gral. Villamil	-2.643106	-80.3845	376.00	8.00	13.00	0.58
...								
Matriz Frecuencia 2:		Martes - Jueves - Sabado			AGREGAR		ELIMINAR	
ID Nodo	Frecuencia Entrega	Zona	Latitud	Longitud	Demanda	Inicio Ventana	Fin Ventana	Tiempo Servicio
Almacén 01	-	Guayaquil	-2.155505	-79.9330	0.00	0.00	0.00	0.00
Almacén 02	-	Sangolqui	-0.339620	-78.4520	0.00	0.00	0.00	0.00
Almacén 03	-	Patricia Pilar	-0.537540	-79.3753	0.00	0.00	0.00	0.00
Cliente 02	Ma-Ju-Sa	Babahoyo	-1.813542	-79.5449	1450.00	8.00	13.00	1.00
Cliente 04	Ma-Ju-Sa	Ballenita	-2.200777	-80.8691	1590.00	1.00	9.00	1.00
Cliente 06	Ma-Ju-Sa	Cochancay	-2.465101	-79.2738	958.00	2.00	8.00	0.58
Cliente 08	Ma-Ju-Sa	Daule	-1.855260	-79.9749	1463.00	8.00	13.00	1.00
Cliente 10	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.180990	-79.8145	956.00	3.00	9.00	0.58
Cliente 12	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.172386	-79.8288	1720.00	5.00	13.00	1.00
Cliente 14	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.166204	-79.8449	1310.00	3.00	9.00	1.00
Cliente 15	Lu-Mi-Vi	Duran	-2.191070	-79.8147	1430.00	5.00	12.00	1.00
Cliente 16	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.169158	-79.8414	1215.00	8.00	13.00	1.00
Cliente 18	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.172386	-79.8288	1460.00	1.00	7.00	1.00
Cliente 20	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.179240	-79.8140	860.00	4.00	12.00	0.58
Cliente 22	Ma-Ju-Sa	Duran	-2.167798	-79.8439	1165.00	2.00	8.00	1.00
Cliente 24	Ma-Ju-Sa	El Triunfo	-2.331147	-79.4010	0.00	6.00	11.00	0.00
Cliente 26	Ma-Ju-Sa	Gral. Villamil	-2.656344	-80.3702	1770.00	7.00	13.00	1.00
...								

Figura 22. Frecuencia de entrega

Un proceso de confirmación similar se realiza con cada una de las flotas, en donde se obtiene la disponibilidad de cada vehículo para la conformación de las rutas, tal como se aprecia a continuación en la Figura 23. Cabe indicar que mientras más variada sea la flota, se podrá lograr un mejor aprovechamiento, como consecuencia de que el algoritmo busca obtener la mejor combinación posible.

Clúster # 1			Clúster # 2			Clúster # 2		
Vehiculos	Capacidad [kg]	Disponibilidad [Día]	Vehiculos	Capacidad [kg]	Disponibilidad [Día]	Vehiculos	Capacidad [kg]	Disponibilidad [Día]
1	3,500	Si	1	3,500	Si	1	3,500	Si
2	3,500	Si	2	3,500	Si	2	3,500	Si
3	3,500	Si	3	3,500	Si	3	3,500	Si
4	3,500	Si	4	3,500	Si	4	3,500	Si
5	3,500	Si	5	4,000	Si	5	3,500	Si
6	3,500	Si	6	4,000	Si	6	4,000	Si
7	4,000	Si	7	4,000	Si	7	4,500	Si
8	4,500	No	8	5,000	Si	8	4,500	Si
9	4,500	Si	9	5,000	Si	9	4,500	Si
10	5,000	Si	10	5,000	Si	10	5,000	Si
11	7,000	Si	11	7,000	Si	11	7,000	Si
12	7,500	Si	12	7,000	Si	12	7,000	Si
13	8,000	Si	13	7,500	Si	13	7,000	Si
14	8,000	Si	14	8,000	Si	14	7,500	Si
15	8,500	Si	15	8,000	Si	15	8,500	Si
16	9,000	Si	16	8,500	Si	16	8,500	Si
17	9,000	Si	17	10,000	Si	17	9,000	Si
18	10,000	Si	18	12,000	Si	18	10,000	Si
19	10,000	Si						
20	12,000	Si						
Total Clúster	128,000		Total Clúster	109,000		Total Clúster	104,500	
Cap Máx [Día]	123,500		Cap Máx [Día]	109,000		Cap Máx [Día]	104,500	

Figura 23. Disponibilidad de la flota

Es necesario notar que el algoritmo solo va a programar las rutas para los vehículos que se encuentren operativamente disponibles y para los clientes cuyas demandas en determinado día sean mayores a cero, es decir, que se genere un pedido en el sistema.

Parámetros: una vez depurada la lista de los clientes del día y confirmada la disponibilidad de las flotas, se procede a generar los datos entrada del problema MDHVRPTW para la obtención de los resultados esperados por medio de la ejecución del algoritmo, tal como se aprecia en la Figura 24; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En esta instancia, el desarrollo permite tener mayor versatilidad en el resultado final del modelo, dado que las rutas obtenidas no dependerán de un diseño establecido o una frecuencia previamente concebida, sino más bien, de las condiciones del mercado y de la gestión diaria de transporte y ventas.

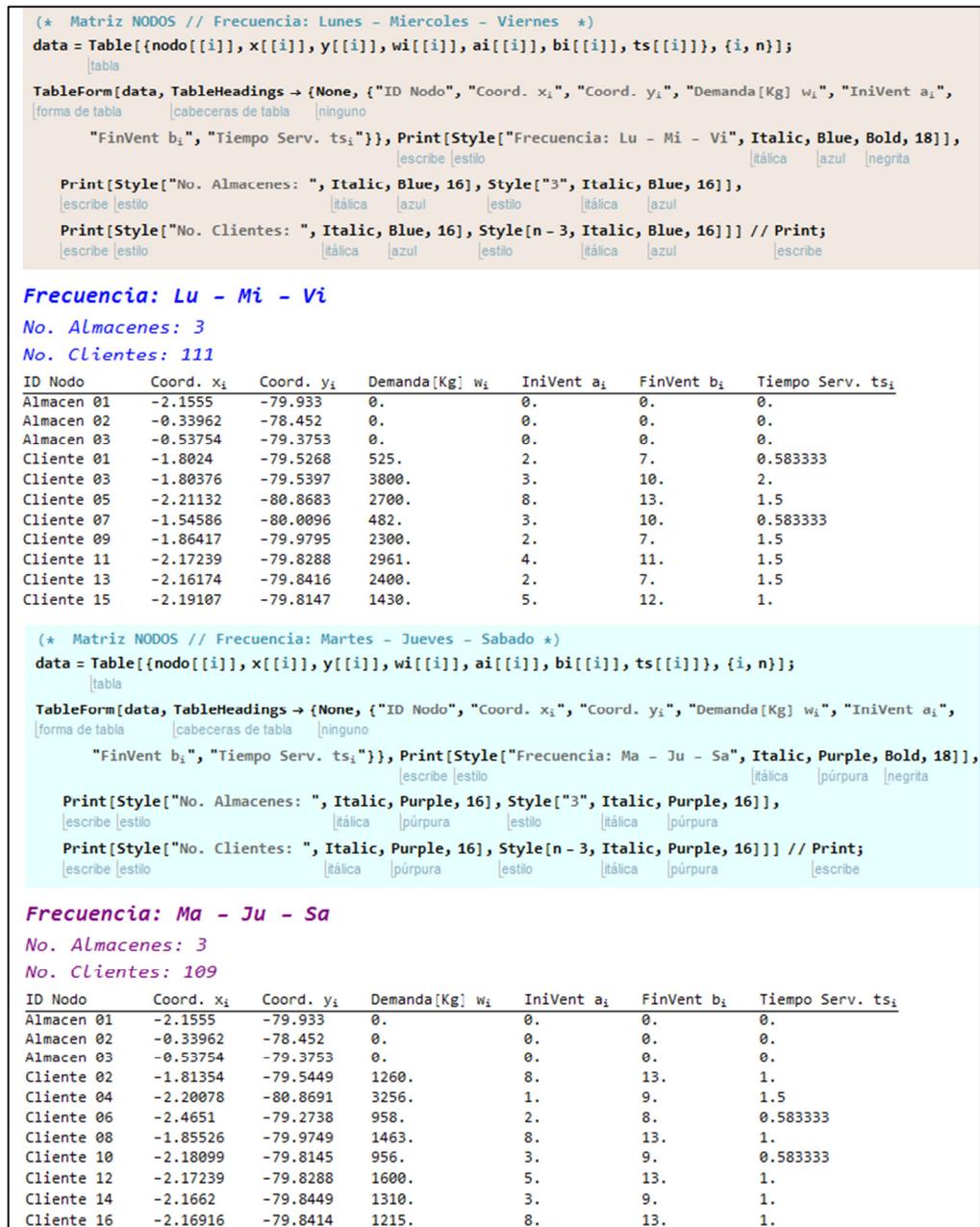


Figura 24. Parámetros de entrada

Siendo que la solución óptima del problema específico es una representación creíble del sistema real, esta mantiene una ventaja al generarse rutas con la flexibilidad necesaria, a diferencia del esquema rígido con el cual se trabaja actualmente. Esto resultaría de gran utilidad para lograr mejores resultados, por cuanto permite cierta libertad para negociar ajustes en las ventanas de tiempo de algunos clientes en pro de mejores rendimientos futuros.

4.1 Diseño óptimo de rutas para la distribución de lácteos

El diseño óptimo de las rutas de distribución comprende las salidas del modelo, el cual va a decidir según los parámetros de entrada y las restricciones dadas, la asignación y secuencia de rutas a seguir en determinado día. Para este fin, previamente se particionó la data según la frecuencia de entrega como se muestra en la Figura 25, dado que contienen distintos clientes salvo ciertas excepciones puntuales.

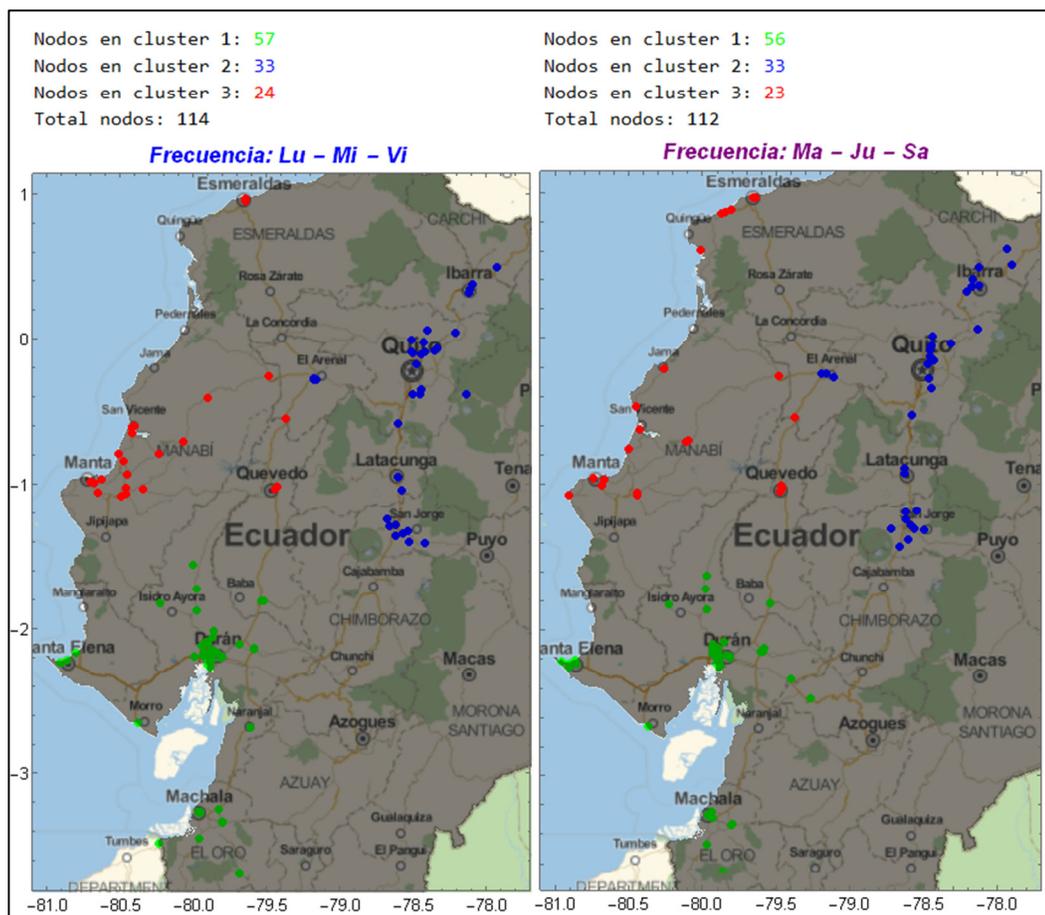


Figura 25. Nodos por frecuencia de entrega

La programación óptima de rutas del modelo MDHVRPTW planteado se presenta a continuación en la Tabla 21, cuya asignación se orienta a la contratación del menor número de vehículos posibles y con recorridos equilibrados en relación a la distancia/tiempo de viaje. De acuerdo a estas

consideraciones, se alcanza un nivel de aprovechamiento de toda la flota del 86.06% de su capacidad instalada.

