



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL

**HEURÍSTICA BASADA EN GENERACIÓN DE COLUMNAS PARA EL  
PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE  
TIEMPO Y FLOTA HOMOGENEA  
CASO: CERVECERIAS CHILE S.A.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE  
OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
INDUSTRIAL

**BLAS ERNESTO DUARTE ALLEUY**

PROFESORES GUIA  
PABLO REY  
CRISTIAN CORTES CARRILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
RICHARD WEBER HAAS  
FERNANDO ORDOÑEZ PIZARRO

SANTIAGO DE CHILE  
AGOSTO, 2009



## **AGRADECIMIENTOS**

Ha sido un camino largo, en el cuál se han presentado dificultades y problemas. Cada uno de estas dificultades han sido grandes aportes en esta tesis ya que permitieron darle más valor a su forma y contenido.

Agradezco a cada una de las personas que participaron en este proceso de formación. A mi mujer, María Raquel, por ser ella mi fuerza y apoyo para salir adelante y por su particular forma, a veces incomprendida, de darme aliento para seguir adelante. Amor sin tu apoyo y confianza no podría haberlo logrado.

A mis padres, que formaron mi carácter y me dieron valores que me permitieron ser la persona que soy. A mis hermanos que con sus mañas y cariño me dieron a entender que siempre estarán ahí. A mis abuelas que con su apoyo silencioso me dieron la fuerza en esas noches que más lo necesitaba.

A mis profesores guía, Pablo y Cristián, por su paciencia y apoyo incondicional para la obtención de estos resultados.

A mis amigos que siempre estuvimos juntos en las buenas y en las malas. A todos los que no alcancé a nombrar, los tengo presentes y sé que estaban por si los necesitaba.

A Chonzo, por que llegó a mi vida en el momento que más lo necesitaba. Sin ti no tendría un perro que me acompañe en esas largas noches de trabajo.

# HEURÍSTICA BASADA EN GENERACIÓN DE COLUMNAS PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO Y FLOTA HOMOGÉNEA

CASO: CERVECERIAS CHILE S.A.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una heurística que mejora los resultados operacionales en el despacho de pedidos de cerveza. Este trabajo está, especializado en las características de CERVECERÍAS CHILE S.A., empresa dedicada a la elaboración y transporte de cervezas a lo largo de todo Chile.

La problemática diaria que se aborda en este proyecto consiste en la asignación de 400 clientes, en promedio, a rutas específicas de entrega, tomando en cuenta una flota homogénea de vehículos y restricciones horarias en la entrega de los pedidos. Se considera que la demanda de los productos es conocida y que los productos están disponibles para la entrega. Es importante notar que en este problema no existe una limitante en el número de vehículos disponibles para la entrega del producto, debido a que la empresa tiene una gran variedad de proveedores de transporte que facilitan el arrendamiento de vehículos.

La formulación de la heurística desarrollada asegura el cumplimiento de las restricciones temporales en la entrega de productos y además minimiza los costos asociados al transporte diario de los productos para satisfacer la demanda de los clientes. La solución del problema se enfrentó con la técnica de Generación de Columnas. La base de esta metodología es dividir el problema en dos etapas: La primera etapa considera la generación de rutas factibles conocida como Sub Problema, y una segunda etapa la formulación de un problema de programación lineal que escoge mediante un modelo de optimización las soluciones que serán consideradas como rutas factibles para el despacho de los pedidos. Estas rutas corresponden a aquellas que tienen un costo reducido negativo para mejorar la función objetivo. El modelo decide qué cliente es asignado a cada viaje y horarios en que se realiza dicho viaje.

El modelo se aplicó a datos que representan situaciones reales analizando principalmente el comportamiento de los resultados entregados por la heurística respecto a la configuración de rutas generadas y a la naturaleza de las rutas factibles generadas. El resultado final de la heurística utilizada contempla un aumento en el nivel de servicio, dado que logra entregar los pedidos cumpliendo las restricciones horarias de los clientes. Lo anterior refleja también una mejora de un 50% aproximadamente en las utilidades de los pedidos diarios.

... A mi compañera de toda la vida y a mi compañero fiel...  
... que son los gestores de esto...  
... A mis padres, hermanos, abuelas y suegros...  
...y además a todos aquellos que creían que no lo lograría...  
...Lo que más cuesta es lo que más se valora...

## INDICE

<b>MOTIVACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
2.1 OBJETIVOS GENERALES .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>20</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	20
3.1.1 HISTORIA DE CERVECERÍAS CHILE .....	20
3.2 ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA .....	23
3.2.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	24
3.2.2 PRODUCTO Y DEMANDA.....	26
3.2.3 CLIENTES.....	27
3.2.4 DEPOSITOS .....	30
3.2.5 VEHICULOS .....	31
3.2.6 COSTOS .....	31
3.2.7 TIEMPOS DE ESPERA Y DESCARGA.....	32
<b>4. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>34</b>
4.1 RUTEO DE VEHICULOS .....	34
4.2 MEJORAMIENTO DE SOLUCIONES .....	39
4.3 METAHEURISTICAS.....	40
4.4 GENERACION DE COLUMNAS .....	43
<b>5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>51</b>
5.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	51

5.2 CONSIDERACIONES AL MODELO MATEMÁTICO .....	51
5.3 MODELO MATEMÁTICO.....	54
<b>6. DEFINICIÓN DEL MODELO DE DATOS .....</b>	<b>61</b>
6.1 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN .....	61
6.2 FILTROS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN .....	66
<b>7. IMPLEMENTACION DEL MODELO .....</b>	<b>67</b>
7.1 ENFOQUE DE SOLUCIÓN .....	67
7.2 PROBLEMA MAESTRO .....	71
7.3 GENERACION DE RUTAS.....	75
<b>8. SOLUCION DEL MODELO.....</b>	<b>93</b>
8.1 INSTANCIA DE PRUEBA.....	93
8.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS .....	100
<b>9. VALIDACIÓN DEL MODELO.....</b>	<b>105</b>
<b>10. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FUTURAS.....</b>	<b>107</b>
<b>11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>112</b>
<b>12. ANEXOS.....</b>	<b>118</b>
12.1 DISTRIBUCION DE CLIENTES .....	118
12.2 DISTRIBUCION DE VENTANAS DE TIEMPO .....	120
12.3CLIENTES INSTANCIA DE PRUEBA.....	122
12.4 RESULTADOS INSTANCIA DE PRUEBA.....	125
12.5 CONFIGURACION DE COSTOS FIJOS .....	126
12.6 RESULTADOS INSTANCIA DE PRUEBA.....	129
12.7 RESULTADOS INSTANCIA REAL .....	132
12.8 COMPARATIVO DE RESULTADOS INSTANCIA REAL.....	135

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de generación de rutas.....	25
Figura 2: Distribución Gráfica de Ventanas de Tiempo .....	29
Figura 3: Marco general del método de Generación de Columnas.....	48
Figura 4: Visión Gráfica de Sistema de Información .....	62
Figura 5: Distancia entre Clientes .....	63
Figura 6: Transformación de tiempos .....	67
Figura 7: Esquema Generación de Columnas .....	70
Figura 8: Gráfica de columnas (rutas) generadas por Sub-Problema .....	71
Figura 9: Metodología de solución .....	75
Figura 10: Estructura rutas iniciales.....	76
Figura 11: Cálculo de costos reducidos .....	77
Figura 12: Generación de rutas factibles.....	78
Figura 13: Inicialización de Rutas.....	79
Figura 14: Condición de infactibilidad de ventana inferior .....	80
Figura 15: Condición de infactibilidad de ventana superior .....	81
Figura 16: Condición capacidad.....	81
Figura 17: Condición de utilización de clientes.....	82
Figura 18: Condición fin de jornada .....	82
Figura 19: Heurística de Generación de Ruta (Vista Gráfica) .....	87
Figura 20: Mejoramiento Rutas .....	88
Figura 21: Intercambio 2-Opt en Ruta .....	88
Figura 22: Intercambio Secuencial de Clientes.....	89
Figura 23: Validación Costo Reducido Negativo .....	90
Figura 24: Criterio de Parada según Costo Reducido .....	91
Figura 25: Evolución del Tiempo de Proceso según número de clientes .....	94



Figura 26: Distribución de Clientes (Pedido Real) .....	95
Figura 27: Distribución de Clientes Comuna 1 (Instancia de Prueba) .....	95

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Configuración de Ventanas de Tiempo de Entrega .....	29
Tabla 2: Tiempos de Espera y Descarga Promedio por Tipo de Clientes .....	33
Tabla 3: Distribución de tiempos de descarga según tipo de cliente .....	65
Tabla 4: Distribución de tiempos de espera según tipo de cliente .....	65
Tabla 5: Factibilidad de Ingreso de Clientes a Ruta .....	83
Tabla 6: Método de Cálculo del Costo de Clientes a Ingresar a la Ruta .....	85
Tabla 7: Resultados Metodología Actual (Instancia de Prueba).....	96
Tabla 8: Resumen de Costos Fijos .....	98
Tabla 9: Resumen de Costos para la instancia de pruebas.....	99
Tabla 10: Distribución de Costos - Metodología Actual .....	100
Tabla 11: Configuración Rutas - Metodología Actual vs Propuesta .....	102
Tabla 12: Comparativo - Metodología Actual vs Propuesta.....	103
Tabla 13: Distribución de Clientes por Tipo.....	118
Tabla 14: Agrupación de Comunas.....	118
Tabla 15: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas.....	118
Tabla 16: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas de Zona Nor-Oriente .....	119
Tabla 17: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Sur-Oriente .....	119
Tabla 18: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Sur-Poniente .....	119
Tabla 19: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Nor-Poniente .....	120

Tabla 20: Distribución de Restricciones Temporales para la entrega de pedidos .....	121
Tabla 21: Clientes considerados para la instancia de prueba.....	124
Tabla 22: Detalle de Rutas según Metodología Actual - Instancia de Prueba..	125
Tabla 23: Costo por concepto de remuneraciones .....	126
Tabla 24: Costo por concepto de indumentaria .....	127
Tabla 25: Costo por patentes y mantención .....	128
Tabla 26: Detalle de Costos según Metodología Actual - Instancia de Prueba	129
Tabla 27: Detalle de Costos según Metodología Propuesta - Instancia de Prueba .....	130
Tabla 28: Detalle según Metodología Propuesta –Instancia de Prueba.....	131
Tabla 29: Detalle de Utilidades según Metodología Actual - Validación del Modelo.....	132
Tabla 30: Detalle de Utilidades según Metodología Propuesta - Validación del Modelo.....	133
Tabla 31: Detalle de Rutas según Metodología Propuesta – Validación del Modelo.....	134
Tabla 32: Cuadro Comparativo de Resultados - Metodología Actual versus Metodología Propuesta.....	135

## MOTIVACIÓN

Actualmente una de las actividades más importantes en la economía, es el transporte de cualquier tipo de mercancía. Una de las forma de ejemplificar esto es revisando los datos que se presentan a nivel mundial en dónde se documenta que cerca de un 10% de los costos, corresponden a aspectos logísticos [1].

Puesto que el ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW por sus siglas en inglés) es un problema muy habitual en muchos sistemas de distribución. Este tema involucra un gran número de decisiones tales como el diseño de las rutas y la configuración de la flota que abastecerá la demanda de los clientes de la empresa. Conjugando lo anterior con el concepto respetar la naturaleza de ventanas de tiempo que dan los clientes para ser atendidos y la consideración de tener rutas de gran tamaño en la operatividad de las actividades de la empresa, proporciona un acercamiento a la realidad muy interesante de desarrollar utilizando modelamiento matemático.

Desde hace mucho tiempo el problema de ruteo de vehículos sin mayores restricciones, con restricciones horarias en las entregas y con flotas homogéneas han tenido un gran auge estos últimos 10 años. Sin embargo, el modelamiento de problemas con gran cantidad de clientes por ruta ha atraído mucho menos la atención, dado que es mucho más difícil de resolver que el clásico problema de ruteo por la mayor cantidad de recursos computacionales que se necesitan.

Además es bien sabido que el nivel de costos de combustible y mano de obra aumenta de manera sostenida en el tiempo. Luego, el generar una metodología que busque generar ahorro en los costos actuales de la empresa y mejore la

estructura de planificación operacional de la misma, da el punto inicial para el desarrollo del presente proyecto ya que esto se representará directamente en el nivel de servicio entregado por la compañía.

El principal punto de motivación contempla el desarrollo de una metodología que involucre el ruteo de una gran cantidad de clientes en tiempos aceptables de solución, combinando metodologías que se están desarrollando actualmente como la Generación de Columnas junto con otras que llevan tiempos desarrollados como la metodología GRASP o Mejoramiento de Rutas (2-opt). En la literatura actual no se presenta un gran desarrollo de ruteos que involucre una gran cantidad de clientes por ruta o que mezcle aspectos de Generación de Columnas con un número grande de clientes por ruta, lo que conlleva a generar un aporte sustancial al modelamiento de situaciones reales.

Enfocado en esta motivación que se invita al lector a entender, interpretar y comentar la metodología utilizada en el desarrollo del problema. Además se invita a utilizar esta metodología como base para futuras investigaciones en el tema y generar comentarios en pos de obtener mejores resultados en el futuro.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un problema de ruteo de vehículos consiste en un conjunto de clientes y depósitos (bodegas) geográficamente dispersos y una flota de vehículos que pueden tener capacidades similares o diferentes. El objetivo de este trabajo es determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, que visiten a los clientes y hagan la entrega de productos.

Esta problemática está ampliamente presentada en la mayoría de las industrias actuales, abarcando desde la distribución de mercadería hasta el diseño de la flota de vehículos. Es por esto que un esfuerzo centrado en una buena planificación de flota puede significar considerables ahorros en costos. El desarrollo de la Investigación de Operaciones en la aplicación de sistemas exitosos y la creciente importancia de los temas logísticos en la gestión de las empresas se conjugan abriendo un amplio espacio para poder desarrollar modelos de programación matemática que se conviertan en un apoyo a las operaciones diarias. Este enfoque permite desarrollar planificaciones eficientes en las entregas de productos para un conjunto amplio de clientes llegando a significar grandes ahorros en costos, que llegan a ser entre un 10% y un 20% del costo final de los bienes [1].

Sin embargo, en el mundo real muchas compañías se enfrentan al transporte de diversos productos y consideran algunas particularidades del sistema. En ese sentido, desde bastante tiempo se ha visto un enorme esfuerzo por resolver estos problemas. En 1959, Dantzig y Ramser [2] realizaron por primera vez una formulación del problema para una aplicación de distribución de combustible.