Zona	Frecuencia de Entrega	No. Rutas	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Utilización de la Flota [%]
Clúster # 1	Lunes, miércoles y viernes	14	2,232.74	82.55%
	Martes, jueves y sábado	12	2,074.65	85.27%
Clúster # 2	Lunes, miércoles y viernes	11	1,808.88	87.65%
	Martes, jueves y sábado	9	1,754.10	86.78%
Clúster # 3	Lunes, miércoles y viernes	8	2,307.27	86.60%
	Martes, jueves y sábado	8	2,237.34	87.49%
Promedio General				86.06%

Tabla 21. Resumen asignación de rutas

Asignación diaria de rutas:

En la Tabla 22 y Figura 26 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 1, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días lunes, miércoles y viernes.

Zona:	Clúster # 1	Frecuencia:	Lunes - Miércoles – Viernes		
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]
Ruta 1	{Almacén 01, Cliente 87, Cliente 83, Cliente 91, Almacén 01}	166.70	2,816.00	3,500.00	80.46%
Ruta 2	{Almacén 01, Cliente 25, Cliente 71, Cliente 05, Cliente 101, Almacén 01}	261.44	2,853.00	3,500.00	81.51%
Ruta 3	{Almacén 01, Cliente 15, Cliente 21, Almacén 01}	28.73	3,360.00	3,500.00	96.00%
Ruta 4	{Almacén 01, Cliente 11,	23.50	3,380.00	3,500.00	96.57%

	Cliente 19, Almacén 01}				
Ruta 5	{Almacén 01, Cliente 23, Cliente 95, Cliente 99, Almacén 01}	341.83	3,586.00	4,000.00	89.65%
Ruta 6	{Almacén 01, Cliente 39, Cliente 53, Cliente 103, Almacén 01}	37.12	3,936.00	4,500.00	87.47%
Ruta 7	{Almacén 01, Cliente 03, Cliente 09, Cliente 107, Cliente 07, Cliente 97, Almacén 01}	232.71	4,311.00	4,500.00	95.80%
Ruta 8	{Almacén 01, Cliente 43, Cliente 59, Cliente 55, Cliente 57, Almacén 01}	28.97	4,355.00	5,000.00	87.10%
Ruta 9	{Almacén 01, Cliente 17, Cliente 89, Cliente 85, Cliente 111, Almacén 01}	79.26	4,613.00	7,000.00	65.90%
Ruta 10	{Almacén 01, Cliente 65, Cliente 77, Cliente 67, Cliente 31, Cliente 41, Almacén 01}	327.70	4,958.20	7,500.00	66.11%
Ruta 11	{Almacén 01, Cliente 35, Cliente 37, Cliente 27, Cliente 63, Almacén 01}	26.80	5,866.00	8,000.00	73.33%
Ruta 12	{Almacén 01, Cliente 81, Cliente 79, Cliente 75, Cliente 93, Cliente 109, Almacén 01}	306.56	6,566.00	8,000.00	82.08%
Ruta 13	{Almacén 01, Cliente 61, Cliente 49, Cliente 47, Cliente 45, Cliente 51, Cliente 105, Almacén 01}	31.69	6,674.00	8,500.00	78.52%
Ruta 14	{Almacén 01, Cliente 33, Cliente 13, Cliente 01, Cliente 29, Cliente 69, Cliente 73, Almacén 01}	339.73	6,764.00	9,000.00	75.16%

Tabla 22. Detalle Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes

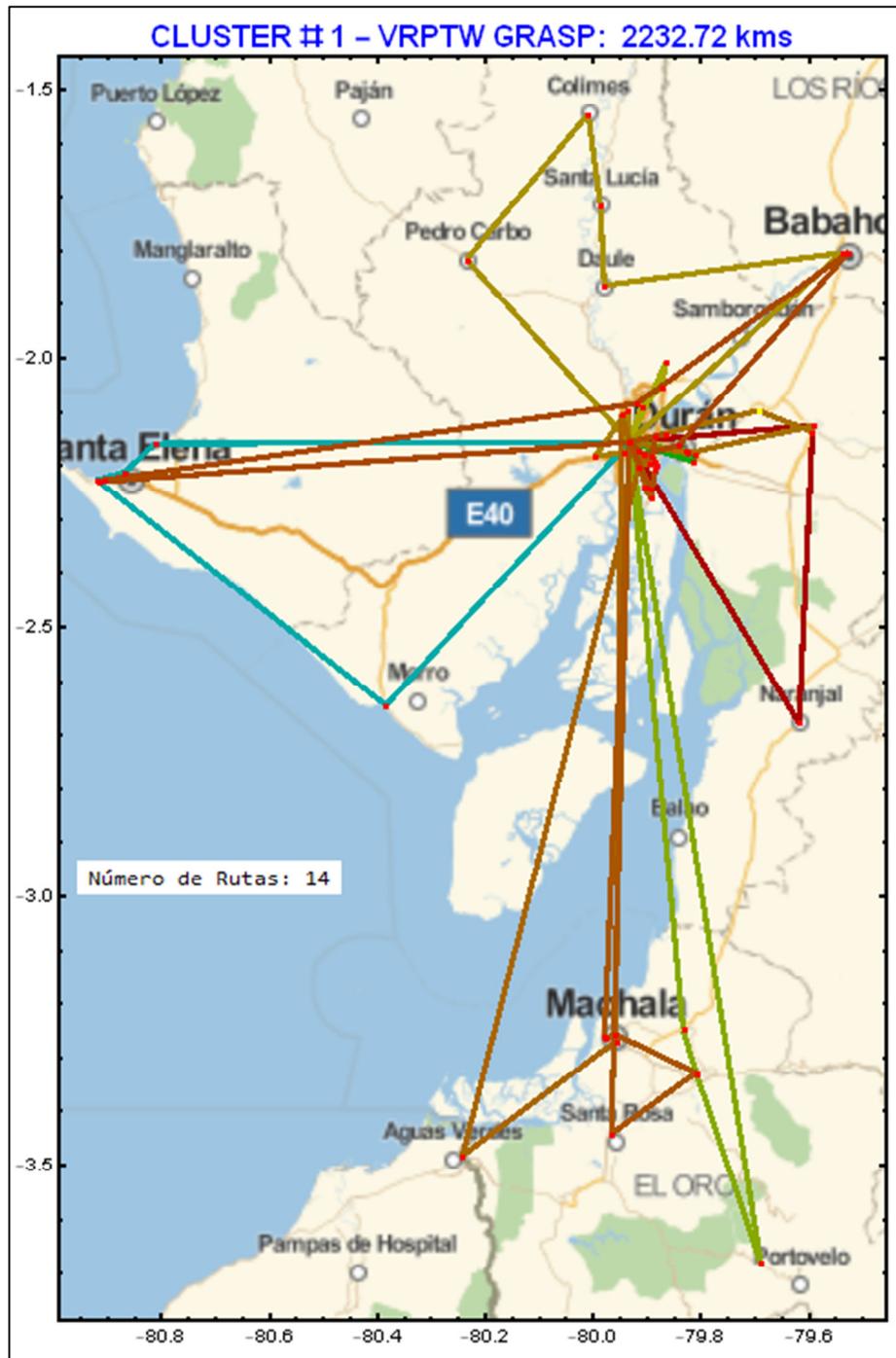


Figura 26. Rutas Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes

En la Tabla 23 y Figura 27 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 1, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días martes, jueves y sábado.

Zona:		Clúster # 1	Frecuencia:		Martes - Jueves – Sábado	
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]	
Ruta 1	{Almacén 01, Cliente 40, Cliente 66, Almacén 01}	13.31	2,361.00	3,500.00	67.46%	
Ruta 2	{Almacén 01, Cliente 12, Cliente 18, Almacén 01}	23.50	3,180.00	3,500.00	90.86%	
Ruta 3	{Almacén 01, Cliente 08, Cliente 92, Cliente 108, Almacén 01}	118.47	3,943.00	4,000.00	98.58%	
Ruta 4	{Almacén 01, Cliente 04, Cliente 34, Cliente 28, Cliente 30, Almacén 01}	219.59	4,680.00	5,000.00	93.60%	
Ruta 5	{Almacén 01, Cliente 46, Cliente 56, Cliente 44, Cliente 58, Cliente 62, Almacén 01}	14.40	5,597.00	7,000.00	79.96%	
Ruta 6	{Almacén 01, Cliente 102, Cliente 68, Cliente 106, Almacén 01}	230.77	5,650.00	7,500.00	75.33%	
Ruta 7	{Almacén 01, Cliente 88, Cliente 84, Cliente 02, Cliente 98, Almacén 01}	201.19	5,925.00	8,000.00	74.06%	
Ruta 8	{Almacén 01, Cliente 52, Cliente 104, Cliente 16, Cliente 60, Cliente 48, Cliente 50, Almacén 01}	44.96	6,409.00	8,000.00	80.11%	
Ruta 9	{Almacén 01, Cliente 38, Cliente 100, Cliente 94, Cliente 82, Cliente 32, Cliente 64, Almacén 01}	341.57	7,610.00	8,500.00	89.53%	
Ruta 10	{Almacén 01, Cliente 72, Cliente 70, Cliente 26, Cliente 42, Cliente 54, Almacén 01}	267.45	8,286.00	9,000.00	92.07%	
Ruta 11	{Almacén 01, Cliente 06, Cliente 22, Cliente 10, Cliente 14, Cliente 20, Cliente 24, Cliente 86, Cliente 90, Almacén 01}	283.44	8,306.00	9,000.00	92.29%	
Ruta 12	{Almacén 01, Cliente 36, Cliente 80, Cliente 74, Cliente 78, Cliente 76, Cliente 96, Cliente 110, Almacén 01}	316.00	8,941.00	10,000.00	89.41%	