Cinco años más tarde, Clarke y Wright [3] propusieron el primer algoritmo que resultó efectivo para su resolución: el popular Algoritmo de Ahorros. A partir de estos trabajos, el área de Ruteo de Vehículos ha crecido de manera explosiva. Por un lado, hacia modelos que incorporen cada vez más características de la realidad, y, por otro lado, en la búsqueda de algoritmos que permitan resolver los problemas de manera eficiente.

Sin embargo, el interés que reviste esta área no es meramente de carácter práctico. Los problemas de ruteo de vehículos son problemas de optimización combinatorial y pertenecen en su mayoría, a la clase NP-Complejos. La motivación académica por resolverlos radica en que no es posible construir algoritmos que en tiempo polinomial resuelvan cualquier instancia del problema, a no ser que  $P = NP$ .

En base a los antecedentes anteriores el objetivo central del presente trabajo es desarrollar una heurística que apoye las decisiones para el problema de transporte de productos considerando flotas con características de capacidad homogéneas y clientes con restricciones horarias en la entrega mediante una metodología de Generación de Columnas.

La Generación de Columnas consiste en considerar un subconjunto de rutas factibles del problema para encontrar la solución óptima. Este subconjunto de rutas factibles se va actualizando iterativamente tomando en cuenta los valores de un indicador de costo asociado a la ruta. Este indicador de costo de las rutas generadas nos indica indirectamente cuál es el costo de oportunidad asociado a ingresar un cliente a una nueva ruta. Dado esto es que se consideran aquellos casos en los cuales la ruta (considerado como una configuración secuencial de

clientes) genere costos que mejoren la configuración general. De esta manera se encuentra una forma de no considerar el problema completo para resolver el problema, sino que se consideran aquellas rutas factibles de menores costos existentes en el problema.

La base de esta metodología es dividir el problema en dos etapas: La primera etapa considera la generación de soluciones factibles conocida como Sub Problema, y una segunda etapa la formulación de un problema de programación lineal que escoge mediante un modelo de optimización las soluciones que serán consideradas en un conjunto de soluciones factibles previamente definidas. En cada iteración del modelo una solución es generada y pasa a formar parte del conjunto de soluciones que pueden ser escogidas por el Problema Maestro. En base a este subconjunto de “mejores” soluciones el Problema Maestro soluciona el problema de forma entera.

En esta tesis se analiza un problema particular aplicable en la empresa Cervecerías Unidas S.A., para esto se considera una heurística para poder determinar las características de la flota de vehículos que realizará la entrega junto con determinar los instantes de tiempo en los cuáles se desarrolla tal entrega, de manera de disminuir los costos asociados a esta labor. Para esto se revisó una gran variedad de bibliografía que involucra desde el concepto general del problema de ruteo de vehículos hasta metodologías diversas de solución ya sea a nivel de algoritmos exactos como heurísticas de aproximación de soluciones.

La estructura del presente trabajo se configura de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se presentan los objetivos que se pretenden alcanzar basados en el



desarrollo de este tema. En el Capítulo 3 se presentan los lineamientos generales de la metodología que se utilizará a lo largo del informe. En el Capítulo 4 se presenta la descripción de la empresa en la cual se desarrolla el caso y a su vez el alcance que tiene este proyecto. En el Capítulo 5 se detalla los antecedentes recabados para abordar el problema, lo cuál es la revisión de trabajos anteriores que tengan relación con el problema estudiado. En el Capítulo 6 se detalla el modelo asociado al ruteo de vehículos que se debe utilizar para aterrizar el problema. En este capítulo se detallan variables, restricciones, parámetros y función objetivo del problema general. En el Capítulo 7 se detalla la especificación en el formato de los datos requeridos para realizar los análisis. En el Capítulo 8 se presenta la metodología de solución y algunos resultados obtenidos para diferentes instancias. En el Capítulo 9 se presenta la validación del modelo en base a una comparación con la práctica realizada actualmente. En el Capítulo 10 se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen algunas consideraciones futuras que sería interesante abordar de manera que se desarrolle una mayor profundidad en este problema. En el Capítulo 11 se detalla la bibliografía utilizada para desarrollar el marco metodológico de este trabajo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GENERALES**

El objetivo presentado en este proyecto es desarrollar un método heurístico basado en un modelo de Generación de Columnas que soporte las decisiones para el diseño de rutas para la atención de un grupo de clientes con restricciones temporales de entrega, con el fin de encontrar la asignación de menor costo que permita mejorar los niveles de servicio de la compañía.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Proponer un modelo basado en el algoritmo de Generación de Columnas como una estrategia para la resolución de los modelos de ruteo de vehículos, con ventanas de tiempo, que surgen en los mercados que involucran rutas largas.
- Construir e implementar un modelo matemático que represente el sistema al cuál se enfrenta la empresa al momento de generar la configuración de flota y la asignación de clientes a las rutas de entrega diariamente.
- Definir una función objetivo que represente los elementos principales de los costos involucrados en el ruteo para la empresa.

- Determinar las variables de decisión relevantes en un problema de ruteo de vehículos.
- Especificar el conjunto de datos e identificar las fuentes de información necesarios para la aplicación de la metodología propuesta.
- Encontrar soluciones factibles cercanas al óptimo en tiempos de procesamiento satisfactorios.
- Realizar un análisis que permita identificar aquellos factores que afectan de forma significativa los resultados del modelo propuesto.
- Generar líneas de acción según los resultados obtenidos y proponer otras posibles metodologías de solución que podrían ser una mejora a la solución del problema.

A continuación se procede a desarrollar una metodología de solución que permita alcanzar cada uno de los objetivos antes planteados.

### **3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA<sup>1</sup>**

En esta sección se detalla el marco conceptual en el cuál se desarrolla el problema planteado, identificando los factores que determinan su estructura. Para lo anterior, se presenta una descripción general de Cervecerías Chile S.A., perteneciente al grupo QUINSA S.A. e INBEV S.A, y su forma de distribución y venta de bebidas alcohólicas en el país.

##### **3.1.1 HISTORIA DE CERVECERÍAS CHILE**

El grupo QUINSA S.A. es un holding que controla el 93% de Quilmas Internacional, el resto de la participación en el holding está en manos de la Compañía de Bebidas de América (AmBev).

QUINSA S.A., controla el negocio cervecero en cinco países de Latinoamérica. Sus marcas de cerveza son fuertes líderes en el mercado de Argentina, Bolivia, Paraguay y Uruguay y tienen un nivel menor de presencia en Chile.

---

<sup>1</sup> La información recabada en este capítulo corresponde a información publicada en la página del holding QUINSA S.A. ([www.quinsa.com](http://www.quinsa.com)) y en base a revisión de noticias relacionadas con la empresa en [www.emol.com](http://www.emol.com) y [www.diariofinanciero.cl](http://www.diariofinanciero.cl)

Las operaciones en el mercado de cervezas de Chile se realizan a través de Cervecerías Chile S.A., en la cual se tiene el 100% de la propiedad de la empresa. Desde el año 1990 se comienza a generar una de las plantas embotelladoras más modernas e importantes dentro del mercado de las cervezas de Chile.

### **3.1.2 MARCO ORGANIZACIONAL**

Cervecerías Chile S.A. es una compañía socialmente responsable, cuyo compromiso se expresa principalmente en acciones orientadas al cuidado del medio ambiente, donaciones, optimización de los recursos, capacitación del personal y grandes políticas de seguridad para sus empleados.

La existencia de un código organizacional genera una herramienta útil para alinear las comunicaciones y acciones de marketing hacia un uso correcto de los productos y marcas, asegurando, además, que dichas actividades estarán dirigidas solo a personas mayores de 18 años.

En este marco, el código organizacional provee los principios generales y pautas estándar de comunicación, con el objeto que sus lineamientos sean de aplicación para todas las formas de comunicar y promocionar sus marcas bajo un concepto de consumo responsable.

El marketing y la comunicación comercial, cumplen un rol importante en el éxito de su economía de mercado. Las actividades de marketing desarrolladas por la empresa promueven la competencia, permitiendo al consumidor poder

elegir entre diferentes marcas, como así también permite la comunicación de nuevos productos para los consumidores.

### **3.1.3 MERCADO Y VENTAS**

Cervecerías Chile S.A. actualmente tiene una participación relevante dentro del mercado cervecero en Chile alcanzando un 10% de participación de mercado en las ventas de cerveza. El principal competidor y líder de mercado es la Compañía Cervecerías Unidas la que alcanza un 89% de la participación del mercado dejando pequeños márgenes para otras empresas existentes, especialmente importadores.

Los volúmenes de venta promedios de Cervecerías Chile alcanzan los 430.000 Hectolitros anuales, mientras que los ingresos que se alcanzan son de aproximadamente 22,0 millones de dólares.

Esta participación de mercado se justifica por la gran cantidad de puntos de ventas que existen en Chile, alcanzado aproximadamente las 13.300 localidades. Del total de las ventas realizadas se puede concluir que cerca del 30% se realizó vía Supermercados, un 13% en Pub's y cerca del 57% en botillerías a lo largo de todo Chile.

Las ventas se desarrollan en dos de sus principales marcas: Becker y Báltica. La primera marca conlleva cerca del 22% de las ventas totales.

### **3.1.4 ESTRUCTURA DE DISTRIBUCIÓN**

Cervecerías Chile al poseer sólo una embotelladora, la cual está ubicada en la ciudad de Santiago, genera que el producto llega a los depósitos de regiones por medio de vehículos con acoplados que llevan o transportan el producto a los distintos depósitos de la empresa, luego de allí se distribuye el producto a través de los vehículos que realizan las entregas dentro de las ciudades. El centro de distribución considerado para los efectos de este trabajo se encuentra en la comuna de Quilicura. Otros lugares en donde se ubican los depósitos de la cervecera a nivel regional son: La Serena, Valparaíso, Talca, Rancagua, Concepción y Temuco.

Una vez desarrollado un matiz de lo que implica la empresa, se comienza a desarrollar los antecedentes presentes en la problemática a resolver.

### **3.2 ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA**

El desarrollo del trabajo actual se basa principalmente en conseguir una forma para generar el plan de ruteo para las órdenes de pedido que se generan en CERVECERIAS CHILE S.A. día a día. Antes de comenzar con el desarrollo de la solución de este problema es necesario identificar los componentes principales que participan en el sistema.

En términos generales un problema de ruteo de vehículos consiste en determinar un conjunto de rutas de costo mínimo y la configuración de una flota de

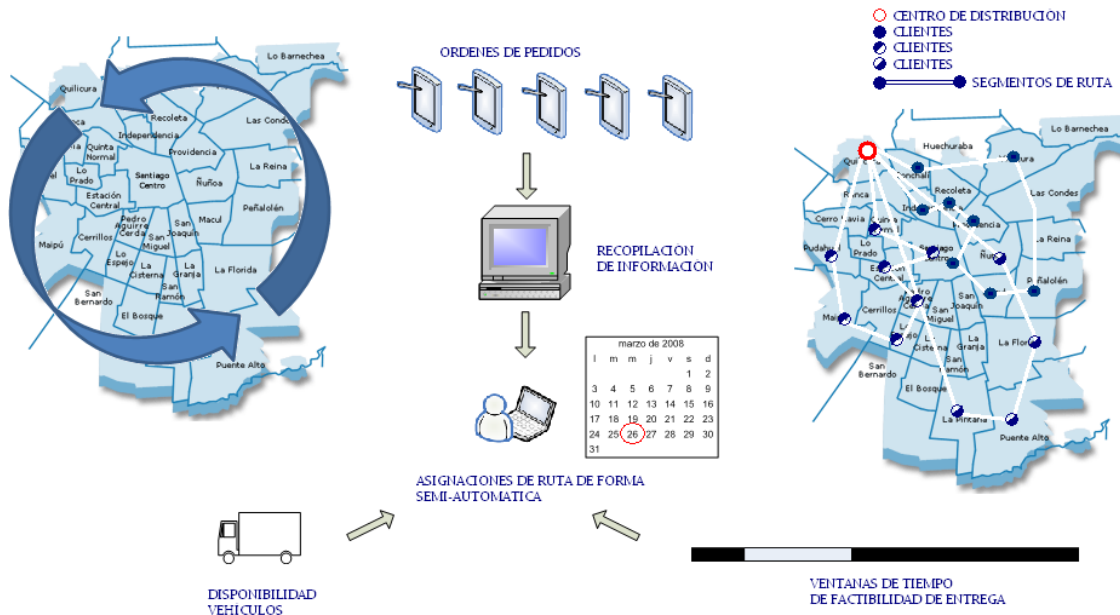
vehículos que realicen el despacho para un conjunto dado de clientes dispersos geográficamente. Las características de los clientes definen diversas restricciones operativas sobre las rutas que deben ser considerados para definir de manera correcta la variante existente del problema de ruteo.

Para ello se detalla a continuación los ítems más importantes presentes en el sistema de distribución de la compañía. Entre estos aspectos se mencionan: el proceso de distribución, el tipo de producto y demanda transportada, los clientes y sus características, los depósitos, los vehículos utilizados en el despacho, los recursos que se tienen para generar la operación diaria y los costos involucrados.

### **3.2.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN**

El sistema o proceso de distribución se compone de cuatro etapas: búsqueda de pedidos, ingreso de la información, generación del ruteo y el despacho.





**Figura 1: Proceso de generación de rutas**

La etapa de búsqueda de pedidos corresponde esencialmente a la visita de los vendedores de CERVECERIAS CHILE S.A. a los clientes, de manera de obtener el pedido de producto que realizarán para una fecha establecida. Estos pedidos son registrados de manera electrónica en PDA's o Notebook que manejan los vendedores. Una vez terminada la ruta asignada para los vendedores estos llegan al centro de distribución para dejar el registro de las órdenes de pedidos generadas en el día. Lo anterior corresponde a la segunda etapa. Luego estas órdenes de pedido son centralizadas en un servidor, desde el cuál un encargado se preocupa de descargar la información de los pedidos a repartir en el siguiente día.

Tomando en cuenta la información de los pedidos de los clientes, se determinan las ventanas de tiempo disponibles para la entrega. Junto con eso se genera el ruteo de los vehículos. La metodología de ruteo se basa en la utilización de un software propio de la empresa que mediante una disposición geográfica de los

clientes seleccionados para el despacho se van generando rutas en base a la experiencia de la persona encargada. Este proceso involucra una cantidad aproximada de 2 a 4 [HH] diariamente.