Tabla 23. Detalle Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado

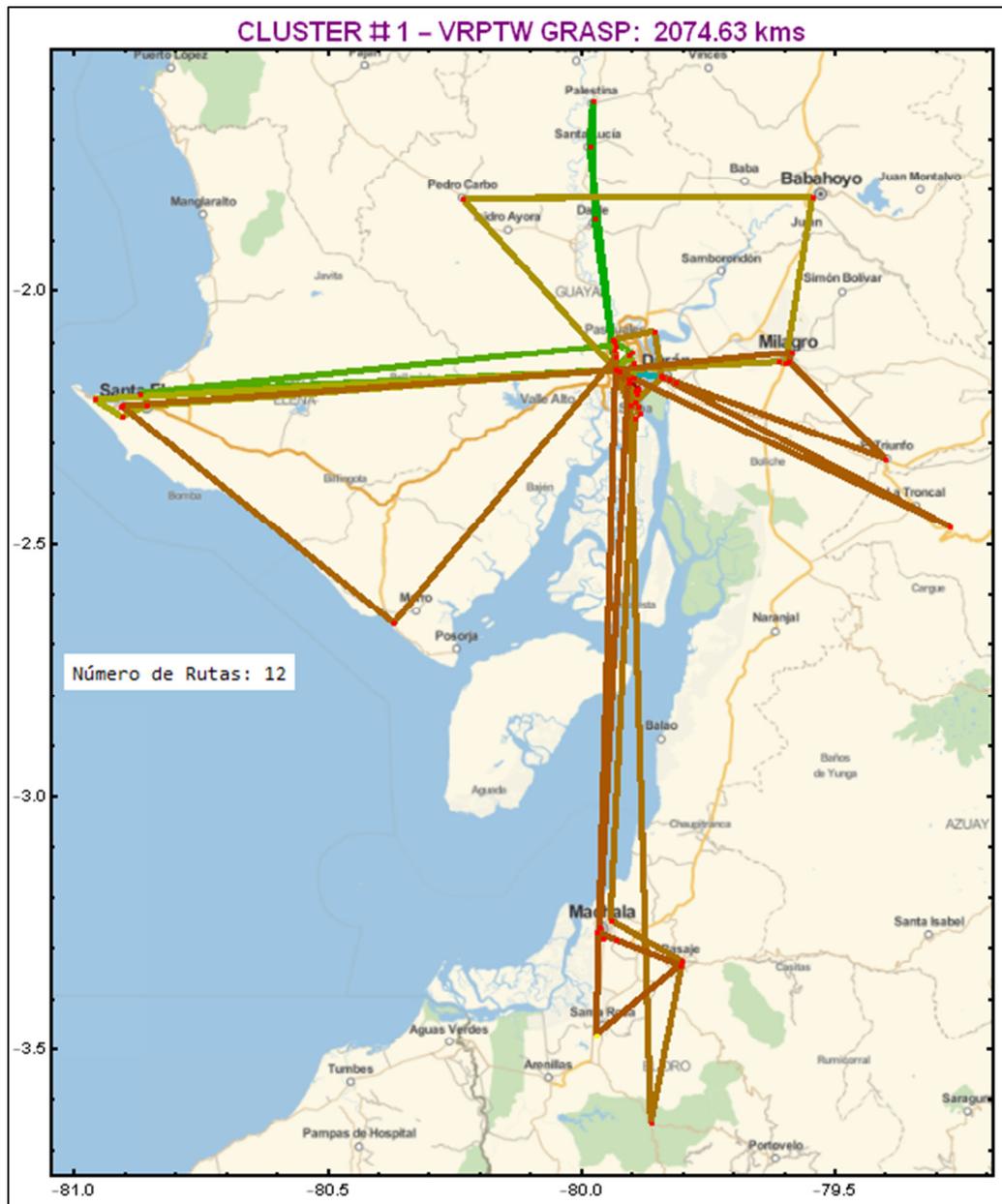


Figura 27. Rutas Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado

En la Tabla 24 y Figura 28 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 2, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días lunes, miércoles y viernes.

Zona:		Clúster # 2	Frecuencia:			Lunes - Miércoles – Viernes
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]	
Ruta 1	{Almacén 02, Cliente 120, Cliente 130, Almacén 02}	245.07	2,264.00	3,500.00	64.69%	
Ruta 2	{Almacén 02, Cliente 134, Cliente 136, Almacén 02}	178.38	2,490.00	3,500.00	71.14%	
Ruta 3	{Almacén 02, Cliente 150, Cliente 152, Almacén 02}	57.91	3,300.00	3,500.00	94.29%	
Ruta 4	{Almacén 02, Cliente 128, Cliente 154, Almacén 02}	66.78	3,536.00	4,000.00	88.40%	
Ruta 5	{Almacén 02, Cliente 160, Cliente 214, Almacén 02}	183.03	3,722.00	4,000.00	93.05%	
Ruta 6	{Almacén 02, Cliente 122, Cliente 148, Almacén 02}	97.48	3,837.00	4,000.00	95.93%	
Ruta 7	{Almacén 02, Cliente 140, Cliente 132, Cliente 168, Almacén 02}	219.49	4,056.00	5,000.00	81.12%	
Ruta 8	{Almacén 02, Cliente 126, Cliente 212, Cliente 216, Almacén 02}	169.34	4,632.00	5,000.00	92.64%	
Ruta 9	{Almacén 02, Cliente 166, Cliente 156, Cliente 158, Almacén 02}	77.56	6,000.00	7,000.00	85.71%	
Ruta 10	{Almacén 02, Cliente 144, Cliente 146, Cliente 116, Cliente 118, Cliente 138, Almacén 02}	279.72	7,399.00	7,500.00	98.65%	
Ruta 11	{Almacén 02, Cliente 112, Cliente 142, Cliente 162, Cliente 124, Cliente 114, Cliente 164, Almacén 02}	234.12	8,372.00	8,500.00	98.49%	

Tabla 24. Detalle Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes

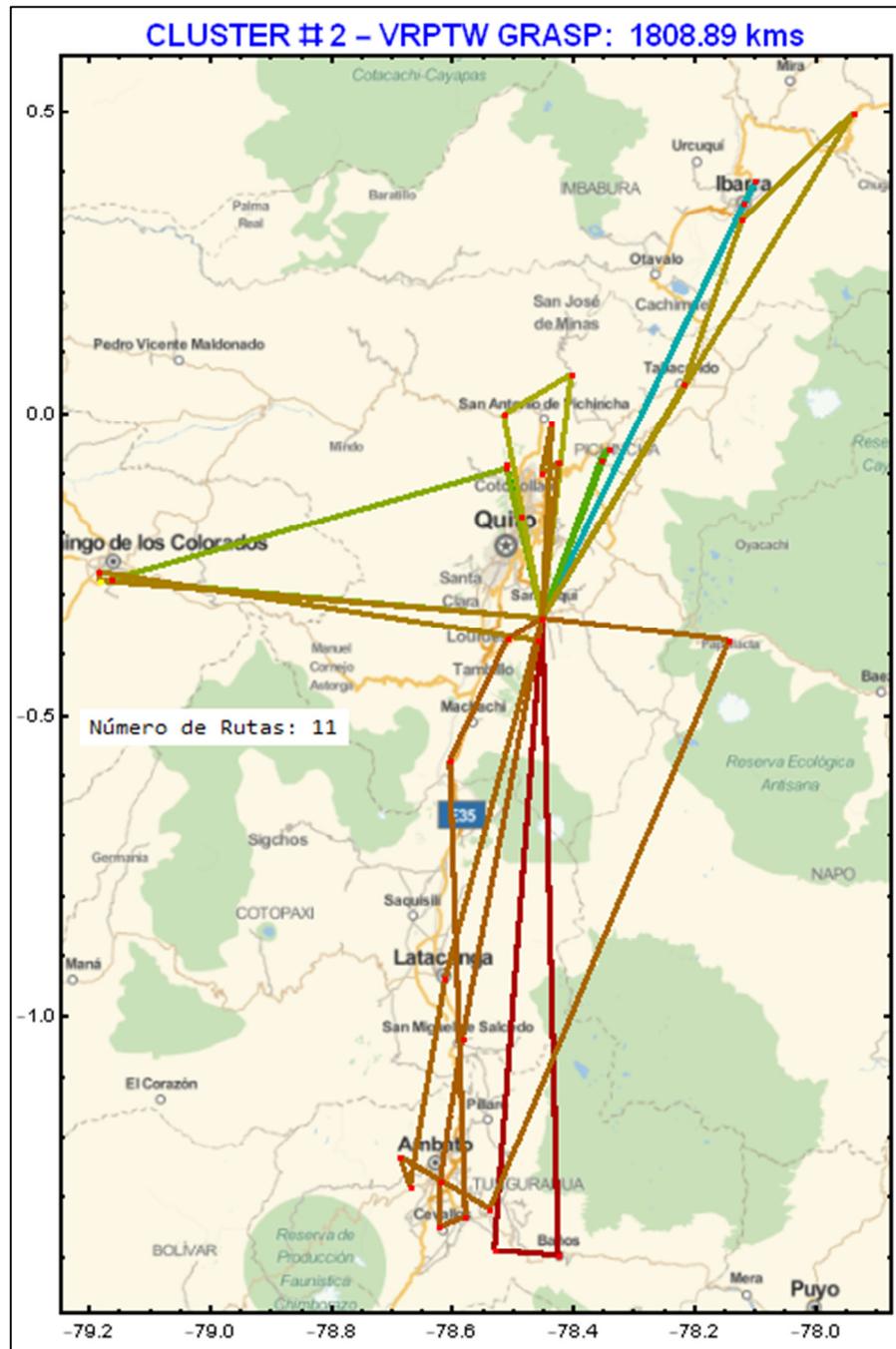


Figura 28. Rutas Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes

En la Tabla 25 y Figura 29 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 2, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días martes, jueves y sábado.

Zona:		Clúster # 2	Frecuencia:		Martes - Jueves – Sábado	
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]	
Ruta 1	{Almacén 02, Cliente 115, Cliente 149, Cliente 163, Almacén 02}	232.42	2,947.00	3,500.00	84.20%	
Ruta 2	{Almacén 02, Cliente 129, Cliente 155, Almacén 02}	78.86	3,800.00	4,000.00	95.00%	
Ruta 3	{Almacén 02, Cliente 167, Cliente 153, Cliente 159, Almacén 02}	79.39	3,900.00	4,000.00	97.50%	
Ruta 4	{Almacén 02, Cliente 125, Cliente 121, Cliente 169, Almacén 02}	253.48	4,458.00	5,000.00	89.16%	
Ruta 5	{Almacén 02, Cliente 127, Cliente 141, Cliente 211, Almacén 02}	189.85	4,680.00	5,000.00	93.60%	
Ruta 6	{Almacén 02, Cliente 123, Cliente 151, Cliente 157, Almacén 02}	125.65	5,313.00	7,000.00	75.90%	
Ruta 7	{Almacén 02, Cliente 139, Cliente 113, Cliente 117, Cliente 213, Cliente 215, Almacén 02}	314.51	6,229.00	7,000.00	88.99%	
Ruta 8	{Almacén 02, Cliente 137, Cliente 145, Cliente 119, Cliente 143, Cliente 147, Almacén 02}	275.57	8,507.00	10,000.00	85.07%	
Ruta 9	{Almacén 02, Cliente 133, Cliente 131, Cliente 165, Cliente 135, Cliente 161, Almacén 02}	204.37	8,590.00	12,000.00	71.58%	