Una vez obtenidas las rutas necesarias para satisfacer las órdenes de despacho se procede a revisar la cantidad necesaria de vehículos para satisfacer tal demanda. Actualmente el sistema de transporte de CERVECERIAS CHILE S.A. es de carácter externo y participan alrededor de 6 a 7 empresas transportistas de Santiago con una flota que varía entre los 15 y 34 vehículos por cada uno, dependiendo de período del año en el que se esté trabajando. Por lo tanto un proceso que mejore la calidad de las rutas generadas logrará generar economías de escala tanto en el tiempo destinado para la generación de las rutas como para el costo involucrado en el arriendo de los vehículos.

El enfoque de este proyecto involucra desde la etapa de centralización de los datos y la generación de rutas. Las etapas anteriores no se consideran dentro del alcance de este proyecto.

### **3.2.2 PRODUCTO Y DEMANDA**

CERVECERIAS CHILE S.A., como empresa cervecera elabora y distribuye cervezas, entre ellas se destacan dos productos importantes: Becker y Báltica. Dentro de los productos mencionados se pueden encontrar diferentes configuraciones diferenciadas por el tipo de formato seleccionado, entre ellos están: Envases de litro, envases de 200cc, latas, etc.

Al momento de generar la modelación se considerará el producto despachado en unidades de cajas de cerveza independiente del formato de entrega que se haya convenido. El estudio de la mejor disposición de la entrega está fuera del alcance de este proyecto.

### **3.2.3 CLIENTES**

CERVECERIAS CHILE S.A. tiene una amplia gama de clientes que se distribuyen a lo largo del país considerando una gran porción de ellos en la región metropolitana. Actualmente en el país se estima una cantidad aproximada de 6.200 clientes, distribuidos en 200 Supermercados (3,2% del total de clientes), 1.000 Pub's (16,1% del total de clientes) y 5.000 Botillerías (80,7% del total de clientes). En nuestro problema se considera la base de clientes de la Región Metropolitana la cual contempla una cantidad de 4.523 clientes distribuidos en un 4,1% de Supermercados, un 16,9% de Pub's y un 79,0% de Botillerías. Estos clientes son clasificados dependiendo de las comunas en las que están establecidos. Este punto es muy importante pues es un criterio relevante para el desarrollo en la metodología de ruteo de vehículos adoptada por la empresa.

En la sección de Anexos, se presenta un análisis exploratorio de la configuración de clientes que tiene la empresa para su estudio. Se presenta la distribución de clientes por tipo, la agrupación de comunas y la distribución de clientes por tipo y comuna.

Ahora bien, un punto interesante es que la distribución de los clientes está inversamente relacionada con el nivel de demanda generada. Esto es que a pesar de que el número de supermercados es el menor, en cantidad generan gran parte de la demanda de cerveza y el uso de los vehículos. Además el alcance de este trabajo contempla el grupo de clientes distribuidos en la Región Metropolitana. Es importante notar que esta región abarca cerca del 60% de las órdenes de pedido recibidas diariamente.

Es importante describir que el desarrollo del presente trabajo involucra la generación de rutas a mínimo costo para un conjunto de clientes. Estos clientes son aquellos que generan órdenes de despacho para un día determinado. El nivel de cartera de clientes que se satisface diariamente se distribuye aproximadamente de la siguiente manera: 40 Supermercados, 150 Pub's y 360 Botillerías<sup>2</sup>.

Un aspecto importante a considerar en el grupo de clientes que tiene la empresa es la existencia de ventanas de tiempo para las entregas de productos. A modo de ejemplo se presenta una distribución de ventanas de entrega para la cartera de clientes.

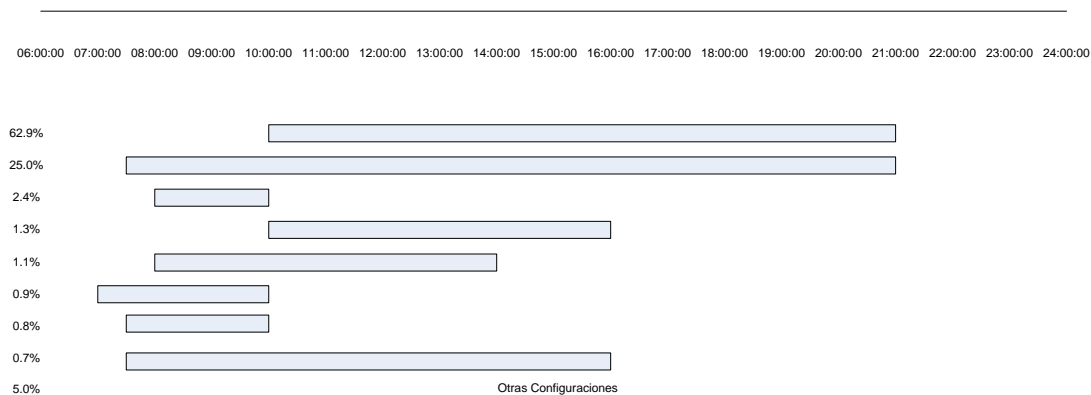
---

<sup>2</sup> Esta distribución varía dependiendo del día en el que se generará el despacho. Un ejemplo claro es que en los días de fin de semana el nivel de pedidos de los pub's y botillerías tienden a ser mayores.

Hora Inicio	Hora Fin	Cantidad de Clientes	%
10:00:00	21:00:00	2845	62.9%
7:30:00	21:00:00	1130	25.0%
8:00:00	10:00:00	107	2.4%
10:00:00	16:00:00	57	1.3%
8:00:00	14:00:00	48	1.1%
7:00:00	10:00:00	40	0.9%
7:30:00	15:00:00	38	0.8%
7:30:00	16:00:00	31	0.7%
Otras Configuraciones		227	5.0%

**Tabla 1: Configuración de Ventanas de Tiempo de Entrega**

En la figura 3 se puede apreciar que la gran mayoría de los clientes tienen una amplia ventana de tiempo para ser despachados. Además se debe considerar que cada demanda relacionada a un cliente debe ser entregada en solo un viaje. Estos ámbitos son muy importantes a considerar para el modelamiento dado que la existencia de ventanas de tiempo tan amplias y traslapadas, y la satisfacción de la demanda dificulta el desarrollo de la metodología a emplear.



**Figura 2: Distribución Gráfica de Ventanas de Tiempo**

En la figura 3 se puede apreciar que las restricciones temporales para las entregas de productos están concentradas dentro de las ventanas [10:00:00 AM –

21:00:00 PM] y [07:30:00 AM – 21:00:00 PM] constituyendo cerca del 88% de los clientes. Ahora bien el 12% restante de clientes tiene ventanas de tiempos que se distribuyen a lo largo del día. El punto que se quiere remarcar es que el hecho de tener restricciones temporales traslapadas hace más difícil la resolución de este problema, ya que existen muchas más posibilidades de soluciones factibles a considerar. En anexos se encuentran especificadas la cantidad de clientes y la totalidad de configuraciones de restricciones en los tiempos de entrega.

La justificación de considerar diferentes tipos de clientes radica en obtener rutas balanceadas entre los encargados del despacho. La idea de tener rutas balanceadas es un punto presente en la empresa y es principalmente para no sobrecargar a la mano de obra que trabaja en el lugar. Sin embargo, este ámbito escapa del alcance de este trabajo, por lo que al momento de generar el modelamiento se considerarán los clientes de forma indiferente y se reconocerán solamente por el nivel de demanda establecido. El concepto de rutas balanceadas se puede descartar dado que el concepto general de este trabajo es el obtener rutas de costo mínimo. El balanceo se puede trabajar en base a otro problema de optimización enfocado en la programación de las tareas de despacho sobre un horizonte de una semana, mes u otro especificado por la empresa.

### **3.2.4 DEPOSITOS**

CERVECIAS CHILE S.A. posee sólo una embotelladora, la cual está ubicada en la ciudad de Santiago en la comuna de Quilicura. Es en esta

ubicación en donde se centralizan los datos y se desarrolla la generación de las rutas en base a la experiencia de la persona encargada.

### **3.2.5 VEHICULOS**

Los tipos de transporte que se utilizan pueden agruparse en: 4, 6 y 10 unidades de pallets. Cada pallets involucra una cantidad de aproximadamente 55 cajas de pedido. En el sistema actual de arriendo de vehículos CERVECERIAS CHILE S.A. tiene un bajo poder de negociación, el cual se traduce en generar los arriendos de los vehículos de manera semestral. Esto involucra que el vehículo que fue arrendado debe ser pagado aunque este no haya sido utilizado.

En la empresa se considerarán vehículos cuya capacidad varía entre 350 y 550 cajas de capacidad para los envíos<sup>3</sup>. Sin embargo, dado que el enfoque es la generación de rutas de gran tamaño, se considerará una flota homogénea para la operatividad del despacho.

### **3.2.6 COSTOS**

Los costos de transporte consideran un costo fijo (por vehículo disponible) y un costo variable por caja despachada. Los costos fijos involucran el valor de arriendo de los vehículos a utilizar, el uso de dos recursos humanos para realizar las labores de entrega junto con los elementos de vestir y de alimentación

---

<sup>3</sup> En la definición de los productos se define que serán evaluados en base a cajas solicitadas. Es por esto que la capacidad del camión no se presenta en toneladas, sino que en unidades de cajas.

necesarios para el trabajo diario y además incluyen el costo de mantenimiento de los vehículos llevado a valores diarios.

Dado que las rutas de entrega del pedido se atribuyen a un vehículo, se puede tomar que el valor de un camión en valores diarios es lo mismo que tomar los valores a nivel de rutas.

Los costos variables dependerán de la cantidad de producto despachado y la cantidad de kilómetros realizados por los vehículos.

En el manejo de la instancia de prueba se presenta un detalle del nivel de gastos que se atribuyen a cada una de las entregas de pedidos.

### **3.2.7 TIEMPOS DE ESPERA Y DESCARGA**

Un aspecto importante a considerar son los costos asociados a las esperas que puedan tener los vehículos al momento de realizar el despacho. Esta espera se dará principalmente por el hecho de llegar a un cliente determinado antes de que se habilite el tiempo de despacho definido por él. Al tener esto es importante analizar (en conceptos de costo) el punto de si se permitirá la espera a un costo dado o se clausura la posibilidad de espera y se busca hacer el servicio de manera que los recursos involucrados en el despacho este siendo utilizados siempre.

Para efectos de este trabajo se considero la realización de un estudio del tiempo de espera y el tiempo de descarga promedio que se tiene en cada tipo de cliente.



En general la diferencia de estos tiempos entre clientes se debe a la disponibilidad de espacio para la descarga y también la cantidad de otros servicios que reciben los clientes. A continuación se presentan los valores promedios de espera y descarga por cada unidad de demanda.

	BOTILLERIA	PUB	SUPERMERCADO
Tiempo Descarga Promedio [Minutos]	0:00:20	0:00:20	0:00:25
Tiempo Espera Promedio [Minutos]	0:21:00	0:23:00	0:30:00

**Tabla 2: Tiempos de Espera y Descarga Promedio por Tipo de Clientes**

Este aspecto es relevante, puesto que si los vehículos tienen tiempos “muertos” muy altos la cantidad de clientes asociados a un vehículo puede ser muy bajo, lo que llevará a tener un menor porcentaje de utilización de la capacidad de los vehículos. Lo anterior, llevará a considerar un mayor número de vehículos para satisfacer la cantidad de producto demandado.

## **4. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA**

Una vez identificado los aspectos relevantes de la empresa se procede a buscar información en la literatura para determinar aspectos importantes a considerar para un correcto enfoque de solución. En otras palabras se buscan metodologías aplicables de solución de manera de revisar la factibilidad y certeza en el problema.

### **4.1 RUTEO DE VEHICULOS**

Haciendo mención al problema que se busca resolver en este proyecto debemos prestar atención en que se involucra un conocimiento inherente del problema de ruteo de vehículos. En un comienzo se procede a revisar trabajos referidos netamente al problema de ruteo de vehículos para identificar diferentes visiones de solución.

En el trabajo de Dantzig y Ramser [3] se presenta la estructura de un modelo de ruteo considerando un único producto que debe ser entregado a diferentes clientes usando variados vehículos de capacidades iguales. En particular y dadas las características del problema es necesario revisar en profundidad documentos que involucren aspectos del problema de ruteo de vehículos con variantes tales como flota heterogénea y con restricciones en la disponibilidad de entrega de los pedidos de los clientes. En los trabajos de Golden et al. [4] y de Cordeau et al. [5] se presentan una serie de modelamientos que permite representar el problema del ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y el otro trabajo además considera además la restricción de flota heterogénea.

En el trabajo de Solomon y Desrosiers [6] se especifica la formulación del problema de ruteo con restricciones en las ventanas de tiempo y además se presentan algunas características de los problemas más comunes de ruteo. Entre ellos se presentan el problema del Vendedor Viajero considerando este problema como un VRPTW sin considerar capacidad; el problema de múltiples vendedores viajeros que es similar al anterior pero considerando múltiples vendedores; el problema de ruta más corta; el problema de recepción y entrega de productos; el ruteo multi-período y el problema de *Shoreline*. Además en este mismo trabajo se presentan algunas aplicaciones del problema de ruteo con ventanas de tiempo tales como la programación de chóferes, referenciado del trabajo de Pullen y Webb [7] y el de una empresa contratista de transporte, referenciado del trabajo de Knight y Hofer [8]. Para un mayor conocimiento de diferentes tipos de problemas de ruteo se recomienda la lectura de los trabajos de Laporte y Norbert [9] y Laporte [10].

Dada la dificultad existente en la solución de estos problemas es típico inducir las soluciones mediante métodos heurísticos. Dado que la metodología de uso es en base a una heurística que entregue buenas soluciones en tiempos aceptables se revisaron diferentes esquemas de solución. Dentro de los esquemas de solución podemos presentar tres tipos de lineamientos: algoritmos exactos, heurísticos y metaheurísticos.

Dentro de los algoritmos exactos se pueden mencionar el método *Branch and Bound* el cuál desarrolla el concepto de dividir para conquistar. Para la revisión en mayor detalle se puede revisar el trabajo de Nemhauser y Wolsey [11]. Además dentro de los algoritmos que más se repiten como método de solución

del VRP se pueden mencionar el Algoritmo de Ahorros desarrollada por Clarke y Wrigth [12], el cuál es probablemente el algoritmo más conocido para la construcción de rutas. El sentido de esta heurística es que si en una solución dos rutas diferentes pueden ser combinadas formando una nueva ruta a un menor costo se debe reemplazar estas dos rutas por la ruta generada. En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den los mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema.

Una modificación de esta heurísticas es la que se presentan en los trabajos de Yellow [13], Golden y Magnanti [14] y Gaskell [15] en la cual se hace una modificación al concepto de ahorro para evitar la generación de rutas circulares. Esto se base en el uso de un ponderador que evita la unión de de rutas con clientes lejanos, este ponderador es conocido como *shape parameter*. Continuado con los algoritmos se encuentra en la literatura el Algoritmo de Ahorros basados en *Matching* el cuál utiliza la mención realizada en el trabajo de ahorros considerando el efecto que puede generar una unión a posibles uniones en iteraciones siguientes. Para revisar mayor detalle se pueden revisar los trabajo de Gabow [16], Desrochers y Verhoog [17] y Altinkemer y Gavish [18].

Otro tipo de heurísticas existentes para resolver el problema de ruteo de vehículos son las Heurísticas de Inserción. Las heurísticas de inserción son métodos conocidos como constructivos, los cuales crean una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En otras palabras, en cada iteración de la heurística se tiene una solución parcial (rutas que visitan solo a un subconjunto de los clientes) y se selecciona un cliente no visitado para ser insertado en aquella solución. Dentro de las heurísticas de inserción se

consideran dos tipos: inserción secuencial e inserción en paralelo. Los métodos de inserción secuencial consideran la inserción del cliente solamente en la última ruta creada. Esta forma de inserción tiene la particularidad de que los últimos clientes que son visitados tienden a estar muy dispersos lo que conlleva a que las rutas tengan costos muy elevados. Por otro lado los métodos de inserción en paralelo tiene la salvedad de que un cliente puede ser insertado en cualquiera de las rutas generadas, lo cual permite disminuir el problema del método secuencial. Para revisar en más detalle estos conceptos se recomienda revisar el trabajo de Bodin et al. [19] y Potvin et al. [20].

El trabajo de Mole y Jameson [21] se basa en lo antes expuesto. Sin embargo tiene la particularidad de que en este caso se utilizan dos medidas para decidir cuál será el próximo cliente. La primera medida se calcula, para cada cliente no visitado, la mejor posición para ubicarlo en la ruta actual teniendo en cuenta solamente las distancias y sin reordenar los nodos que ya están en la ruta. Por otro lado utiliza una medida de urgencia que es el costo asociado a los clientes. Esta medida es una forma de direccionamiento en la heurística de manera de considerar los clientes más alejados y no dejarlos para las últimas iteraciones cuando ya no hay mejores clientes factibles. Para revisar en más detalle la heurística en paralelo se recomienda revisar el trabajo de Christofides, Mingozzi y Toth [22].

Otro tipo de heurísticas utilizadas en el problema de ruteo de vehículos hacen referencia a una metodología que contempla el asignar los clientes potenciales a una ruta y luego generar un ruteo a cada uno de los grupos establecidos. Uno de las metodologías más conocidas es la heurística de barrido o *sweep*. En esta metodología los grupos de clientes se forman girando semirrecta con origen en

el depósito e incorporando clientes a las rutas hasta que se cumpla una condición (un ejemplo de esta condición puede referirse a no sobrepasar la capacidad de los vehículos que se utilizan para el ruteo). Luego de esto cada grupo de clientes es ruteado resolviendo el problema del vendedor viajero. Lo interesante de esta metodología es que las rutas comúnmente no se superponen lo que puede ser beneficioso en algunos problemas. Este proceso se repite hasta que la semirrecta definida haya involucrado a todos los clientes del problema. Dentro de los trabajos encontrados se destacan los de Wren [23], Wren y Holliday [24] y Gillet y Millar [25]. Una heurística similar es la desarrollada por Fisher y Jaikumar [26] en la cual se propone generar los grupos de clientes por medio de la solución de un problema de asignación generalizada (GAP) sobre los clientes. A grandes rasgos este problema involucra fijar un número de clientes sobre los cuales se generarán los grupos. En una segunda fase se determina que clientes son asignados a cada uno de los grupos encontrados, en base a un criterio de distancia entre clientes, de modo de no violar las restricciones involucradas en el problema. El detalle y la aplicación de esta heurística se pueden encontrar en el trabajo mencionado. Una idea similar es la desarrollada en el trabajo de Bramel y Simchi-Levi [27] en la cual utilizan otro tipo de problema para definir los clientes semillas conocido como el problema de localización de concentradores con capacidades.

En base a la misma idea anterior existen otro tipo de heurísticas de solución en la cual utilizan el concepto de rutear primero los clientes y luego asignarlos a las rutas. La idea principal de esto es generar una ruta genérica y sin restricciones que involucre a todos los clientes resolviendo un problema del vendedor viajero y luego se procede a particionar la ruta en varias rutas que si son factibles. Para mayor detalle en este ámbito se recomienda revisar el trabajo de Beasley [28].

## 4.2 MEJORAMIENTO DE SOLUCIONES

En todas las heurísticas antes mencionadas se establece la obtención de una solución parcial para el problema abordado. Una vez que se tiene una solución se puede intentar mejorarla mediante algún procedimiento de búsqueda local. El funcionamiento de esta técnica es que a partir de una solución dada, se define un vecindario de soluciones factibles a la cual se puede trasladar la solución. Lo anterior se realiza hasta ya no poder encontrar algún punto que mejore los términos definidos en la función objetivo. Dentro de los procedimientos desarrollados existen los siguientes: el operador de intercambio, el algoritmo de Lin-Kernigham y el operador Or-opt.

El operador de intercambio es uno de los procedimientos más conocidos para el mejoramiento de rutas. Este método consiste en eliminar una cantidad determinada de arcos de la solución y reconectar la cantidad de arcos restantes. Usualmente se implementan entre 2 y 3 intercambios, en aquellos casos en los cuáles las movidas de segmentos de rutas no afectan la factibilidad pueden buscarse movidas sin necesidad de hacer intercambios de todos los segmentos de ruta. Sin embargo, en los casos que existen restricciones asociadas a las rutas (por ejemplo las ventanas de tiempo existentes para la entrega de pedidos a los clientes) se debe asumir un costo computacional más alto dada la necesidad de comprobación de factibilidad y el recálculo de los costos asociados a la solución. Para profundizar en este tema se encuentra una gran gama de trabajos relacionados, entre ellos se destacan los de Lin [29], Johnson y McGeoch [30] y los de Reanud, Boctor y Laporte [31]. En este último se presenta una implementación de un intercambio de 4 arcos. El algoritmo de Lin-Kernigham utiliza la idea de intercambiar un conjunto de arcos por otro, pero determinando

dichos conjuntos dinámicamente a lo largo de la ejecución del algoritmo. Esto puede ser revisado en el trabajo de Lin y Kernigham [32]. El operador Or-Opt es una versión reducida del algoritmo 3-Opt (algoritmo de intercambio de 3 arcos), que consiste en eliminar una secuencia de clientes consecutivos de la ruta y colocarlos en otra posición de la ruta, de manera que permanezcan consecutivos y en el mismo orden. Al igual que en problemas anteriores el hecho de contener restricciones especiales en el problema conlleva a una mayor utilización de recursos computacionales.

### **4.3 METAHEURISTICAS**

Para obtener mejores soluciones que las heurísticas antes presentadas es necesario incurrir en técnicas que realicen una mejor exploración del espacio de soluciones. Las metaheurísticas son procedimientos genéricos de exploración del espacio de soluciones para problemas de optimización y búsqueda. Las metaheurísticas proporcionan una forma de diseño, que dependiendo de cada contexto, permite generar algoritmos de solución. En general, las metaheurísticas obtienen mejores soluciones que las heurísticas en general, pero involucran un mayor costo computacional. Sin embargo este costo incurrido no es mayor que los costos asociados a la solución por métodos exactos. Dentro de las metaheurísticas más significativas se pueden presentar: algoritmo de hormigas, búsqueda tabú y algoritmos genéticos.

Los algoritmos de hormigas se basan inspiran en las estrategias que utilizan las colonias de hormigas para buscar su alimento. La idea principal es que una hormiga cuando encuentra un camino hacia una fuente de alimento, libera una



sustancia llamada feromona. La cantidad de feromona depositada en el trayecto depende del camino recorrido y de la calidad de alimento encontrado. Si una hormiga no encuentra feromona se mueve aleatoriamente, pero al momento de encontrar se moverá con alta probabilidad por el camino con mayor cantidad de feromona. Esto generará un proceso denominado auto-catalítico, en el cuál mientras más hormigas sigan el camino más atractivo será para ellas. En otras palabras cada hormiga construye una solución combinando ciertos criterios que indican que tan bueno parece ser una decisión, y la información histórica que le indica que tan buena fue tomar esa decisión. Para revisiones en mayor detalle de este método se puede revisar los trabajos de Colomi et al. [33], Dorigo et al. [34] y Bullnheimer et al. [35].

La metaheurísticas de Búsqueda Tabú o *Tabú Search* fue propuesta por Glover [36] y tiene como principio básico realizar una búsqueda local aceptando soluciones que aumentan el costo. La idea principal del algoritmo es que en una iteración dada existe el movimiento de una solución a otra dentro de una vecindad de soluciones definidas. Es importante notar que el paso de una solución a otra no involucra necesariamente un mejoramiento en la función objetivo de un problema. Es por ello que se debe considerar una lista que guarde aquellas soluciones en las cuales se ha pasado de manera de no volver a soluciones antes visitadas por lo menos para un número definido de iteraciones. Mayor detalle de esta metodología se puede revisar en los trabajos de Osman [37], Gendreau, Hertz y Laporte [38] y Taillard [39].

Los algoritmos genéticos utilizan la idea de la evolución natural de los seres vivos para resolver problemas de optimización y búsqueda. El bajo nivel de acercamiento con la estructura propuesta en este trabajo hace tomar la decisión

de no caer en mayor detalle en este algoritmo. En caso de querer profundizar más sobre este tema se recomienda revisar los trabajos de Holland [40], Potvin [41], Thangiah [42], Blanton y Wainwright [43], Potvin y Bengio [44] y Goldberg [45].

Aparte de las metaheurísticas mencionadas anteriormente una variedad de otras heurísticas han sido aplicadas en los problemas de ruteo. Entre estas se pueden mencionar el método GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) y el método de *Simulated Annealing*. El método GRASP es un método iterativo que consiste en una fase constructiva de las soluciones y una fase de búsqueda local. En la primera etapa se obtiene una solución aplicando una heurística de barrido, luego en cada iteración se va agregando un nuevo miembro a la solución el cuál no necesariamente es el que asegura un menor costo. La inclusión de este nuevo miembro es seleccionado de una lista de candidatos en la cual se le asigna una probabilidad dada de selección. Este procedimiento es adaptativo dado que los beneficios asociados con cada elemento seleccionado son actualizados en cada iteración de la fase de construcción para reflejar los cambios producidos por selecciones previas. Una vez realizado este procedimiento se realiza un proceso de búsqueda local de soluciones.

Por otro lado, *Simulated Annealing* es una técnica estocástica de relajación la cual es originada por mecanismos estadísticos. Esta técnica se basa en una analogía a los procesos de aleación de sólidos, en donde un elemento sólido es calentado a altas temperaturas y gradualmente enfriado para lograr una estructura de cristalización en una configuración de energía baja. La idea principal que se aplica a los problemas de ruteo de vehículos es que una solución

es aceptada siempre y cuándo aporte en el costo asociado a la configuración de rutas entregadas. Sin embargo, esta solución puede aceptar configuraciones que no aporten mejoras a la función objetivo. La decisión de aceptar soluciones que empeoren los resultados se basan en una función de probabilidad que va siendo más restrictiva a medida que se aumentan las iteraciones en la heurística desarrollada. Para mayor detalle se recomienda la lectura de los trabajos de Metrópolis et al. [46], Kirkpatrick [47] et al., Aarts et al. [48], Russell [49], Christofides y Beasley [50], Czech y Czarnas [51], Taillard [52].

#### **4.4 GENERACION DE COLUMNAS**

Aunque en párrafos anteriores se especifican una gran variedad de trabajos enfocados en problemas de ruteo de vehículos para diversas configuraciones de restricciones. Uno de los enfoques que marca el desarrollo del siguiente trabajo es el método de optimización del problema de ruteo de vehículos conocido como Generación de Columnas. Basado en la definición entregada en el trabajo de Desrochers, Desrosiers y Solomon [53]. Este procedimiento es un poderoso método usado para resolver problemas del tipo “*Set Partitioning*”.

La base de esta metodología es dividir el problema en dos etapas: La primera etapa considera la generación de soluciones factibles conocida como Sub Problema, y una segunda etapa la formulación de un problema de programación lineal que escoge mediante un modelo de optimización las soluciones que serán consideradas dentro de un conjunto de soluciones factibles previamente definidas. En cada iteración del modelo una solución es generada y pasa a formar parte del conjunto de soluciones que pueden ser escogidas por el

Problema Maestro. En base a este subconjunto de “mejores” soluciones el Problema Maestro soluciona el problema de forma entera.

El método de Generación de Columnas puede ser considerado como uno de los más exitosos métodos para resolver problemas que consideran variables de naturaleza entera que son de gran tamaño. La idea general fue introducida por Gilmore y Gomory cuando encontraron la solución óptima del problema *Cutting – Stock*, donde el Sub-Problema tiene la estructura de un *Knapsack problem*<sup>4</sup>. El problema consiste en cortar un trozo de madera en diferentes tamaños para satisfacer la demanda generada por trozos de tamaños específicos. Dado esto se desarrolló una metodología que comienza con un conjunto factible de configuraciones de corte, y la solución de este problema simplificado es utilizada para generar una nueva configuración potencial. Posteriormente este procedimiento fue utilizado por gran cantidad de científicos en el sentido de modificar las estructuras de problemas combinatoriales y para resolver problemas de distribución y problemas de configuración de equipos de trabajo.

La solución de problemas de programación mixta (problemas que incluyen variables enteras y continuas) de gran escala requieren de una formulación relajada de carácter lineal que entregue soluciones con una buena aproximación en el conjunto convexo de soluciones. Para esto, se ha trabajado en la última década con respecto al uso de un método conocido como *Branch and Cut*. La idea esencial de este método es consiste en dejar fuera del conjunto de soluciones factibles del problema relajado, un tipo de desigualdades que generalmente no permiten manejar eficientemente el problema y que generalmente no son activas en el óptimo. De esto, si una solución óptima en el

---

<sup>4</sup> *Knapsack Problem*: Es el comúnmente conocido como problema de la Mochila.

problema relajado es infactible, se procede a resolver un problema auxiliar para identificar cual es la desigualdad que se viola. Por lo tanto el problema relajado se re-optimiza agregando planos de corte para evitar la infactibilidad de la solución. El *Branching* ocurre en el momento que la solución no entrega desigualdades violadas. *Branch and Cut* es una generalización del *Branch and Bound* considerando un problema relajado y permitiendo generar planos de corte en cada rama del árbol de soluciones.