Tabla 25. Detalle Clúster # 2: Martes – Jueves – Sábado

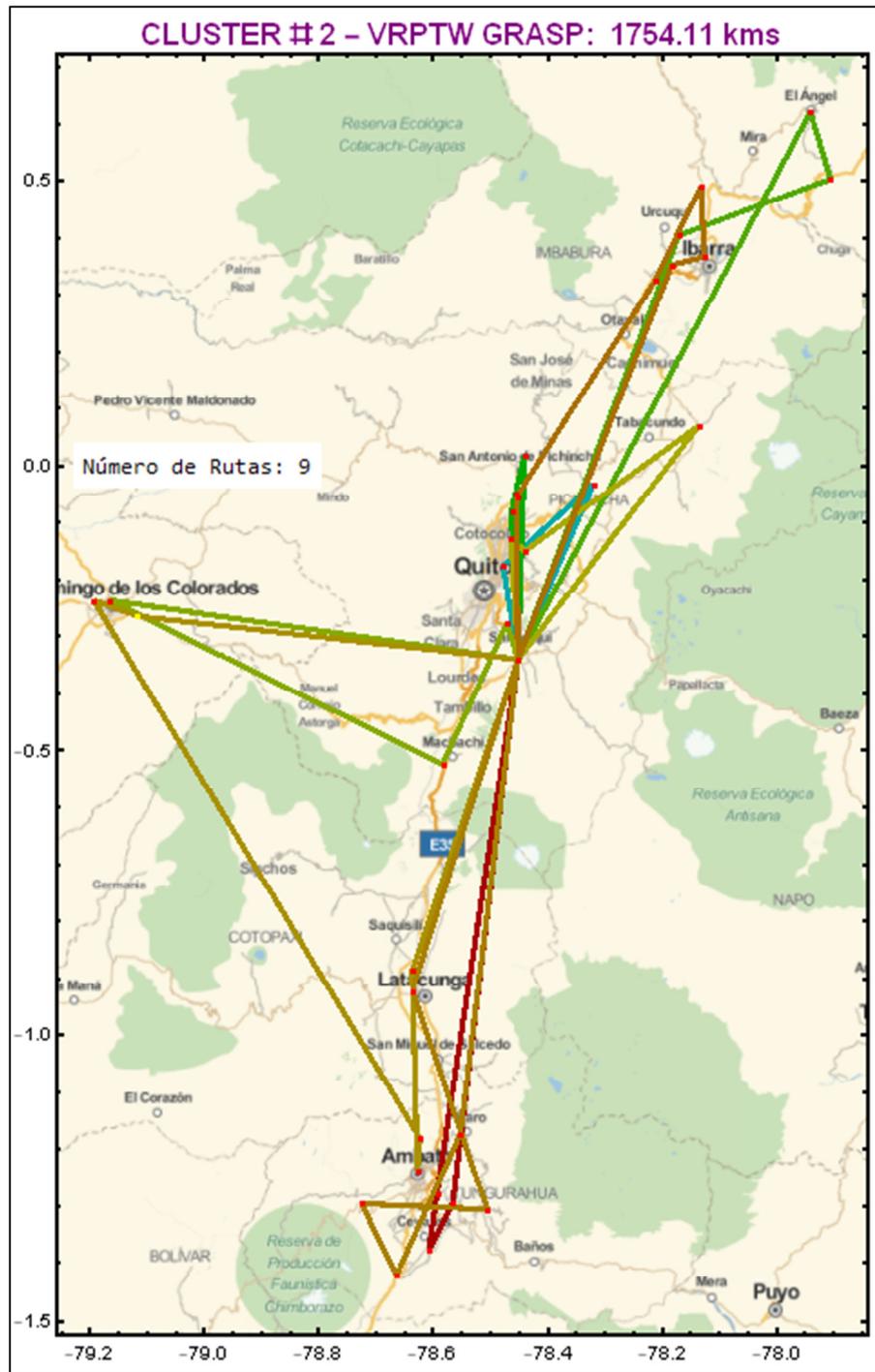


Figura 29. Rutas Clúster # 2: Martes – Jueves – Sábado

En la Tabla 26 y Figura 30 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 3, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días lunes, miércoles y viernes.

Zona:		Clúster #3	Frecuencia:			Lunes - Miércoles – Viernes
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]	
Ruta 1	{Almacén 03, Cliente 202, Almacén 03}	104.08	2,460.00	3,500.00	70.29%	
Ruta 2	{Almacén 03, Cliente 180, Cliente 184, Almacén 03}	336.88	2,575.00	3,500.00	73.57%	
Ruta 3	{Almacén 03, Cliente 182, Almacén 03}	340.48	2,890.00	3,500.00	82.57%	
Ruta 4	{Almacén 03, Cliente 176, Cliente 190, Cliente 192, Almacén 03}	313.93	4,036.00	4,500.00	89.69%	
Ruta 5	{Almacén 03, Cliente 220, Cliente 174, Cliente 178, Almacén 03}	245.23	5,843.00	7,000.00	83.47%	
Ruta 6	{Almacén 03, Cliente 186, Cliente 200, Cliente 188, Cliente 196, Almacén 03}	332.62	6,851.00	7,000.00	97.87%	
Ruta 7	{Almacén 03, Cliente 204, Cliente 218, Cliente 172, Cliente 210, Almacén 03}	292.20	7,487.00	7,500.00	99.83%	
Ruta 8	{Almacén 03, Cliente 208, Cliente 194, Cliente 198, Cliente 170, Cliente 206, Almacén 03}	341.85	9,555.00	10,000.00	95.55%	

Tabla 26. Detalle Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes

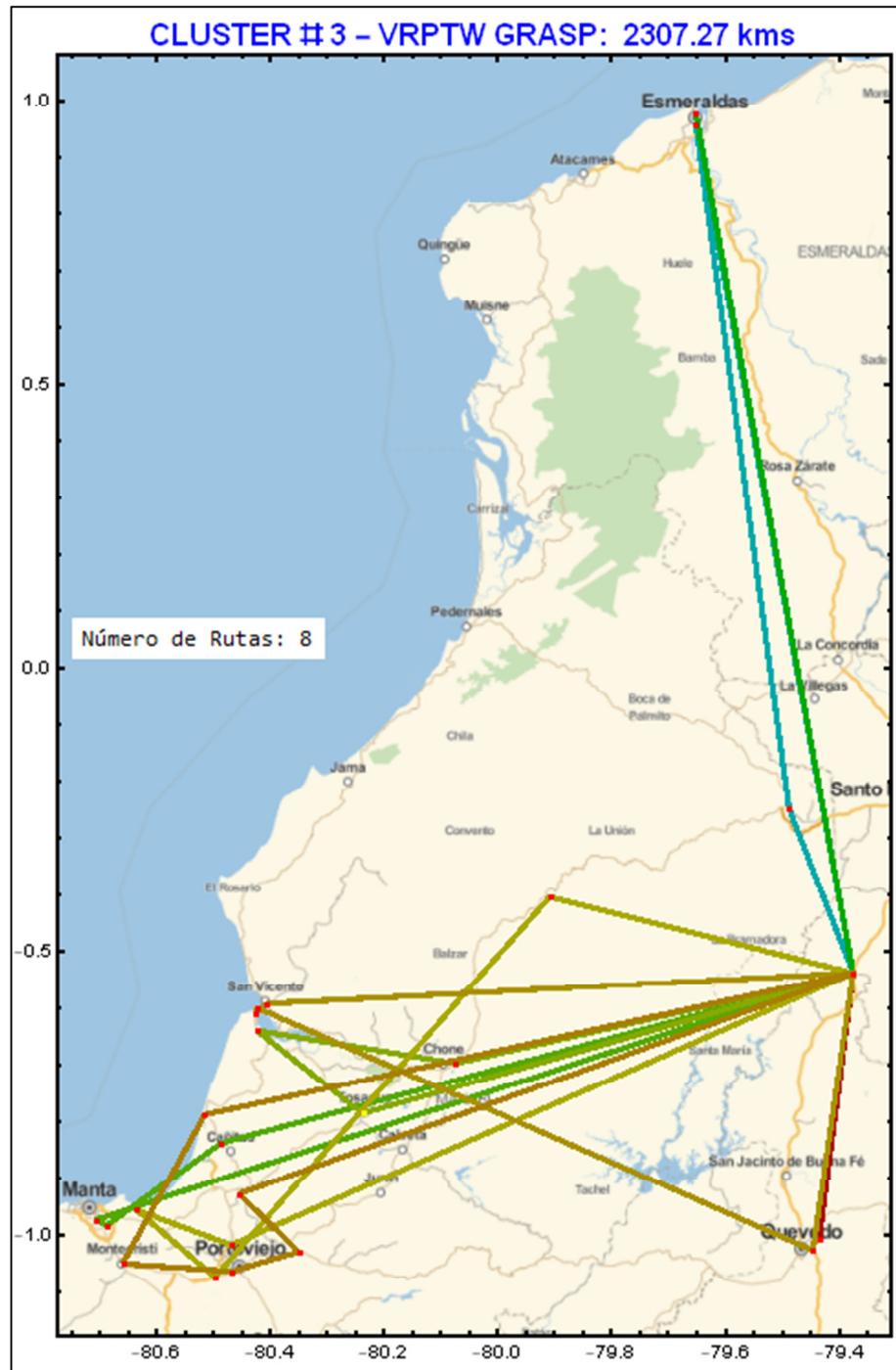


Figura 30. Rutas Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes

En la Tabla 27 y Figura 31 se muestra en detalle la asignación y secuencia de las rutas correspondiente al clúster # 3, para clientes con frecuencia de entrega programada para los días martes, jueves y sábado.

Zona:		Clúster #3	Frecuencia:			Martes - Jueves – Sábado
No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia Recorrida Ruta [Km]	Carga de la Ruta [Kg]	Asignación Vehículo [Kg]	Utilización de la Ruta [%]	
Ruta 1	{Almacén 03, Cliente 183, Almacén 03}	338.76	2,620.00	3,500.00	74.86%	
Ruta 2	{Almacén 03, Cliente 177, Cliente 179, Almacén 03}	168.45	3,110.00	3,500.00	88.86%	
Ruta 3	{Almacén 03, Cliente 181, Cliente 195, Almacén 03}	291.45	4,210.00	4,500.00	93.56%	
Ruta 4	{Almacén 03, Cliente 175, Cliente 187, Almacén 03}	261.89	5,207.00	7,000.00	74.39%	
Ruta 5	{Almacén 03, Cliente 173, Cliente 189, Cliente 207, Almacén 03}	321.61	6,020.00	7,000.00	86.00%	
Ruta 6	{Almacén 03, Cliente 201, Cliente 203, Cliente 205, Almacén 03}	114.96	6,333.00	7,000.00	90.47%	
Ruta 7	{Almacén 03, Cliente 199, Cliente 197, Cliente 209, Cliente 191, Cliente 193, Almacén 03}	371.65	8,396.00	8,500.00	98.78%	
Ruta 8	{Almacén 03, Cliente 185, Cliente 217, Cliente 171, Cliente 219, Almacén 03}	368.57	9,300.00	10,000.00	93.00%	

Tabla 27. Detalle Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado

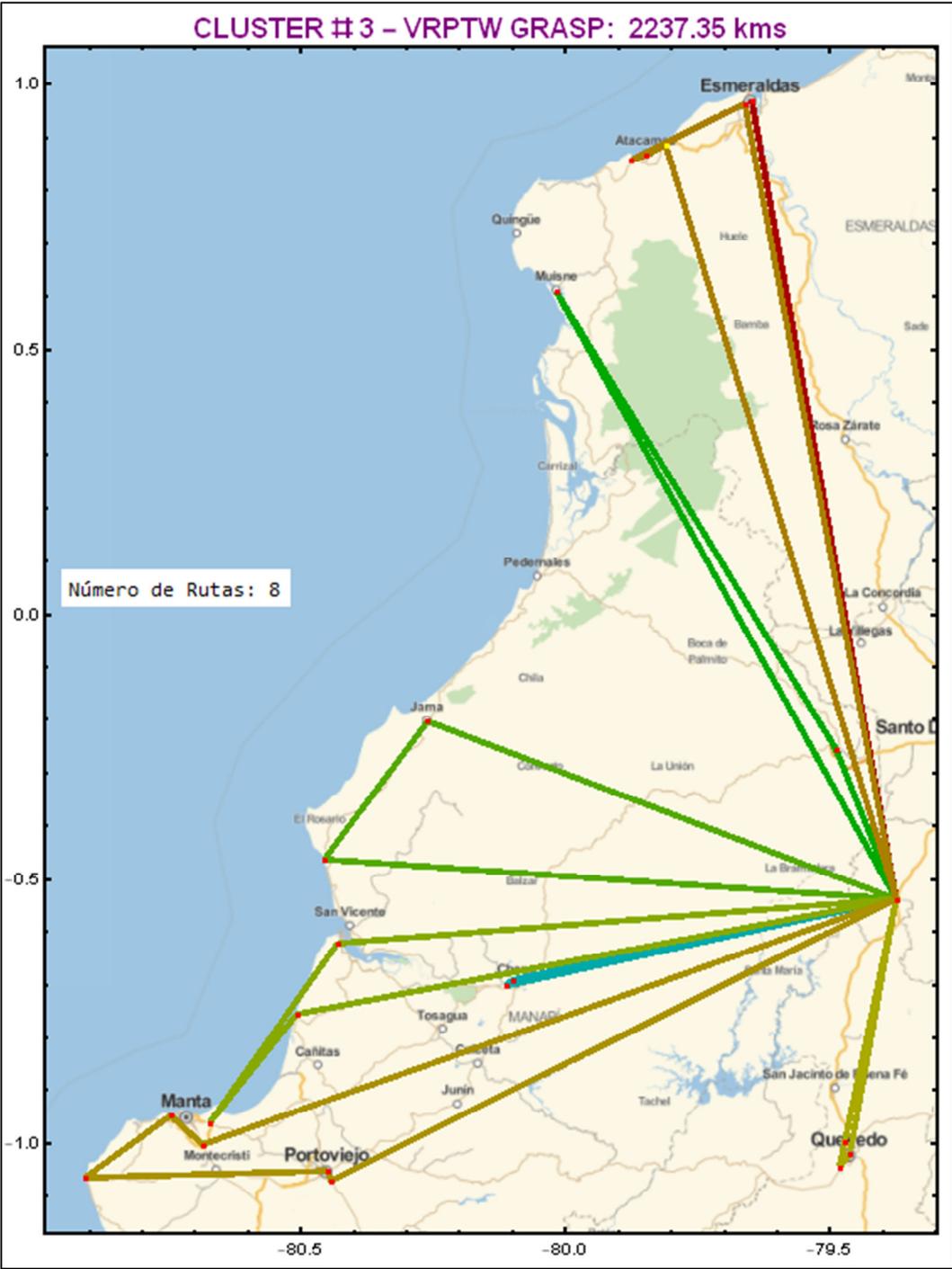


Figura 31. Rutas Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado

4.2 Resultados numéricos

Los resultados obtenidos en el presente modelo se representan numéricamente en relación a los costos fijos incurridos en la contratación de los vehículos para el transporte y distribución de la carga de acuerdo a los recorridos establecidos en cada una de las rutas, dados principalmente por las ubicaciones de los clientes de todas las zonas.

Número de fletes proyectados por semana:

La implicación de los resultados obtenidos sobre el modelo propuesto permite proyectar la contratación de un menor número de fletes por día para cubrir la misma demanda semanal, como se aprecia a continuación en la Tabla 28, esto se da como resultado de un mayor aprovechamiento de la flota (>85%), inclusive, con una perspectiva de mejores resultados futuros considerando la aplicación de ciertos ajustes adicionales en las ventanas de tiempo de ciertos clientes, de tal manera se logre una disminución en la distancia total recorrida.

		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Semana
Zona #1	Demanda [Ton.]	65	71	65.2	70.8	65.5	71.2	408.7
	Rutas Proyectadas	14	12	14	12	14	12	78
Zona #2	Demanda [Ton.]	46	45	46.8	44.7	46.5	45.4	274.4
	Rutas Proyectadas	11	9	11	9	11	9	60
Zona #3	Demanda [Ton.]	47	49	46.9	48	47.5	49.7	288.1
	Rutas Proyectadas	8	8	8	8	8	8	48
Total Demanda [Ton.]		158	165	158.9	163.5	159.5	166.3	971.2
Total Rutas proyectadas		33	29	33	29	33	29	186

Tabla 28. Proyección de fletes por semana

Costo de distribución por zona:

El costo unitario de distribución es finalmente el indicador que mide el real desempeño del proceso, en tal virtud, dado que el costo actual de transporte corresponde a 0.0376 \$/litro se logra el ahorro esperado en cada una de las zonas y en general de 0.0042 \$/litro para todas las zonas.

En la Tabla 29 bajo el escenario desarrollado, se obtiene para el clúster # 1 un costo unitario de distribución de la red secundaria de 0.0302 \$/litro, a partir de las rutas propuestas en el presente modelo y en relación a la cantidad de litros transportados en un determinado periodo de tiempo.

No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Asignación Vehículo [Ton]	Cantidad Transportada [Litros]	Costo Flete [USD]
Ruta 1	{Almacén 01, Cliente 87, Cliente 83, Cliente 91, Almacén 01}	3.5	2,734	\$ 120.00
Ruta 2	{Almacén 01, Cliente 25, Cliente 71, Cliente 05, Cliente 101, Almacén 01}	3.5	2,770	\$ 120.00
Ruta 3	{Almacén 01, Cliente 15, Cliente 21, Almacén 01}	3.5	3,262	\$ 100.00
Ruta 4	{Almacén 01, Cliente 11, Cliente 19, Almacén 01}	3.5	3,282	\$ 100.00
Ruta 5	{Almacén 01, Cliente 23, Cliente 95, Cliente 99, Almacén 01}	4.0	3,482	\$ 180.00
Ruta 6	{Almacén 01, Cliente 39, Cliente 53, Cliente 103, Almacén 01}	4.5	3,821	\$ 110.00
Ruta 7	{Almacén 01, Cliente 03, Cliente 09, Cliente 107, Cliente 07, Cliente 97, Almacén 01}	4.5	4,185	\$ 110.00
Ruta 8	{Almacén 01, Cliente 43, Cliente 59, Cliente 55, Cliente 57, Almacén 01}	5.0	4,228	\$ 80.00
Ruta 9	{Almacén 01, Cliente 17, Cliente 89, Cliente 85, Cliente 111, Almacén 01}	7.0	4,479	\$ 160.00
Ruta 10	{Almacén 01, Cliente 65, Cliente 77, Cliente 67, Cliente 31, Cliente 41, Almacén 01}	7.5	4,814	\$ 210.00
Ruta 11	{Almacén 01, Cliente 35, Cliente 37, Cliente 27, Cliente 63, Almacén 01}	8.0	5,695	\$ 140.00
Ruta 12	{Almacén 01, Cliente 81, Cliente 79, Cliente 75, Cliente 93, Cliente 109, Almacén 01}	8.0	6,375	\$ 230.00

Ruta 13	{Almacén 01, Cliente 61, Cliente 49, Cliente 47, Cliente 45, Cliente 51, Cliente 105, Almacén 01}	8.5	6,480	\$ 160.00
Ruta 14	{Almacén 01, Cliente 33, Cliente 13, Cliente 01, Cliente 29, Cliente 69, Cliente 73, Almacén 01}	9.0	6,567	\$ 190.00
Ruta 1	{Almacén 01, Cliente 40, Cliente 66, Almacén 01}	3.50	2,292	\$ 80.00
Ruta 2	{Almacén 01, Cliente 12, Cliente 18, Almacén 01}	3.50	3,087	\$ 100.00
Ruta 3	{Almacén 01, Cliente 08, Cliente 92, Cliente 108, Almacén 01}	4.00	3,828	\$ 110.00
Ruta 4	{Almacén 01, Cliente 04, Cliente 34, Cliente 28, Cliente 30, Almacén 01}	5.00	4,544	\$ 120.00
Ruta 5	{Almacén 01, Cliente 46, Cliente 56, Cliente 44, Cliente 58, Cliente 62, Almacén 01}	7.00	5,434	\$ 100.00
Ruta 6	{Almacén 01, Cliente 102, Cliente 68, Cliente 106, Almacén 01}	7.50	5,485	\$ 210.00
Ruta 7	{Almacén 01, Cliente 88, Cliente 84, Cliente 02, Cliente 98, Almacén 01}	8.00	5,752	\$ 190.00
Ruta 8	{Almacén 01, Cliente 52, Cliente 104, Cliente 16, Cliente 60, Cliente 48, Cliente 50, Almacén 01}	8.00	6,222	\$ 160.00
Ruta 9	{Almacén 01, Cliente 38, Cliente 100, Cliente 94, Cliente 82, Cliente 32, Cliente 64, Almacén 01}	8.50	7,388	\$ 230.00
Ruta 10	{Almacén 01, Cliente 72, Cliente 70, Cliente 26, Cliente 42, Cliente 54, Almacén 01}	9.00	8,045	\$ 190.00
Ruta 11	{Almacén 01, Cliente 06, Cliente 22, Cliente 10, Cliente 14, Cliente 20, Cliente 24, Cliente 86, Cliente 90, Almacén 01}	9.00	8,064	\$ 210.00
Ruta 12	{Almacén 01, Cliente 36, Cliente 80, Cliente 74, Cliente 78, Cliente 76, Cliente 96, Cliente 110, Almacén 01}	10.00	8,681	\$ 245.00
		Totales	130,996	\$ 3,955.00
			Costo por litro	\$ 0.0302

Tabla 29. Costo de distribución Clúster # 1

En la Tabla 30Tabla 29 bajo el escenario desarrollado, se obtiene para el clúster # 2 un costo unitario de distribución de la red secundaria de 0.0338 \$/litro, a partir de las rutas propuestas en el presente modelo y en relación a la cantidad de litros transportados en un determinado periodo de tiempo.

No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Asignación Vehículo [Ton]	Cantidad Transportada [Litros]	Costo Flete [USD]
Ruta 1	{Almacén 02, Cliente 120, Cliente 130, Almacén 02}	3.5	2,198	\$ 190.00
Ruta 2	{Almacén 02, Cliente 134, Cliente 136, Almacén 02}	3.5	2,417	\$ 190.00
Ruta 3	{Almacén 02, Cliente 150, Cliente 152, Almacén 02}	3.5	3,204	\$ 70.00
Ruta 4	{Almacén 02, Cliente 128, Cliente 154, Almacén 02}	4.0	3,433	\$ 90.00
Ruta 5	{Almacén 02, Cliente 160, Cliente 214, Almacén 02}	4.0	3,614	\$ 140.00
Ruta 6	{Almacén 02, Cliente 122, Cliente 148, Almacén 02}	4.0	3,725	\$ 110.00
Ruta 7	{Almacén 02, Cliente 140, Cliente 132, Cliente 168, Almacén 02}	5.0	3,938	\$ 190.00
Ruta 8	{Almacén 02, Cliente 126, Cliente 212, Cliente 216, Almacén 02}	5.0	4,497	\$ 140.00
Ruta 9	{Almacén 02, Cliente 166, Cliente 156, Cliente 158, Almacén 02}	7.0	5,825	\$ 100.00
Ruta 10	{Almacén 02, Cliente 144, Cliente 146, Cliente 116, Cliente 118, Cliente 138, Almacén 02}	7.5	7,183	\$ 220.00
Ruta 11	{Almacén 02, Cliente 112, Cliente 142, Cliente 162, Cliente 124, Cliente 114, Cliente 164, Almacén 02}	8.5	8,128	\$ 245.00
Ruta 1	{Almacén 02, Cliente 115, Cliente 149, Cliente 163, Almacén 02}	3.5	2,861	\$ 190.00
Ruta 2	{Almacén 02, Cliente 129, Cliente 155, Almacén 02}	4.0	3,689	\$ 80.00
Ruta 3	{Almacén 02, Cliente 167, Cliente 153, Cliente 159, Almacén 02}	4.0	3,786	\$ 90.00
Ruta 4	{Almacén 02, Cliente 125, Cliente 121, Cliente 169, Almacén 02}	5.0	4,328	\$ 190.00

Ruta 5	{Almacén 02, Cliente 127, Cliente 141, Cliente 211, Almacén 02}	5.0	4,544	\$ 140.00
Ruta 6	{Almacén 02, Cliente 123, Cliente 151, Cliente 157, Almacén 02}	7.0	5,158	\$ 100.00
Ruta 7	{Almacén 02, Cliente 139, Cliente 113, Cliente 117, Cliente 213, Cliente 215, Almacén 02}	7.0	6,048	\$ 220.00
Ruta 8	{Almacén 02, Cliente 137, Cliente 145, Cliente 119, Cliente 143, Cliente 147, Almacén 02}	10.0	8,259	\$ 260.00
Ruta 9	{Almacén 02, Cliente 133, Cliente 131, Cliente 165, Cliente 135, Cliente 161, Almacén 02}	12.0	8,340	\$ 265.00
		Totales	95,177	\$ 3,220.00
			Costo por litro	\$ 0.0338

Tabla 30. Costo de distribución Clúster # 2

En la Tabla 31Tabla 31Tabla 29 bajo el escenario desarrollado, se obtiene para el clúster # 3 un costo unitario de distribución de la red secundaria de 0.0379 \$/litro, a partir de las rutas propuestas en el presente modelo y en relación a la cantidad de litros transportados en un determinado periodo de tiempo.