La filosofía del *Branch and Price* es similar al del *Branch and Cut*, la diferencia radica principalmente en que el primer caso se enfoca en generar columnas (variables) en cada nodo del árbol de solución, en cambio el segundo caso se encarga de generar filas (restricciones) en el árbol de solución. En el *Branch and Price* no se consideran todas las variables dado que la gran cantidad de variables no permite manejar de forma eficiente el problema y en el óptimo muchas variables toman valor cero.

Existen 3 variaciones asociadas a la Generación de Columnas. La idea común es la definición del Problema Maestro el cuál es un subconjunto del problema original. El Problema Maestro contiene solo un selecto número de columnas del problema original. En la Generación de Columnas de tipo I, el Problema Maestro interactúa solamente una vez con otro problema, llamado Problema Auxiliar. El Problema Auxiliar se encarga de enviar columnas “atractivas” al Problema Maestro. Es fácil ver que la optimización del Problema Maestro es basada en las columnas que han sido enviadas por el Sub-Problema. En la Generación de Columnas tipo II, la interacción del Problema Maestro es con un problema llamado Sub-Problema o Problema de *Pricing*. El tercer tipo de Generación de Columnas es basado en la descomposición de Dantzig-Wolfe en

la cual el Problema Maestro interactúa iterativamente con uno o más Sub-Problemas para identificar las columnas interesantes a considerar.

Esto se puede profundizar considerando el siguiente problema de optimización,

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & c^T x \\ \text{s.a} & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

donde  $x \in \mathbb{R}^N$ ,  $b \in \mathbb{R}^M$ ,  $A \in \mathbb{R}^{N \times M}$  y  $n \gg 0$ . Esta última condición implica que el problema original descrito en la figura anterior tiene un número muy grande de variables. En muchos casos prácticos este número puede estar en las decenas o cientos de millones. Por ejemplo si quisiéramos listar exhaustivamente todas las posibles rutas existentes para solamente 100 clientes tendríamos aproximadamente una cantidad de  $9.332E157$  posibles rutas. Este número grande de variables implica que guardar esta matriz en memoria no es posible, además la mayoría de las columnas de la matriz nunca entran a la base o se hace activas, entonces la pregunta que surge es ¿Qué condición podríamos imponer de manera de que no sean consideradas en la base total de soluciones?

Con este objetivo es que se desarrolla un método que descubra las variables  $x \in \mathbb{R}^N$  con costo reducido negativo ( $\bar{c}_r \in \mathbb{R}^M$ ). Las columnas  $A_j$  asociadas con estas variables se incluyen en una nueva matriz  $A' \in \mathbb{R}^{N' \times M}$  que forman un nuevo problema, el denominado Problema Maestro. Este problema se presenta a continuación,

$$\begin{array}{ll} \text{Min} & c'^T x' \\ \text{s.a} & A'x' = b' \\ & x' \geq 0 \end{array}$$

donde  $x' \in \mathfrak{R}^{\bar{N}}$ , es un subconjunto de variables en  $x \in \mathfrak{R}^N$ , y  $c' \in \mathfrak{R}^{\bar{N}}$ , sus respectivos costos provenientes del vector de costos original. Claramente  $N \gg \bar{N}$ .

El método de Generación de Columnas hace la selección de las columnas a considerar resolviendo el siguiente problema de optimización. Este problema es el mencionado como Sub-Problema o Problema Auxiliar,

$$\bar{c}_j^* = \text{Min } \bar{c}_j$$

donde,  $\bar{c}_j = c_j - c_B^T B^{-1} A_j$ , o escrito de otra forma  $\bar{c}_j = c_j - \pi_j A_j$ . Con esto el menor  $\bar{c}_j, \bar{c}_j^*$ , puede ser encontrado sin enumerar exhaustivamente todos los  $\bar{c}_j$ . Con base en  $\bar{c}_j^*$  se procede así:

- Si  $\bar{c}_j^* \geq 0$ , no hay variables candidatas a ingresar a la base y el problema original es óptimo.
- Si  $\bar{c}_j^* < 0$ , la variable  $x_{j^*}$ , debe entrar a la base del problema original. Es decir  $A_{j^*}$  pasa a ser parte de la base reducida.

En esta etapa se puede apreciar que en cada iteración el Problema Maestro, va actualizando el valor de las variables duales  $\pi_j$ , de manera de tener mejoras en cada iteración para la generación de las rutas. Esto se basa en la Teoría de la Dualidad la que provee una condición necesaria para definir que una variable con costo reducido es una buena elección.

De una forma gráfica se puede mostrar como procede este método,

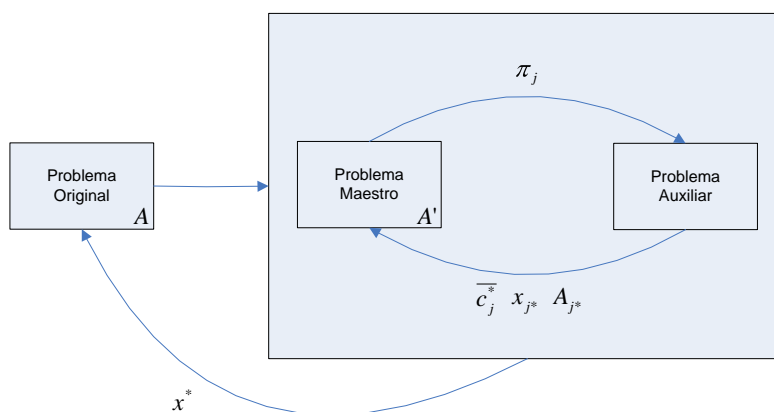


Figura 3: Marco general del método de Generación de Columnas

El método de Generación de Columnas actualmente es un método que permite resolver de forma eficiente un gran número de problemas de ruteo y de calendarización de actividades, para una revisión de este se recomienda la lectura del trabajo que permitió resolver el problema de calendarización de flota para una aerolínea [54].

El método de Generación de Columnas radica en que si un problema de optimización contiene una gran cantidad de variables para ser resuelto de manera explícita, entonces se puede inicializar el problema línea con un pequeño subconjunto de estas variables y generar una solución a este problema reducido. En otras palabras, el método de Generación de Columnas es una forma de resolver un problema de programación lineal que agrega columnas (correspondientes a las variable a evaluar) durante la fase de *pricing* del método simplex para la resolución del problema. Otra forma de ver esto es que la Generación de Columnas en el método simplex primal es lo mismo que generar



una restricción en el método simplex dual. En la formulación dual se puede pensar esta columna como parte del método de planos de corte.

Luego, se debe chequear si el agregar alguna otra columna al problema puede generar mejoras en la solución encontrada. Este chequeo puede ser realizado revisando la naturaleza de los costos reducidos de las variables incluidas en el problema.

Dada esta estructura es claro pensar que un problema para ser abordado por medio de Generación de Columnas debe ser particionado en dos etapas. Para el caso de la solución de un problema de ruteo de vehículos se tienen dos fases de solución. En la primera fase se genera un problema de *Set Covering* el cual tiene como objetivo encontrar la configuración de las mejores rutas generadas. Este conjunto de rutas generadas es realizado en la segunda etapa. Existen diversas formas de generar las rutas, La mayoría de los métodos de Generación de Columnas usan programación para resolver el Sub-Problema con formato de ruta más corta donde la restricción elemental (es decir la restricción que el vehículo no visite dos veces al mismo cliente) ha sido relajada. Este método resultó ser muy eficiente. Sin embargo existen otras formas de generación de rutas ya sea por medio de una heurística o con la utilización de *Constraint Programming*.

Dentro de los trabajos revisados se encuentra una gran variedad de trabajo en el ámbito de Generación de Columnas, entre ellos podemos mencionar a Barnhart et al. [55], Vanderbeck et al. [56], Desaulniers et al. [57], Sol [58], Vanderbeck [59], Villeneuve [60], Wilhelm [61], Soumis [62], Desrosiers et al. [63].

En base al trabajo bibliográfico encontrado se propone una estrategia nueva para resolver el problema de ruteo de vehículos. En este trabajo se considerará la estructura de un problema de ruteo tomando en cuenta la existencia de ventanas de tiempo para la entrega de los pedidos de los clientes y también la existencia de una flota homogénea e ilimitada de vehículos para realizar las entregas. Además de ello se debe considerar que nuestro problema a diferencia de lo que existe en la bibliografía revisada contempla la generación de rutas con un número grande de clientes (aproximadamente 15 a 20 clientes por ruta).

A continuación se procede a mostrar la forma en la cual se trabajara dado los conceptos y estructuras de los trabajos citados.

## **5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO**

### **5.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El problema a resolver contempla desarrollar una heurística que genere un conjunto de rutas para satisfacer la demanda de los clientes. A su vez, contemplar que los clientes tienen restricciones temporales en las cuáles se pueden realizar las entregas.

Actualmente la empresa tiene un proceso manual para determinar las rutas asociadas a los clientes que generaron pedidos. Esta metodología se basa principalmente en la experiencia que tiene el encargado de la programación de rutas ya que desarrolla la configuración de entregas con un panel geográfico, en el cuál se van asignando los clientes con criterios básicos de agrupación. El tiempo involucrado en esta operación conlleva el uso de aproximadamente 2 a 4 horas diarias. Tomando en cuenta lo anterior se desarrolla una metodología que permita encontrar mejores soluciones en menores tiempos de procesamientos.

La programación del modelo se desarrolla en Microsoft Visual C++ 6.0 y su solución será ejecutada mediante ILOG Cplex 9.0 usando Concert Technology de ILOG.

### **5.2 CONSIDERACIONES AL MODELO MATEMÁTICO**

El ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) [64], es otra versión del problema de ruteo de vehículos, pero impone restricciones de ventanas de

tiempos que deben cumplir los vehículos para realizar sus entregas. En el caso del VRPTW existen dos versiones: con restricciones de ventanas de tiempo blandas, las cual pueden ser violadas a un cierto costo, y con restricciones de ventanas de tiempo duras, las que no pueden ser violadas. En nuestro caso se considera que las condiciones de ventana de tiempo no pueden ser violadas. Esta consideración se determina en base al bajo nivel de negociación que existe en el mercado y a la importancia de la utilización de los vehículos.

Ahora bien el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y con flota homogénea está dado por una flota de  $V$  vehículos con iguales capacidades, un conjunto  $C$  de clientes y un gráfico dirigido  $G$ . Consideremos un grafo  $G = (C, A)$ , el cual consiste en  $|C|+2$  vértices, donde los clientes son denotados por los índices  $1, 2, \dots, n$  y el depósito es representado por el vértice  $0$  y  $n+1$ . Por lo tanto el conjunto de vértices,  $0, 1, 2, \dots, n, n+1$  es definido como el conjunto  $N$ ,  $N = C \cup \{0, n+1\}$ . El conjunto de arcos (denotado por  $A$ ), representa conexiones entre los clientes y el depósito, y a su vez conexiones entre los clientes.

Una consideración importante es que no existen arcos que terminen en el nodo  $0$  (Nodo de salida) y a su vez no existen arcos que salgan del nodo  $n+1$  (Nodo de llegada). En cada uno de los arcos  $(i, j)$ , dónde  $i \neq j$ , se asocia un costo  $(c_{ij})$  y un tiempo de viaje  $(t_{ij})$ .

Cada vehículo tiene asociada una capacidad  $(q)$  y cada cliente tiene asociada una cantidad de demanda  $(d_i)$ . Además cada cliente tiene considerada una ventana de tiempo  $[a_i, b_i]$ . Esta característica condiciona a que un vehículo debe llegar a un cliente antes de  $b_i$ . Un vehículo podrá llegar antes de  $a_i$ , pero deberá esperar

hasta la activación de la ventana de tiempo. Consideremos además que el depósito también tiene asociada una ventana de tiempo  $[a_0, b_0]$  (se asume que las ventanas de tiempo para los nodos 0 y  $n+1$  son idénticas). Se considera que  $[a_0, b_0]$  es la ventana de tiempo que asignada para la bodega. En otras palabras los vehículos no pueden salir del depósito antes de  $a_0$  y deben volver antes de  $b_0$ .

Se asume que los valores de  $q, a_i, b_i, d_i, c_{ij}$  son valores no negativos, mientras que  $t_{ij}$  es asumido con valores mayores que cero. Consideremos además que en los arcos se satisfacen la desigualdad triangular para el costo y el tiempo. Es decir, que el costo (tiempo) de viajar desde un cliente  $i$  a uno  $j$  de forma directa es siempre menor que el costo (tiempo) de viajar por medio de otro cliente. En otras palabras,

$$c_{ij} \leq c_{im} + c_{mj} \quad \forall i, j, m \in N$$

En resumen un vehículo perteneciente al conjunto  $V$  está definido por un nivel de capacidad, un costo fijo y un costo variable dependiente de la carga transportada y la distancia recorrida. Para este problema se considera que el número de vehículos es un numero conocido y grande (35 vehículos es la cota máxima de vehículos que están disponibles para el arriendo).

Como ya se había mencionado el costo de utilización del vehículo que utiliza un arco  $(i, j) \in A$ , es denotado por  $c_{ij}$  el cuál es obtenido según la suma lineal de los costos involucrados por la carga transportada y la distancia recorrida. El costo de la ruta  $r$  tomada por un vehículo es obtenido por el valor del costo fijo de arriendo de los vehículos sumado con el valor de  $c_{ij}$  sobre todos los arcos

pertenecientes a la ruta, lo que desde ahora se resumirá en el concepto de costo de la dupla ruta-vehículo,  $c_r$ .

Por lo tanto el problema de ruteo de vehículos con flota homogénea consistirá en encontrar una combinación óptima de pares de ruta-vehículos factibles, en los cuales cada ruta inicie y termine en el depósito, los cuales cumplan con las demandas definidas por los clientes y a su vez cumplan con los requisitos de ventanas de tiempo en las entregas. Cada cliente será visitado sólo una vez y en cada par ruta-vehículo  $(r, k)$  la suma de las demandas de los clientes asignados a esa ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.

### **5.3 MODELO MATEMÁTICO**

El modelo matemático para el problema planteado involucra dos tipos de decisiones principales: la primera involucra identificar cuántos serán los vehículos que visitarán a los diferentes tipos de clientes y por otro lado se debe identificar en qué instante de tiempo se visitará a cada cliente. Con estos dos argumentos podremos definir la configuración de flota que atenderá a los clientes y a su vez identificar el programa de entregas a realizar diariamente. Posteriormente se presentará un modelo de programación matemática que representa el problema, sin embargo la metodología de uso no resuelve explícitamente este problema, sino que considera las restricciones que deben satisfacerse en la solución. Es por esto que se presenta a modo de entendimiento de las restricciones que se consideraron para la formulación de la metodología.