No. Ruta	Secuencia de la Ruta	Asignación Vehículo [Ton]	Cantidad Transportada [Litros]	Costo Flete [USD]
Ruta 1	{Almacén 03, Cliente 202, Almacén 03}	3.5	2,388	\$ 81.00
Ruta 2	{Almacén 03, Cliente 180, Cliente 184, Almacén 03}	3.5	2,500	\$ 126.00
Ruta 3	{Almacén 03, Cliente 182, Almacén 03}	3.5	2,806	\$ 126.00
Ruta 4	{Almacén 03, Cliente 176, Cliente 190, Cliente 192, Almacén 03}	4.5	3,918	\$ 160.00
Ruta 5	{Almacén 03, Cliente 220, Cliente 174, Cliente 178, Almacén 03}	7.0	5,673	\$ 270.00
Ruta 6	{Almacén 03, Cliente 186, Cliente 200, Cliente 188, Cliente 196, Almacén 03}	7.0	6,651	\$ 250.00
Ruta 7	{Almacén 03, Cliente 204, Cliente 218, Cliente 172, Cliente 210, Almacén 03}	7.5	7,269	\$ 270.00

Ruta 8	{Almacén 03, Cliente 208, Cliente 194, Cliente 198, Cliente 170, Cliente 206, Almacén 03}	10.0	9,277	\$ 310.00
Ruta 1	{Almacén 03, Cliente 183, Almacén 03}	3.5	2,544	\$ 126.00
Ruta 2	{Almacén 03, Cliente 177, Cliente 179, Almacén 03}	3.5	3,019	\$ 110.00
Ruta 3	{Almacén 03, Cliente 181, Cliente 195, Almacén 03}	4.5	4,087	\$ 126.00
Ruta 4	{Almacén 03, Cliente 175, Cliente 187, Almacén 03}	7.0	5,055	\$ 270.00
Ruta 5	{Almacén 03, Cliente 173, Cliente 189, Cliente 207, Almacén 03}	7.0	5,845	\$ 270.00
Ruta 6	{Almacén 03, Cliente 201, Cliente 203, Cliente 205, Almacén 03}	7.0	6,149	\$ 124.00
Ruta 7	{Almacén 03, Cliente 199, Cliente 197, Cliente 209, Cliente 191, Cliente 193, Almacén 03}	8.5	8,151	\$ 290.00
Ruta 8	{Almacén 03, Cliente 185, Cliente 217, Cliente 171, Cliente 219, Almacén 03}	10.0	9,029	\$ 290.00
Totales			84,362	\$ 3,199.00
			Costo por litro	\$ 0.0379

Tabla 31. Costo de distribución Clúster # 3

4.3 Validación del modelo de ruteo propuesto

Para identificar que el modelo de optimización desarrollado presenta ventajas en comparación con el método actual, se realiza a continuación un análisis independiente para cada uno de los clústeres, siendo que para una mejor comprensión se representan gráficamente las rutas obtenidas, en comparación con las rutas actuales con las que se realiza todo el proceso de distribución; en donde se evidencia que de acuerdo a las condiciones del mercado, la operación tiende a ser dinámica por tanto se deben ejecutar nuevas estrategias en búsqueda de mejores resultados, así también se cumple con la premisa de que el modelo propuesto permite obtener un ahorro importante para la organización.

Como se aprecia en la Figura 32, el modelo VRP optimizado para el clúster # 1 (entrega: lunes, miércoles y viernes) logra un recorrido de 2,232 kilómetros a un costo de \$2,010 por día, para un total de 14 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 17, siendo suficiente la utilización de 14; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$260 equivalente al 11.45% sobre el costo actual. Un dato no menor indica que la distancia total a recorrer se disminuye en 41.60 kilómetros.

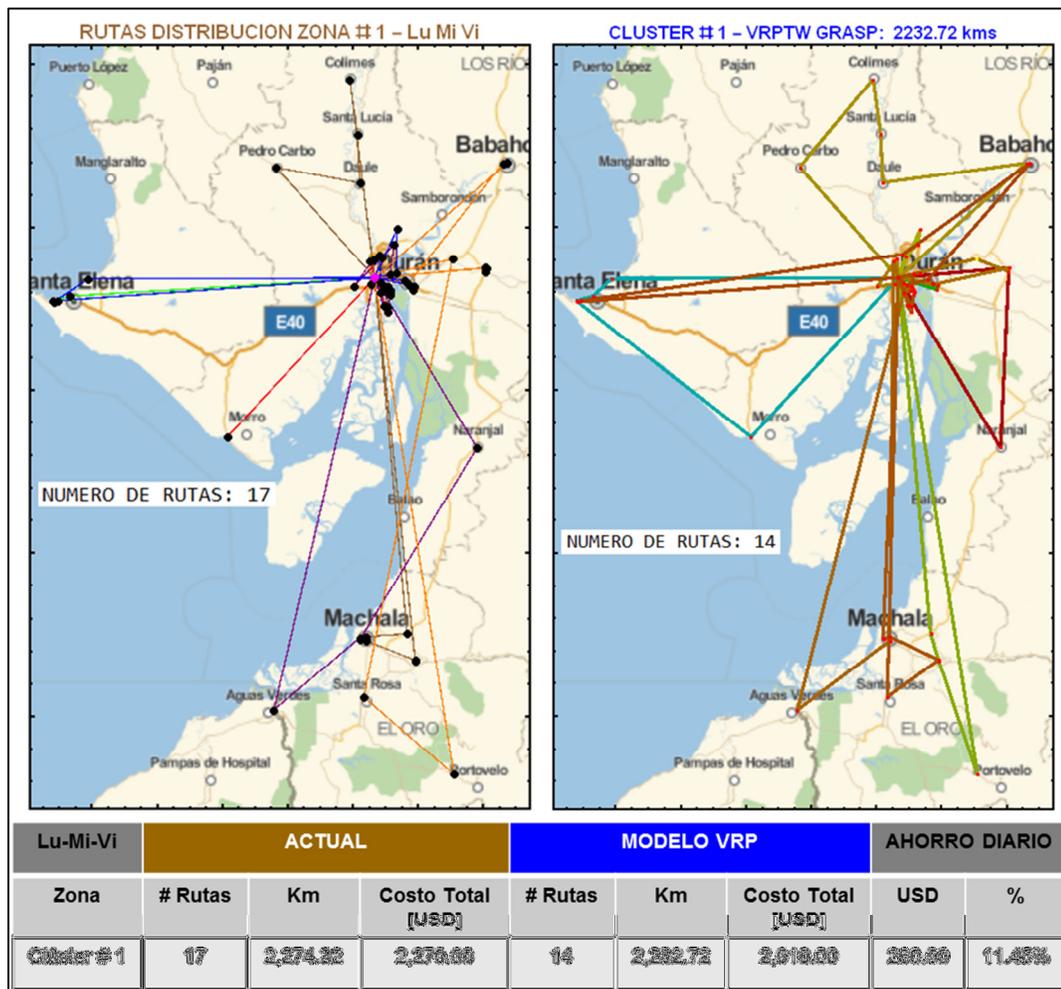


Figura 32. Validación Rutas Clúster # 1: Lunes – Miércoles – Viernes

Como se aprecia en la Figura 33, el modelo VRP optimizado para el clúster # 1 (entrega: martes, jueves y sábado) logra un recorrido de 2,074 kilómetros a un

costo de \$1,945 por día, para un total de 12 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 15, siendo suficiente la utilización de 12; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$220 equivalente al 10.16% sobre el costo actual.

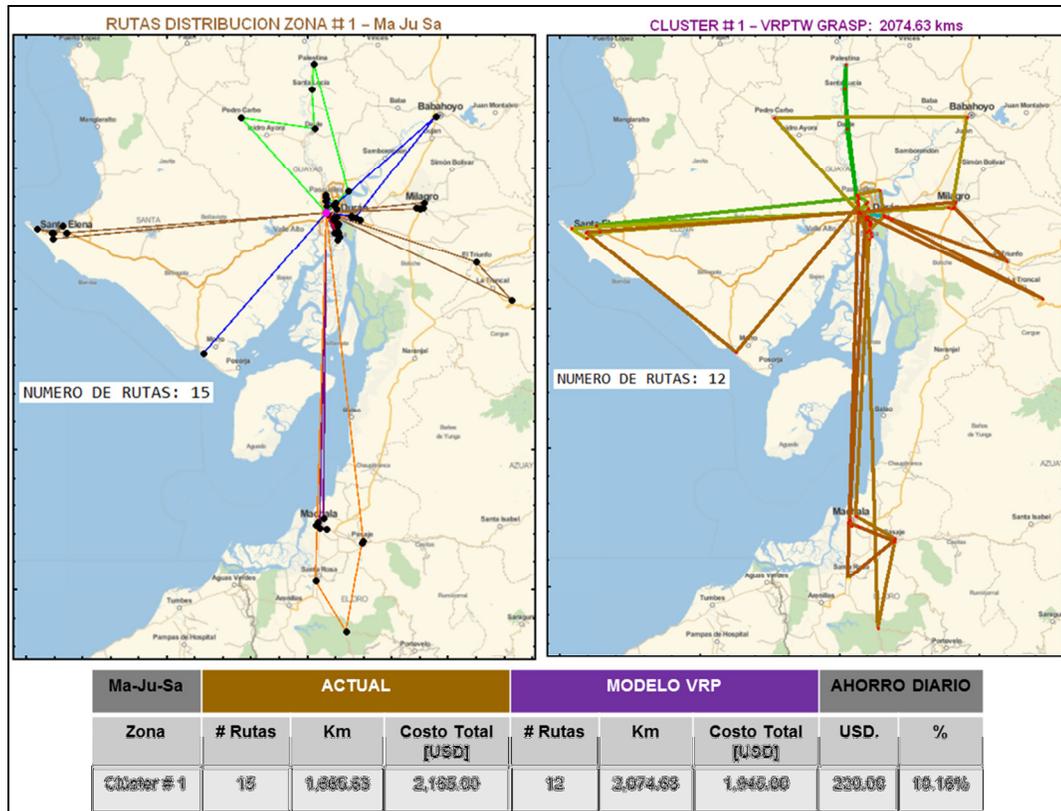


Figura 33. Validación Rutas Clúster # 1: Martes – Jueves – Sábado

En relación al nivel de aprovechamiento de la flota para el clúster # 1, el modelo permite aprovechar de mejor manera la capacidad instalada de los vehículos, el cual se supera el indicador logrado en el último semestre de 63.66%, llegando a 82.55% para la frecuencia de los días lunes, miércoles y viernes, y 85.27% para la frecuencia de los días martes, jueves y sábado. Es decir, se estima que la real utilización de la flota supere el 80%, muy superior a la política establecida por la organización (70%).

Como punto de partida para el análisis del clúster # 2, el modelo VRP optimizado reasigna ciertos clientes de una determinada localidad del clúster # 3, dado que estos se encuentran ubicados a una menor distancia del depósito # 2, tal como se evidencia en la Figura 34 y Figura 35.

Como se aprecia en la Figura 34, el modelo VRP optimizado para el clúster # 2 (entrega: lunes, miércoles y viernes) logra un recorrido de 1,808 kilómetros a un costo de \$1,685 por día, para un total de 11 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 14, siendo suficiente la utilización de 11; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$130 equivalente al 7.16% sobre el costo actual.

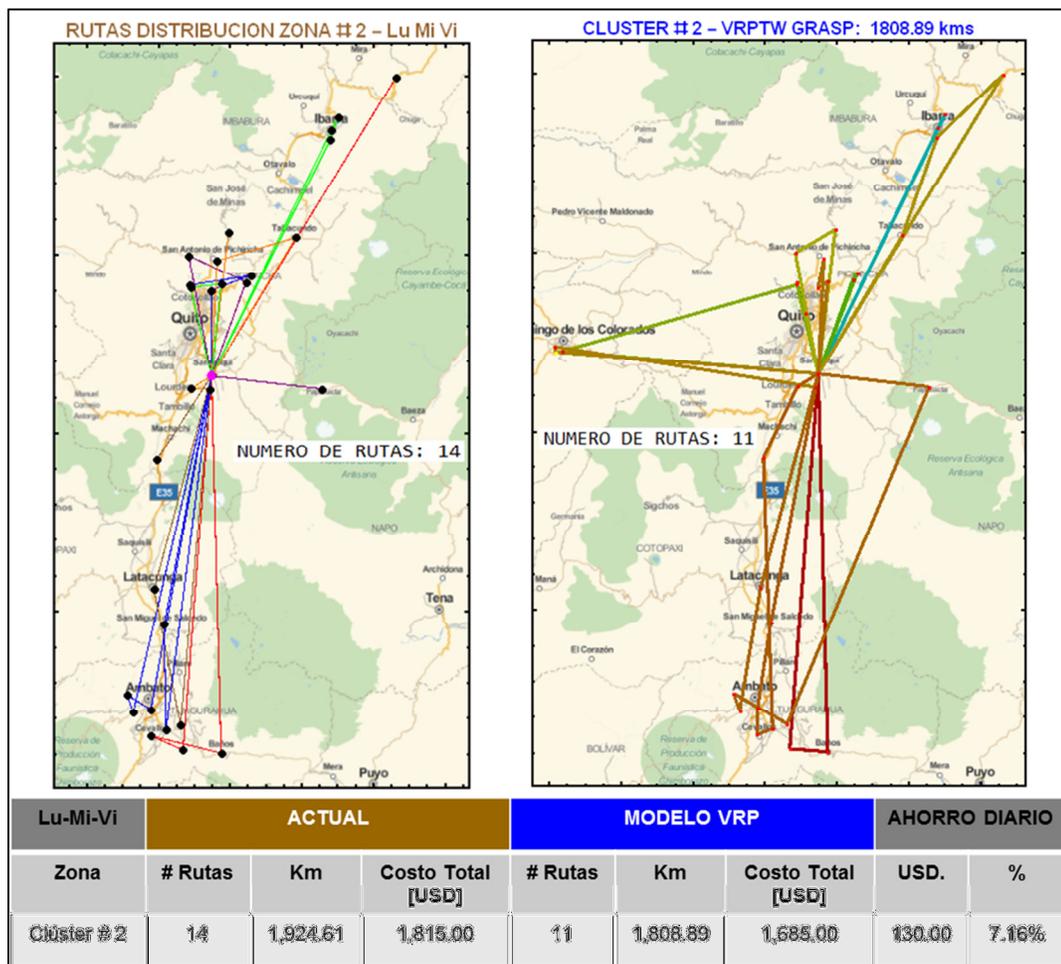


Figura 34. Validación Rutas Clúster # 2: Lunes – Miércoles – Viernes

Como se aprecia en la Figura 35, el modelo VRP optimizado para el clúster # 2 (entrega: martes, jueves y sábado) logra un recorrido de 1,754 kilómetros a un costo de \$1,535 por día, para un total de 9 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 11, siendo suficiente la utilización de 9; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$8 equivalente al 0.52% sobre el costo actual.

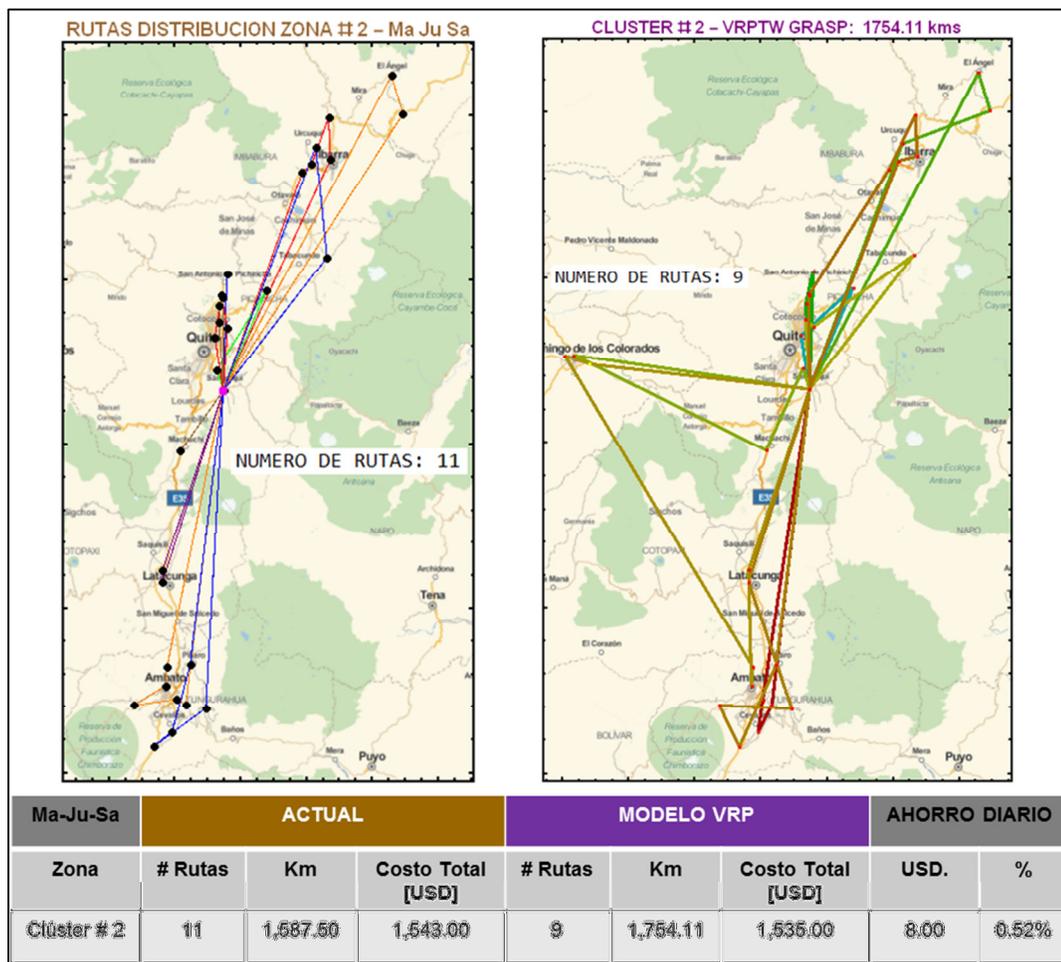


Figura 35. Validación Rutas Clúster # 2: Martes – Jueves – sábado

Dados los resultados encontrados, es de notar que la reasignación implica que el ahorro encontrado en esta zona no sea significativo pero en su defecto se tiene un mayor ahorro en el clúster # 3.

En relación al nivel de aprovechamiento de la flota para el clúster # 2, el modelo permite aprovechar de mejor manera la capacidad instalada de los vehículos, el cual se supera el indicador logrado en el último semestre de 65.01%, llegando a 87.65% para la frecuencia de los días lunes, miércoles y viernes, y 86.78% para la frecuencia de los días martes, jueves y sábado. Es decir, se estima que la real utilización de la flota supere el 80%, muy superior a la política establecida por la organización (70%).

Como se aprecia en la Figura 36, el modelo VRP optimizado para el clúster # 3 (entrega: lunes, miércoles y viernes) logra un recorrido de 2,307 kilómetros a un costo de \$1,593 por día, para un total de 8 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 11, siendo suficiente la utilización de 8; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$220 equivalente al 12.13% sobre el costo actual.

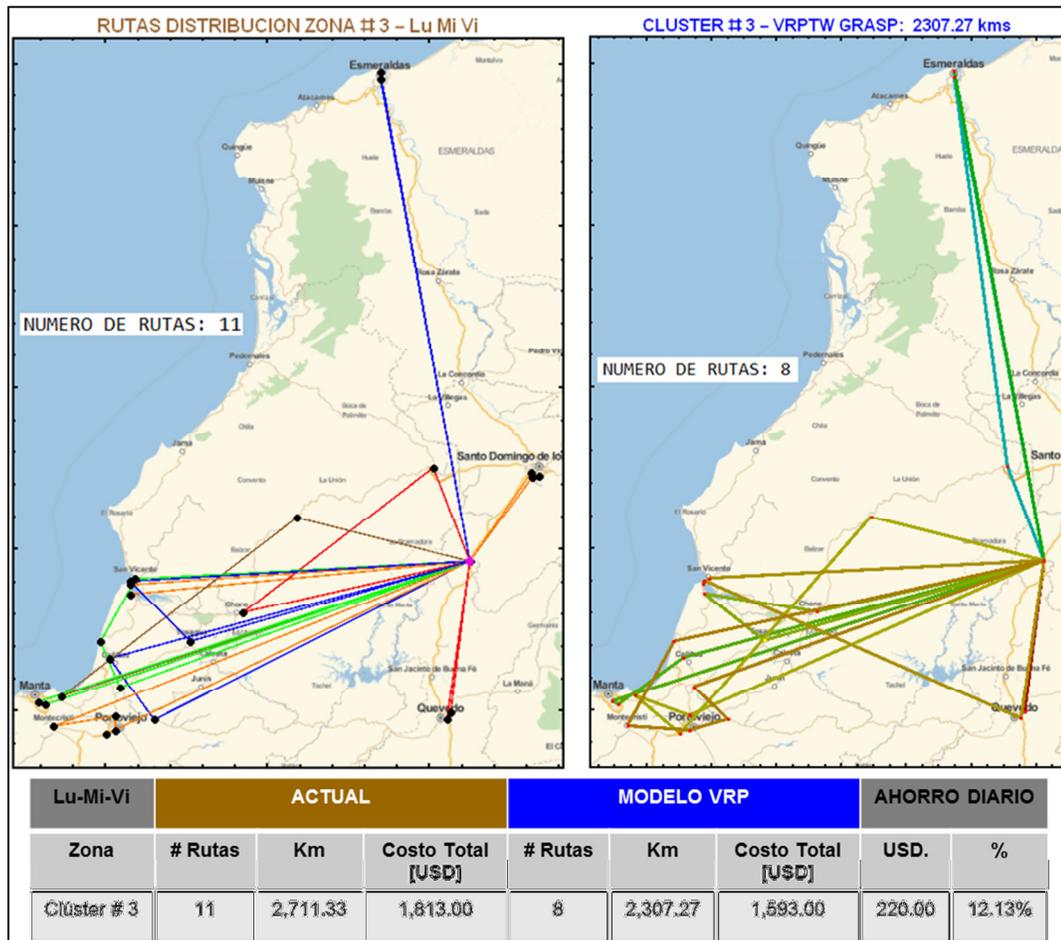


Figura 36. Validación Rutas Clúster # 3: Lunes – Miércoles – Viernes

Como se aprecia en la Figura 37, el modelo VRP optimizado para el clúster # 3 (entrega: martes, jueves y sábado) logra un recorrido de 2,237 kilómetros a un costo de \$1,606 por día, para un total de 8 rutas. En comparación con el modelo actual, el resultado representa una disminución en el número de rutas a contratar, el cual inicialmente requiere de 12, siendo suficiente la utilización de 8; esto implica un ahorro diario en el costo de los fletes de \$472 equivalente al 22.71% sobre el costo actual.