A continuación se detallan los aspectos más relevantes del modelo utilizado, entre los cuales se encuentran: los conjuntos que se utilizarán para definir los estados, los parámetros relevantes de cada conjunto, las variables de decisión de los problemas, las restricciones a satisfacer y la función objetivo a minimizar.

El modelo que se presentará corresponde al modelo básico de programación para un modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, basado en la estructura presentada en [4].

### **5.3.1 CONJUNTOS**

V : Conjunto de vehículos para transportar los productos.

C : Conjunto de clientes a atender

N : Conjunto de clientes a atender, más nodos auxiliares que representan al depósito.

### 5.3.2 PARAMETROS

$dda_i$	:	Cantidad de cajas solicitados por el cliente $i$
$d_{ij}$	:	Distancia ([Km]) entre el cliente $i$ y el cliente $j$
$t_{ij}$	:	Tiempo ([Minutos]) de viaje entre cliente $i$ y cliente $j$
$a_i$	:	Cota inferior de la ventana de tiempo ([Minutos]) del cliente $i$
$b_i$	:	Cota superior de la ventana de tiempo ([Minutos]) del cliente $i$
$te_i$	:	Tiempo ([Minutos]) promedio de espera en el cliente $i$
$td_i$	:	Tiempo ([Minutos]) promedio de descarga en el cliente $i$
$cap_k$	:	Capacidad (cajas) asociada al vehículo $k$ -ésimo <sup>5</sup>
$cfu_k$	:	Costo fijo ([\\$]) por uso del vehículo $k$ -ésimo <sup>5</sup>
$cve_k$	:	Costo variable ([\$/cajas entregadas]) de entrega del vehículo $k$ -ésimo <sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> En estricto rigor esta restricción no debería depender del sub-índice  $k$ , dado que todos los valores de capacidad son iguales. Se deja explícito para mejor entendimiento de las soluciones, puesto que un vehículo corresponderá a una ruta.



$cvv_{ij}$  : Costo variable ([\$/Km]) de viaje de cliente i a j

### 5.3.3 VARIABLES DE DECISIÓN

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{Si el vehículo k-ésimo viaja desde el cliente i al cliente j} \\ 0 & \text{Si no} \end{cases}$$

$s_{ik}$  = Instante de tiempo en que el vehículo k-ésimo visita al cliente i

### 5.3.4 RESTRICCIONES

a) Cada cliente debe ser visitado por solamente un vehículo

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in C \quad (1)$$

b) Condición sobre la capacidad del vehículo

$$\sum_{i \in C} dda_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq cap_k \quad \forall k \in V \quad (2)$$

c) El vehículo puede salir de la bodega hacia algún cliente

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (3)$$

d) Para cada cliente debe existir una conservación de flujos.

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C, \forall k \in V \quad (4)$$

e) El vehículo debe regresar a la bodega.

$$\sum_{i \in N} x_{in+1k} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (5)$$

f) Condición de secuencialidad de las visitas a los clientes

$$s_{ik} + te_i + td_i + dda_i + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (6)$$

g) Se debe respetar las restricciones temporales para la entrega de los productos.

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (7)$$

h) Naturaleza de las variables

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (8)$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad \forall i, j \in N, \forall k \in V \quad (9)$$

### 5.3.5 FUNCIÓN OBJETIVO

Minimización de los costos de viaje y arriendo de camiones.

$$\text{Min} \sum_{k \in V} cfu_k \cdot x_{0,jk} + \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ijk} \cdot (cve_k \cdot dda_i + cvv_{ij} \cdot d_{ij}) \quad (10)$$

## 5.4 OBSERVACIONES AL MODELO MATEMÁTICO

En la ecuación (1) se modela la condición para que cada cliente deba ser visitado exclusivamente una vez. Esta restricción hace referencia a que la demanda solicitada por un cliente debe estar completamente incluida en alguno de los vehículos. Esto es claro ya que no existen demandas que lleguen a ser mayor que la capacidad de los vehículos seleccionados. En la ecuación (2) se establece que ningún vehículo puede transportar pedidos en que su conjunto sea mayor que la capacidad establecida para el vehículo. En esta restricción se puede apreciar el concepto de flota homogénea presente en el problema, ya que se trabajará con capacidades únicas para definir los tipos de vehículos. En la ecuación (4) y (5) se representa la idea de conservación de flujos en las redes en el sentido que se restringe la solución a que un vehículo visite solamente una vez a un cliente. La ecuación (6) restringe el instante de llegada a un cliente en la secuencia es decir que el instante de tiempo en que se visita al cliente  $j$ , debe considerar el instante de llegada al cliente  $i$  (anterior en la secuencia), el tiempo que debe esperar en él, el tiempo de descarga y el tiempo de viaje entre el cliente  $i$  y  $j$ . Finalmente la ecuación (7) determina que se deben respetar las ventanas de tiempo existente para la entrega de productos en cada uno de los clientes y la condición (8) y (9) hace referencia a la integralidad de las variables de decisión de asignación de cliente a algún vehículo.

En el modelamiento planteado no se considera la opción de asumir un costo de espera hasta activar la ventana de tiempo de los clientes, es decir, se impone de forma explícita que los vehículos deben visitar a los clientes dentro del período posible de entrega. La función objetivo (9) mide el costo de la solución incluyendo la componente de costos fijos por utilización del vehículo en la ruta

y la parte variable que contempla el gasto por demanda entregada y por distancia recorrida.

En esta formulación se asume que la cantidad de vehículos de cada tipo es un número fijo y grande, ya que la empresa utiliza un modelo de arrendamiento de vehículos en los cuáles siempre existe mayor oferta de la utilizada. Este punto es importante puesto que se debe considerar un tamaño para el conjunto  $V$ . Para este problema se utiliza la cantidad histórica de camiones utilizados en el último año.

En resumen, en este problema no sólo se debe decidir las rutas, sino la composición de la flota de vehículos a utilizar. Sin perjuicio de lo anterior, este modelo presentado es para tener un lenguaje familiar dentro de las condiciones que se deben satisfacer en el modelamiento de la heurística central.

La resolución de este problema de forma explícita en algún software comercial sería imposible dada la cantidad de clientes que se deben considerar y la integridad de las soluciones. En las instancias que se trabajaran se consideran cerca de 400 clientes para los cuales existen diferentes ventanas de tiempos. Dada esta problemática es que se procede a mostrar la metodología desarrollada para lograr resolver la problemática actual de la empresa.

## **6. DEFINICIÓN DEL MODELO DE DATOS**

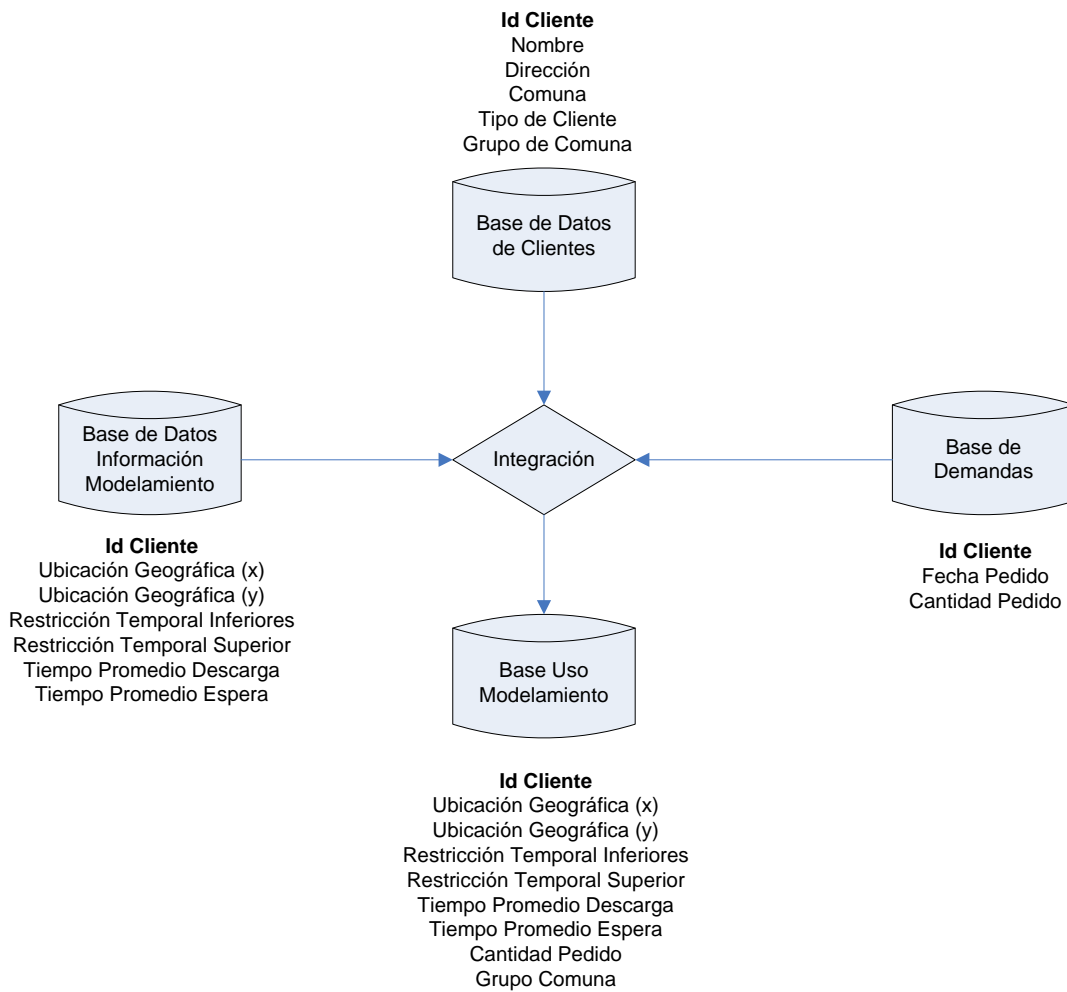
### **6.1 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN**

El modelo antes presentado se basa en la obtención de una cantidad considerable de parámetros que son necesarios en el desarrollo de la metodología utilizada. En base a esto se determinan cuáles serán los requerimientos de información necesarios para poder desarrollar el modelo planteado.

Los parámetros antes mencionados se pueden clasificar en dos partes. En primer lugar están los parámetros definidos como parámetros explícitos, dado que no se necesita algún tipo de cálculo para ser determinados. Entre estos factores se encuentra las ventanas de tiempo de los clientes, la cantidad de producto solicitada por los clientes, la capacidad de los vehículos potenciales a utilizar y la posición geográfica de los clientes.

En la empresa existe una base de datos de los clientes en los cuales se guardan diversos tipos de información, tales como direcciones, comunas, teléfonos y la restricción temporal para la entrega de los pedidos.

La demanda de los clientes es determinada en base a lo ingresado por los vendedores en el sistema central de información, con esto logramos tener una demanda determinística para el siguiente día de envíos. Esta información debe ser obtenida de forma detallada por cada cliente. En general se debe realizar un pre-procesamiento de la información para tener los valores reales de pedido de los clientes. Este punto se explica más adelante.



**Figura 4: Visión Gráfica de Sistema de Información**

La capacidad de los vehículos potenciales a utilizar se conoce con antelación puesto que las empresas de arrendamiento de vehículos son comúnmente utilizadas. Lo importante acá es la capacidad de los diferentes vehículos, puesto que es necesario hacer una transformación de esa información para su utilización.

Con respecto a las posiciones geográficas de los clientes lo que se realizó fue buscar en una aplicación Web las coordenadas “norte” y “este” de cada cliente,

de manera de tener una medida objetiva de distancia entre los clientes. La determinación de las coordenadas de los clientes se realizó para toda la cartera de clientes que tiene la empresa. De esta forma tenemos la información necesaria para determinar el otro grupo de parámetros.

Con la información de los parámetros explícitos podemos comenzar a definir los parámetros calculados. Estos parámetros son aquellos para los cuales se define una forma de cálculo para su obtención. Un caso de estos parámetros corresponde a la distancia entre clientes. Para esto se tomó la consideración en la distancia entre clientes como una medida euclidiana. Para esto lo que se realiza es buscar las coordenadas geográficas en base a las direcciones de los clientes. La idea principal de esto es obtener las distancias existentes entre los clientes, para lograr determinar los Costos de Viaje entre clientes, lo que a su vez permite encontrar los costos asociados a las rutas generadas y el costo total del programa de ruteo generado

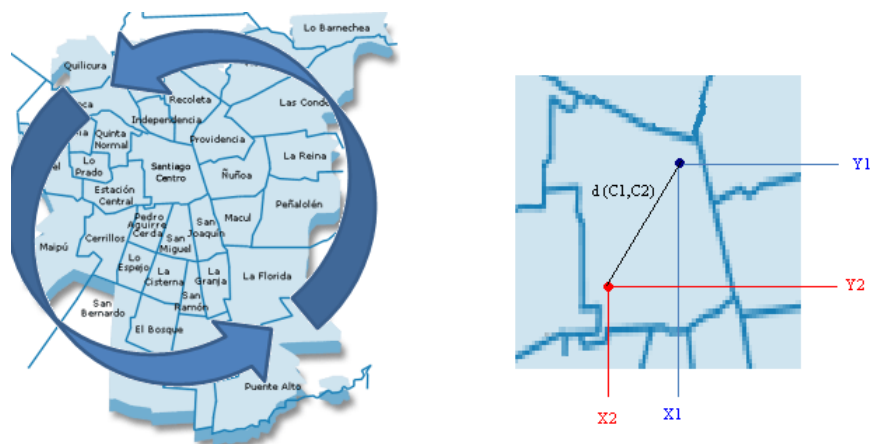


Figura 5: Distancia entre Clientes

Otro factor es el Tiempo de Viajes entre clientes, ya que se determina mediante el cálculo de la distancia entre las coordenadas de posición de dos clientes y una velocidad constante de viaje para los vehículos. Esta velocidad constante fue definida en 50 [Km/Hr].

Otro aspecto importante es la definición de los tiempos de espera y descarga de cada cliente. Los tiempos de espera se deben entender como el tiempo que debe esperar el vehículo antes de comenzar la descarga de los pedidos. En el caso de supermercado, estos valores llegan a ser muy altos dado el nivel de documentos que se deben firmar. El tiempo de descarga corresponde a valores promedio asociado a la entrega del producto. Dentro de este tiempo de descarga se encuentran los tiempos desde que se toma el pedido, se traslada y se deja en la ubicación definida por el cliente. Estos valores son utilizados para determinar cuánto será el tiempo que permanecerá el vehículo en un cliente antes de salir a visitar a otro vehículo.