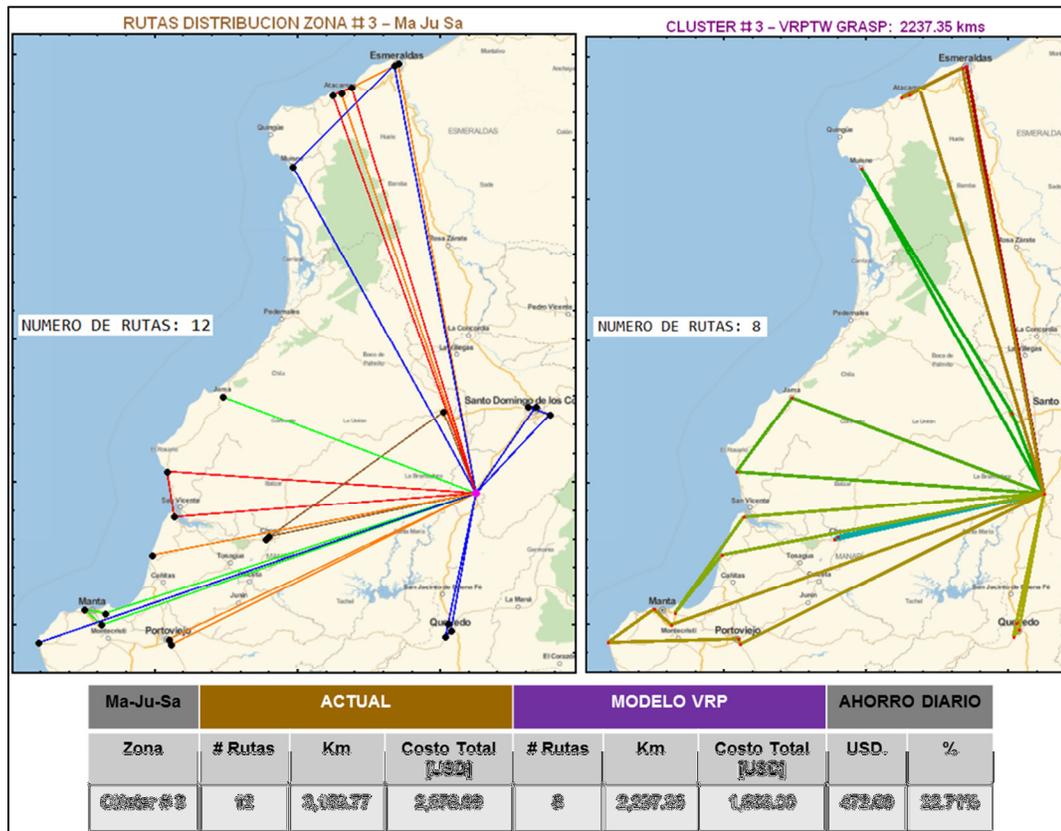


Figura 37. Validación Rutas Clúster # 3: Martes – Jueves – Sábado

En relación al nivel de aprovechamiento de la flota para el clúster # 3, el modelo permite aprovechar de mejor manera la capacidad instalada de los vehículos, el cual se supera el indicador logrado en el último semestre de 64.97%, llegando a 86.60% para la frecuencia de los días lunes, miércoles y viernes, y 87.49% para la frecuencia de los días martes, jueves y sábado. Es decir, se estima que la real utilización de la flota supere el 80%, muy superior a la política establecida por la organización (70%).

El nivel de aprovechamiento general obtenido para toda la flota (3 clústeres) es superior al 85%, resultado que supera ampliamente al promedio logrado en los últimos seis meses bajo el modelo de distribución actual, el cual únicamente llega al 64.55%, incluso supera a la política de la organización establecida en 70%.

Como se detalla en la Tabla 32, el resultado del modelo VRP optimizado permite obtener un ahorro promedio en el costo de distribución de 11.21% para todos los clústeres y en todas las frecuencias de entrega, el mismo que equivale a 3,900 dólares por semana, con el que se mantiene un costo de 0.0334 \$/litro transportado, inferior al 0.0376 \$/litro del modelo actual.

Zona	Frecuencia Entrega	ACTUAL			MODELO VRP			AHORRO DIARIO	
		# Rutas	Km	Costo [USD]	# Rutas	Km	Costo [USD]	USD.	%
Clúster # 1	Lu-Mi-Vi	17	2,274	2,270	14	2,233	2,010	260	11.45%
	Ma-Ju-Sa	15	1,666	2,165	12	2,075	1,945	220	10.16%
Clúster # 2	Lu-Mi-Vi	14	1,925	1,815	11	1,809	1,685	130	7.16%
	Ma-Ju-Sa	11	1,588	1,543	9	1,754	1,535	8	0.52%
Clúster # 3	Lu-Mi-Vi	11	2,711	1,813	8	2,307	1,593	220	12.13%
	Ma-Ju-Sa	12	3,154	2,078	8	2,237	1,606	472	22.71%
Totales		80	13,317	11,684	62	12,415	10,374	1,310	11.21%
\$/litro				0.0376			0.0334		

Tabla 32. Resumen Validación Modelo VRP

Como se evidencia a continuación en la Tabla 33 y suponiendo el peor escenario posible en donde la demanda del mercado para todos los meses no presente estacionalidad, la implementación del algoritmo representaría para la organización un ahorro superior a los 180,000 dólares por año, recursos que pueden ser direccionados a fortalecer otras actividades relacionadas que sirven de soporte para el proceso de distribución a fin de lograr mejores resultados futuros.

Zona	ACTUAL			MODELO VRP			AHORRO ANUAL	
	# Rutas	Km	Costo [USD]	# Rutas	Km	Costo [USD]	USD.	%
Clúster # 1	4,608	567,360	638,640	3,744	620,352	569,520	69,120	10.82%
Clúster # 2	3,600	505,872	483,552	2,880	513,072	463,680	19,872	4.11%
Clúster # 3	3,312	844,560	560,304	2,304	654,336	460,656	99,648	17.78%
Totales	11,520	1,917,792	1,682,496	8,928	1,787,760	1,493,856	188,640	11.21%

Tabla 33. Resumen anual

En relación al nivel de servicio, el modelo VRP optimizado permite cumplir con el 100% de la demanda, dada las ventanas de tiempo de los clientes, los tiempos de viaje de todas las rutas y los tiempos de servicio calculados, a diferencia del modelo actual en donde la gestión de los tiempos no era la adecuada.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones y recomendaciones

En el presente apartado se describen los principales hallazgos de la investigación, en conjunto con las sugerencias para discusión y futuras oportunidades de mejora para la organización en pro de establecer políticas apegadas a la realidad de la industria.

- La investigación permite establecer una base para una adecuada gestión de tiempos, el cual es uno de los principales desencadenantes de la problemática existente.
- Se demostró que los métodos heurísticos generan soluciones aplicables que permiten mejorar los rendimientos sobre aquellos métodos tradicionales.
- El modelo de asignación de rutas para el proceso de distribución fue resuelto satisfactoriamente de acuerdo a lo esperado, esto permitió encontrar una solución óptima al problema específico de la compañía, en el marco de los objetivos propuestos inicialmente.
- Se encontró que la heurística de Clarke & Wright usada en la fase constructiva para encontrar la solución inicial del problema generó soluciones de igual calidad que la metaheurística GRASP, dado que los clústeres contienen un menor número de elementos; sin embargo, queda abierta la implementación para escenarios de mayor tamaño.
- Es de notar que el modelo matemático planteado resulta de gran practicidad, sobre el cual las estrategias de carácter integral y la toma de decisiones en distintos escenarios permiten lograr los rendimientos esperados.

- En la investigación se establecieron las rutas necesarias por cada clúster de acuerdo a la demanda existente en un determinado día, esto no debe ser interpretado como un esquema de rutas rígido, sino más bien un proceso de asignación flexible dadas las condiciones del mercado y las restricciones existentes. De igual manera, es necesario acotar que el modelo desarrollado plantea la reasignación de ciertos clientes a fin de obtener los resultados esperados.
- El proyecto demuestra que las técnicas de programación matemática son útiles dado que permiten realizar una representación apropiada del mundo real, así mismo, en la medida en que se usen con mayor recurrencia se podrá encontrar con cierta facilidad las soluciones apropiadas a problemas complejos de múltiple índole.

De manera general, las recomendaciones están orientadas a mantener una adecuada gestión de los tiempos, considerando que la comprensión de los mismos permitiría lograr una mejor utilización de los recursos disponibles.

Así mismo, se recomienda impulsar y desarrollar estrategias que permitan mejorar la relación comercial con los clientes, en la medida en que se establezcan ventanas de tiempo más flexible que favorezcan a los intereses tanto de los operadores logísticos como de la compañía.

CAPITULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGSO. (01 de 10 de 2017). Recuperado el 25 de 10 de 2017, de http://www.agso.org.ec/?page_id=1376

Beamon, B. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International journal of production economics*, 281-294.

CEPAL. (1996). Competitividad sistémica: nuevo desafío para las empresas y la política. *Revista de la CEPAL*, 39-52.

Dondo, R., & Cerdá, J. (2004). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 1478-1507.

Ekos. (2015). Zoom: Transporte y Logística. *Ekos*, 86-90.

Eksioglu, B., Volkan, A., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computer & Industrial Engineering*, 1473-1483.

El Telégrafo. (18 de 10 de 2014). El Telégrafo. Guayaquil, Guayas, Ecuador. Recuperado el 27 de 11 de 2017, de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/la-produccion-lechera-en-ecuador-genera-1-600-millones-en-ventas-anuales-infografia>

Feo, T., & Resende, M. (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 109-133.

Glover, F. (1977). Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints. *Decision Sciences*, 156-166.

Glover, F. (1989). Tabu Search - Part I. *ORSA Journal on Computing*, 190-206.

Hopfield, J., & Tank, D. (1985). "Neural" Computation of Decisions in Optimization Problems. *Biological Cybernetics*, 141-152.

Horna, L., Guachamin, M., & Osorio, N. (2009). *Repositorio Digital - EPN*. Recuperado el 19 de 10 de 2017, de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5543>

INEC. (15 de 01 de 2017). *Encuesta de producción agropecuaria continua*. Recuperado el 22 de 11 de 2017, de Instituto Nacional de Estadísticas y Censos: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-produccion-agropecuaria-continua/>

Kontoravdis, G., & Bard, J. (1995). A GRASP for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *ORSA Journal on Computing*, 10-23.

Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 345-346.

Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1087-1092.

MTOP. (12 de 12 de 2016). *Un cambio integral en la vialidad del Ecuador*. Obtenido de Ministerio de Transporte y Obras Públicas: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/12/PR_Vialidad-del-Ecuador.pdf

Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*. Montevideo: UR. FI – INCO.

Restrepo, J., Medina, P., & Cruz, E. (2008). Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). *Scientia et Technica*, 229-234.

Revista Lideres. (11 de septiembre de 2016). *El transporte de carga pesada registra caída en las ventas*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <http://www.revistalideres.ec/lideres/transporte-pesado-caida-ventas-economia.html>

Revista Líderes. (31 de 01 de 2017). *Líderes*. Recuperado el 27 de 11 de 2017, de <http://www.revistalideres.ec/lideres/ventas-lacteos-mejoraron-produccion-industria.html>

Rochat, Y., & Taillard, É. (1995). Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing. *Journal of Heuristics*, 147-167.

Solomon, M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 254-265.

Soto, D., Soto, W., & Pinzón, Y. (2008). Una metaheurística híbrida aplicada a un problema de planificación de rutas. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 135-144.

Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 341-359.

Tetra Pak. (2014). Dairy Supply and Demand. *Tetra Pak Dairy Index*, 1.

Toth, P., & Vigo, D. (2001). *The Vehicle Routing Problem*. Bologna: SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.

Uribe, R., Solar, R., Brisaboa, N., Pedreira, O., & Seco, D. (2008). Clustering-based similarity search in metric spaces with sparse spatial centers. *SOFSEM 2008: Theory and Practice of Computer Science*, 186-197.

Vidal, C., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 1-18.

Xu, Y., Wang, L., & Yang, Y. (2012). A New Variable Neighborhood Search Algorithm for the Multi Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows. *SciVerse Science Direct*, 289-296.

Yepes, V. (21 de mayo de 2002). *Dialnet*. Recuperado el 24 de octubre de 2017, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=9738>