Para definir estos parámetros se realizó un trabajo con información histórica de pedidos en los cuales se establecieron estos tiempos. De esta manera se definieron rangos de valores de descarga por unidad de producto entregado y de espera para cada cliente.



<b>Tiempo Descarga [seg / dda]</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>SPMK</b>	<b>Total</b>
10	14.7%	3.4%	0.8%	18.9%
15	24.1%	5.5%	1.0%	30.5%
20	6.1%	1.2%	0.4%	7.7%
25	16.5%	3.0%	0.8%	20.3%
30	12.1%	2.4%	0.5%	15.1%
35	2.7%	0.8%	0.2%	3.7%
40	2.8%	0.6%	0.3%	3.7%
<b>Total</b>	<b>79.0%</b>	<b>16.9%</b>	<b>4.0%</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 3: Distribución de tiempos de descarga según tipo de cliente**

<b>Tiempo Espera [s/dda]</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>SPMK</b>	<b>Total</b>
0:11:40	11.0%	2.5%	0.6%	14.1%
0:16:40	11.5%	2.1%	0.6%	14.1%
0:20:00	10.3%	2.0%	0.6%	13.0%
0:20:50	10.9%	2.7%	0.6%	14.2%
0:21:40	11.2%	2.2%	0.6%	14.0%
0:25:00	11.2%	2.6%	0.3%	14.1%
0:36:40	10.6%	2.1%	0.4%	13.1%
3:59:10	1.3%	0.4%	0.1%	1.8%
4:00:00	1.1%	0.4%	0.2%	1.7%
<b>Total</b>	<b>79.0%</b>	<b>16.9%</b>	<b>4.0%</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 4: Distribución de tiempos de espera según tipo de cliente**

Asimismo, un factor relevante es el costo fijo de utilización de los vehículos. Dentro de este factor se contempla todo lo referente al uso del vehículo tal como las remuneraciones del personal (chofer y ayudantes), uniformes, patentes, seguros, repuestos, lavados, mantenimiento, etc. En lo que sigue, nos

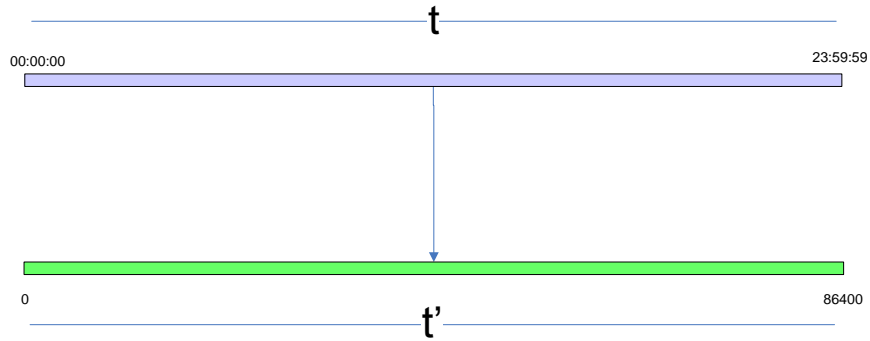
referiremos a Costo Fijo de Utilización del Vehículo, para resumir toda esta información.

## **6.2 FILTROS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Para algunos de los parámetros solicitados se requirió realizar una etapa de procesamiento de la información para poder ingresarlos al modelo.

En primer lugar las capacidades de los vehículos se deben trabajar como unidades de cajas de producto (medida del parámetro de la demanda) de manera de hacer comparable los parámetros correspondientes, esto se ve en la ecuación (2) del modelo planteado en el capítulo anterior.

Junto con lo anterior es necesario hacer una transformación del horizonte de trabajo que tiene la empresa. En otras palabras lo que se desarrolla es una transformación a segundos de los tiempos considerando que el día transcurre desde un valor 0 (00:00:00) a un valor 86.400 (23:59:59). Esto se realiza para poder hacer las comparaciones de las ventanas de tiempo con los instantes de tiempo en los que se visitan a los clientes.



**Figura 6: Transformación de tiempos**

## 7. IMPLEMENTACION DEL MODELO

En general, los modelos combinatoriales aplicados a problemas reales – como el presentado en este proyecto – son de difícil solución, especialmente cuando el número de variables enteras y el de las relaciones que las ligan son grandes.

En este capítulo se presenta el enfoque utilizado para resolver el modelo de programación matemática propuesto en capítulos anteriores, la descripción de una instancia de prueba y los resultados obtenidos para esta. Además se plantea una forma de agrupación que acelera la resolución del problema.

### 7.1 ENFOQUE DE SOLUCIÓN

Se considera un problema de ruteo de vehículos con flota homogénea y la existencia de ventanas de tiempo como una variante del clásico problema de ruteo de vehículos. Nuestro problema no difiere del clásico problema de ruteo dado que se considerará una flota de vehículos con capacidades similares, costos fijos y costos variables y que los clientes tienen ventanas fijas y conocidas en las

cuales se les puede atender, sin embargo es interesante ya que propone una metodología para trabajar ruteos con una gran cantidad de clientes por ruta. Por lo tanto el problema considera la creación de itinerarios de rutas, comenzando y terminando en una bodega especial de la empresa, realizada por diferentes tipos de vehículos considerando que la demanda acumulada por los clientes de esa ruta no supere la capacidad del vehículo.

Lo anterior se puede ver formulado en capítulos anteriores, en donde se ve la existencia de una formulación lineal entera. Los problemas formulados en programación entera tienen mayor dificultad para ser resueltos. En base a la investigación realizada no existe un algoritmo de aplicación general que pueda resolver este tipo de problemas en tiempo polinomial. La falta de este algoritmo general da cabida a intentar resolver este tipo de problemas mediante varios tipos de algoritmos. Existen tres categorías principales de algoritmos de solución que se evaluaron:

- (a) Algoritmos Exactos, estos aseguran la obtención de una solución óptima a expensas de un número alto de iteraciones. Dentro de este grupo se encuentran los algoritmos planos cortantes, ramificación – acotamiento (*Branch and Bound*), ramificación-corte (*Branch and Cut*) y programación dinámica.
- (b) Algoritmos de Aproximación, estos obtienen una solución sub-óptima en un tiempo polinomial, junto con una cota respecto al grado de sub-optimalidad presente.

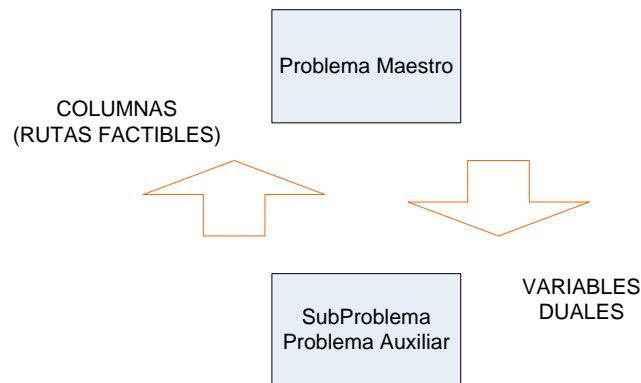
(c) Algoritmos heurísticos proveen una solución sub-óptima, pero sin garantizar su calidad, además su tiempo de ejecución no se garantiza que sea polinomial, estudios empíricos apuntan a que en la mayoría de los casos se logra una buena solución rápidamente, algunos ejemplos de estos métodos son las búsquedas locales, *Simulated Annealing*, búsqueda TABU, Algoritmos genéticos.

En base a esto se profundizó más en la estructura del problema y en las nuevas técnicas de solución para problemas de ruteo. De la revisión realizada se consideró que la mejor estructura de solución para este problema se basa en un enfoque de Generación de Columnas, dado el gran número de clientes que se tiene en el problema, además de la existencia de ventanas de tiempo para las entregas de los pedidos.

La idea básica de esta formulación consiste en descomponer un problema original en dos tipos de problemas, conocidos como Sub-Problema y Problema Maestro, que es un problema de cubrimiento (o partición) de conjuntos. La idea principal de esta separación consiste en tener dos etapas de solución. En la primera se generan soluciones factibles de manera rápida y se envían a una segunda etapa en la que se soluciona el problema considerando solamente un subconjunto de las soluciones factibles totales del problema. Una vez solucionado el problema se envía información desde la segunda etapa de manera de actualizar los valores de costos para soluciones factibles. La idea es lograr ingresar soluciones factibles que aporten al objetivo del problema.

De una forma más formal el Problema Maestro será un problema que sea la relajación de un modelo Lineal Entero Mixto que puede ser resuelto

rápidamente aplicando el algoritmo Simplex. Ahora, las variables duales obtenidas luego de la resolución del Problema Maestro relajado son usadas como datos de entrada en la función objetivo del generador de columnas (Sub-Problema). La salida o resultado del Sub-Problema es una nueva columna o ruta que es ingresada al Problema Maestro y se caracteriza por tener un costo reducido negativo de acuerdo a las variables duales entregadas. Cabe mencionar que las columnas, en la mayoría de los casos, son diferentes de una iteración a otra del proceso, dado que tanto las variables duales como la solución del Problema Maestro relajado cambian de una iteración a otra.



**Figura 7: Esquema Generación de Columnas**

En este caso particular, el Sub-Problema consiste en un problema de ruta mínima con restricción de recursos. Una ruta o columna se genera a partir de una ruta mínima desde la bodega pasando por diversos clientes y volviendo a la bodega. La restricción de recursos proviene de respetar las ventanas de tiempo satisfaciendo la demanda solicitada. La función objetivo de este problema de ruta mínima será definida de forma tal que las rutas factibles sean las de mínimo costo reducido.

## 7.2 PROBLEMA MAESTRO

En resumen el Problema Maestro elige las mejores rutas (o columnas) dentro de un conjunto ya conocido de rutas factibles, mientras que el sub problema es usado para proponer nuevas rutas factibles para mejorar la solución actual del problema de cubrimientos de conjunto.

Una solución factible se puede ver con una columna, esta columna es la unidad básica de este tipo de modelos y corresponde a una columna de la matriz completa de restricciones del Problema Maestro. Frecuentemente, cada columna tiene una interpretación intuitiva y permite visualizar de mejor forma el problema que se está modelando. En nuestro caso, una columna corresponde a un programa de viajes o itinerario para una jornada de trabajo de un vehículo en particular. Es importante notar que la columna por si sola no nos permite conocer la dirección de la ruta, sino que solamente los clientes que estarán presente en ella. Esto es importante puesto que es necesario encontrar diferentes sucesiones de clientes para así tener rutas más económicas.

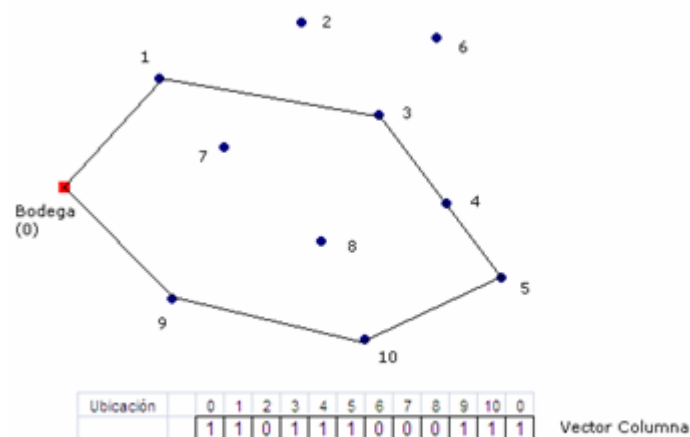


Figura 8: Gráfica de columnas (rutas) generadas por Sub-Problema

Una representación de este problema se resume de la siguiente manera. Consideremos la variable,

$$\delta_{ir} = \begin{cases} 1, & \text{si el vehículo visita al cliente } i \text{ en la ruta } r \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

De esta manera podemos formular el problema con la estructura del conocido problema de *Set covering*, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{r \in R} c_r \cdot x_r \\ \text{s.a} \quad & \sum_{r \in R} \delta_{ir} \cdot x_r \geq 1, \quad \forall i \in N \setminus \{0\} & (1) \\ & x_r \in \{0,1\} \quad \forall r \in R & (2) \end{aligned}$$

La variable de decisión es de carácter binario, y toma un valor 1 si es que la relación vehículo-ruta es activada y 0 de otro modo. El objetivo de este problema es el minimizar el costo total de todas las rutas seleccionadas. La restricción (1) asegura que cada cliente es asignado a solamente una ruta factible. Restricción (2) indica que el número de vehículos utilizados debe ser un valor entero (ya que a cada ruta se le asignará un vehículo).

Considerando la relajación lineal del Problema Maestro, antes mencionado, nos ayuda directamente a tener una cota inferior del problema original. Sin embargo en este problema relajado se puede llegar a tener una gran cantidad de relaciones ruta-vehículo para problema de pocos clientes.



Un punto importante a destacar es que, como ya se mencionó, el tamaño del Problema Maestro, y por ende el tiempo de resolución, dependen de la cantidad y de la “calidad” de las columnas que sean ingresadas al Problema Maestro. Inicialmente una solución factible es generada y se van agregando columnas al problema a medida que se van realizando las iteraciones o llamadas al generador de columnas.

Existen varias alternativas para la selección de las columnas. La primera de ellas es generar un conjunto con todas las posibles columnas, es decir, generar todos los posibles viajes que un vehículo de un determinado tipo puede hacer durante el día. Sin embargo, esta alternativa es muy difícil de aplicar debido a la gran cantidad de columnas que podría ser necesario generar.

Como alternativa para lidiar con el gran tamaño que puede llegar a tener el conjunto de todas las columnas posibles se genera una metodología que genere y seleccione sólo algunas de las columnas (rutas) posibles en el sistema.

La decisión de qué ruta será ingresada se realizará calculando el costo reducido de todas las rutas, haciendo ingresar al Problema Maestro sólo columnas con costos reducidos negativos. La forma de cálculo de estos costos reducidos se basa en la obtención de las variables duales del Problema Maestro, considerando el siguiente cálculo,

$$\bar{c}_j = c_j - \sum_{j \in N \setminus \{0\}} \pi_j \delta_{jr}$$

Si consideramos el conjunto con todas las columnas posibles combinado con el cálculo de los costos reducidos y el ingreso selectivo de columnas al Problema Maestro, tendremos una metodología equivalente a resolver un Sub-Problema en cada iteración que genere la mejor columna automáticamente, es decir, sin tener el conjunto total de columnas creado a priori sino que utilizando sólo una parte de estas.

A continuación se presenta la metodología heurística que nos permitirá generar las rutas. En otras palabras, en el capítulo siguiente, se presentará el Sub-Problema asociado a nuestro problema.

### 7.3 GENERACION DE RUTAS

El siguiente flujo permite conseguir las rutas factibles a ingresar en el Problema Maestro y de esta forma encontrar la solución del problema. Este punto es el aporte principal de este trabajo, ya que contempla la utilización de una heurística que genere soluciones factibles de forma eficiente.

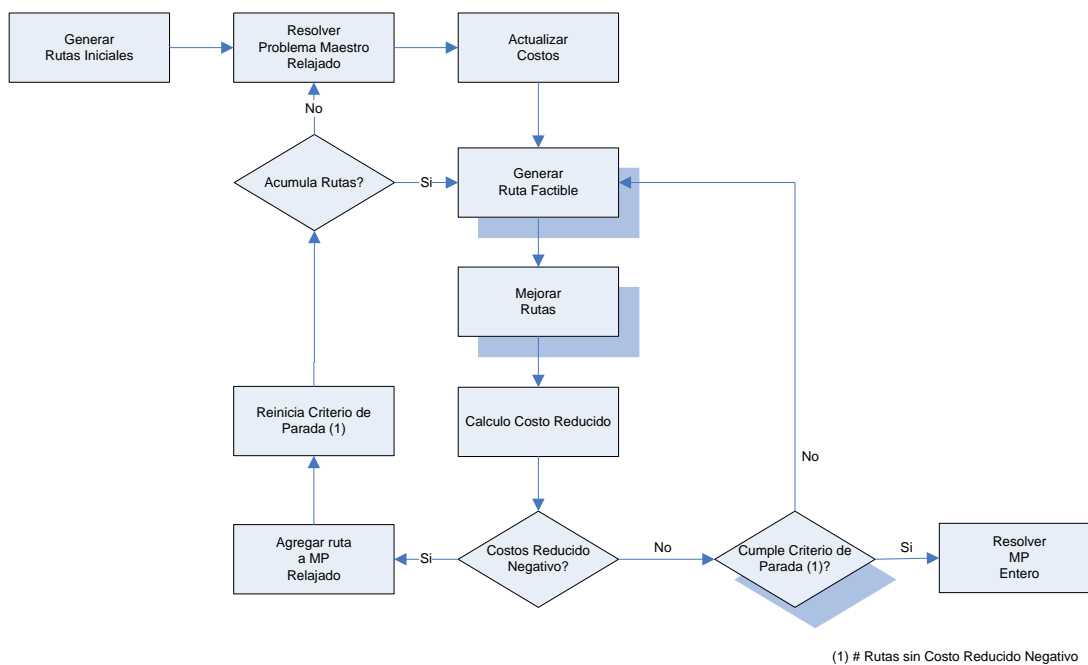
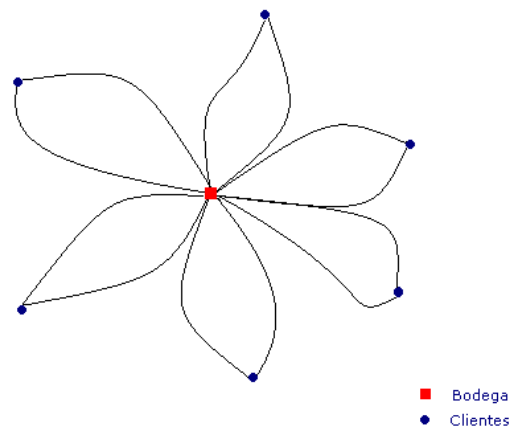


Figura 9: Metodología de solución

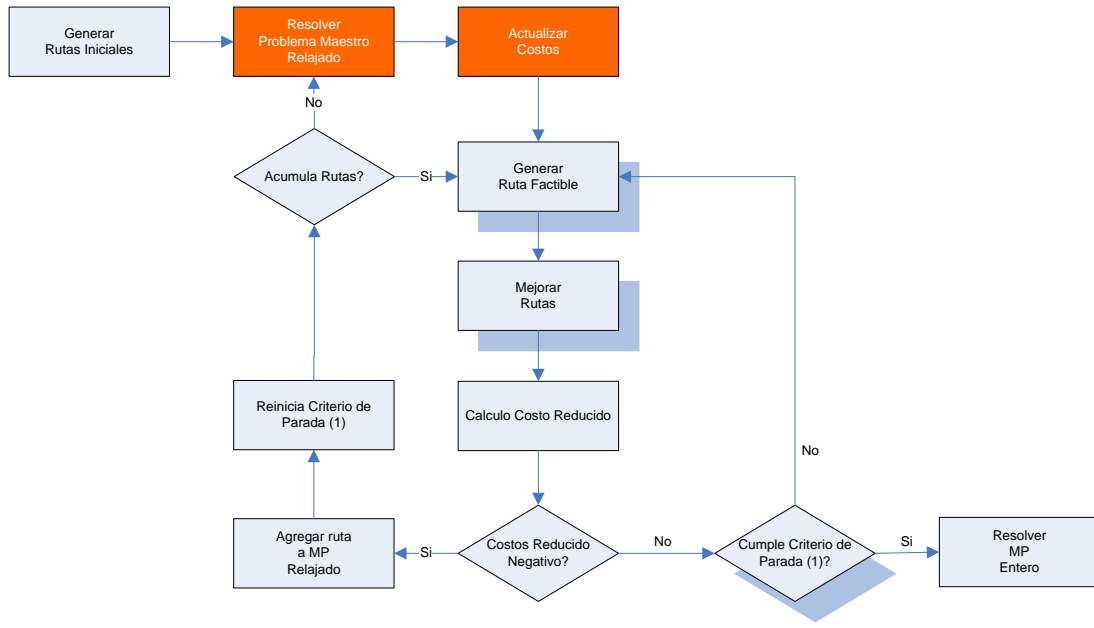
La primera etapa en la que se debe trabajar corresponde a la generación de rutas iniciales. Para esto se genera una ruta por cada uno de los clientes que están siendo considerados para la programación de las rutas. La idea principal de esto es lograr una ruta factible para cada cliente, de manera de asegurar que todos los clientes serán atendidos y por otro lado tener el pie inicial para comenzar con la heurística basada en Generación de Columnas, ya que se necesita definir valores de variables duales para comenzar con la creación de nuevas rutas factibles.

Es fácil ver que esta primera solución factible es muy poco eficiente, dado que no considera posibles ahorros al unificar clientes en una ruta. Este es un punto interesante de estudiar, puesto que buenas soluciones iniciales (costos menores) puede llevar a que la heurística apunte a encontrar las soluciones de forma más rápida y eficiente.



**Figura 10: Estructura rutas iniciales**

Como ya vimos, después de generar las rutas iniciales y resolver el Problema Maestro con este conjunto se logra tener valores iniciales de las variables duales. Luego de esto tenemos los parámetros necesarios para la actualización de los costos para las siguientes iteraciones.



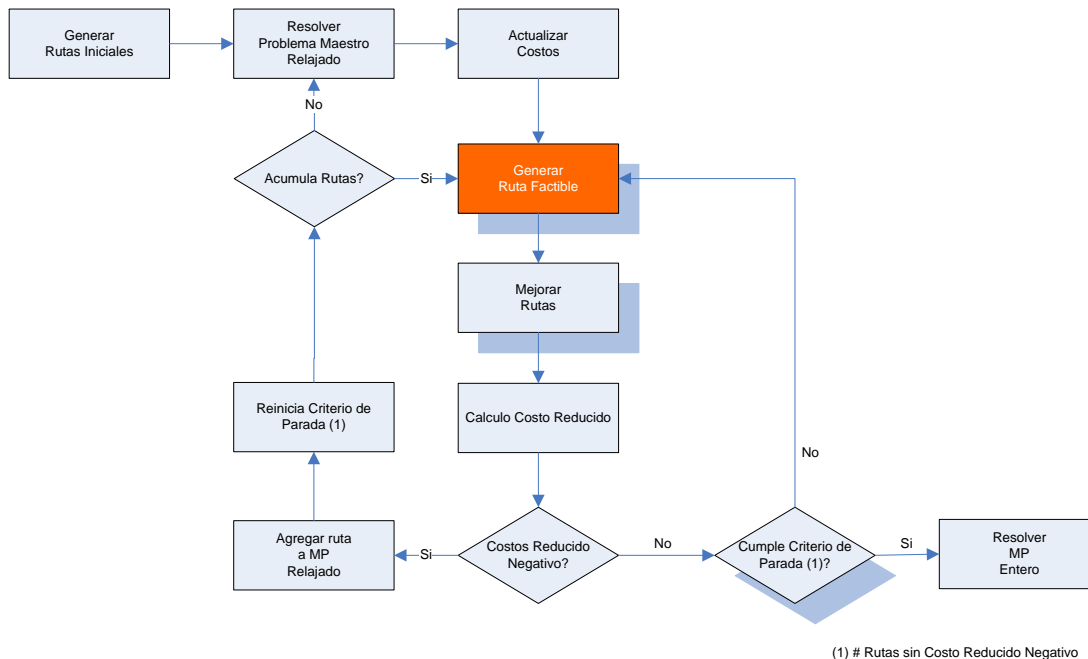
(1) # Rutas sin Costo Reducido Negativo

**Figura 11: Cálculo de costos reducidos**

Los costos reducidos se determinan actualizando el valor del costo de la ruta con el valor de las variables duales de las restricciones del Problema Maestro. Es importante notar que el valor de las variables duales está asociado a cada uno de los clientes presentes en la programación del Problema Maestro. Denominaremos como  $\pi_i$  a estos valores. De esta forma la estructura algebraica de actualización queda de la siguiente manera:

$$\bar{c}_r = c_r - \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \pi_i \cdot \delta_{ir}$$

Con esta primera actualización se comienza a generar las rutas factibles que pueden ser ingresados al Problema Maestro.



**Figura 12: Generación de rutas factibles**

La generación de las rutas en cada etapa se hace siguiendo una secuencia iterativa en la que el primer paso de esta secuencia es seleccionar cuál será el primer cliente a considerar en la ruta.

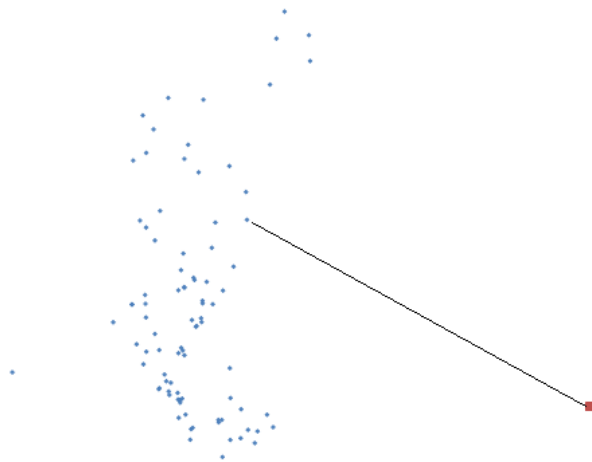
Dentro de las posibilidades que se definieron para la selección del primer cliente tenemos:

- Elección Aleatoria del primer cliente.
- Elección según el nivel de demanda del cliente. Esto referido a que clientes con un mayor nivel de pedidos no deberían depender del uso de la capacidad del camión para el ingreso en la ruta.
- Elección según restricción horaria. Se considera con mayor probabilidad de ser el primer cliente de la ruta a aquellos clientes en

los cuales la hora de apertura de sus locales sea lo más temprano posible.

- Elección según restricción horaria. Se considera con mayor probabilidad de ser el primer cliente de la ruta a aquellos clientes en los cuales la hora de cierre de sus locales sea lo más próximo posible.

Estos criterios fueron implementados y revisados para evaluar cuál es el que mejores resultados podía entregar de manera de obtener buenas soluciones en tiempos razonables.



**Figura 13: Inicialización de Rutas**

En cada iteración se consideran tres tiempos para cada cliente. Estos tiempos corresponden al instante de tiempo en el que el vehículo ingresó al cliente, tiempo de estadía y el instante de tiempo de salida del cliente. El tiempo de ingreso al cliente corresponderá al tiempo de llegada al cliente en cuestión (el que estará determinado por el tiempo de salida del cliente anterior más el tiempo de viaje entre el cliente anterior y el actual). El tiempo de estadía en el cliente corresponderá a la suma de los tiempos de espera en el cliente y al tiempo de descarga de pedido (determinado por un tiempo promedio de descarga de unidad de pedido y la cantidad de demanda solicitada por el cliente ingresado en la

ruta). El tiempo de salida corresponderá a la suma de los tiempos de llegada más el tiempo de estadía.

Una vez seleccionado el primer cliente para la ruta se procede a realizar la actualización de las variables de estado del problema. En primer lugar se procede a actualizar el tiempo de viaje, el cual corresponderá, en este primer cliente, al valor de la ventana de inicio del cliente dado que no existe un cliente anterior.

Por otra parte se procede a actualizar la variable de estado de la capacidad, la cual corresponderá a la demanda de producto solicitada por el cliente ingresado.

Al tener ingresado el primer cliente y actualizado las variables de estado de tiempo de viaje y capacidad del vehículo, se procede a seleccionar el siguiente cliente a ingresar a la ruta. Para esto se determinan todos los clientes factibles y el costo asociado de viajar a ellos. La factibilidad de un cliente dependerá de 5 factores:

- i. Condición Ventana Inferior: Se evalúa para el cliente si el tiempo de salida del último cliente ingresado a la ruta más el tiempo de viaje cumple la cota inferior de la ventana de tiempo definida por el cliente.

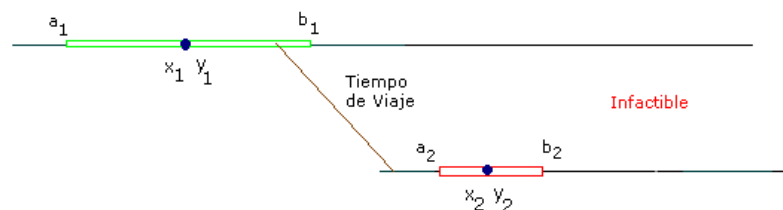
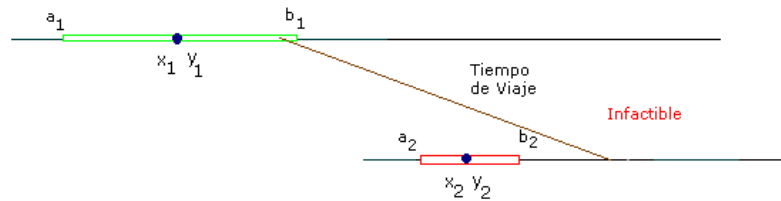


Figura 14: Condición de infactibilidad de ventana inferior

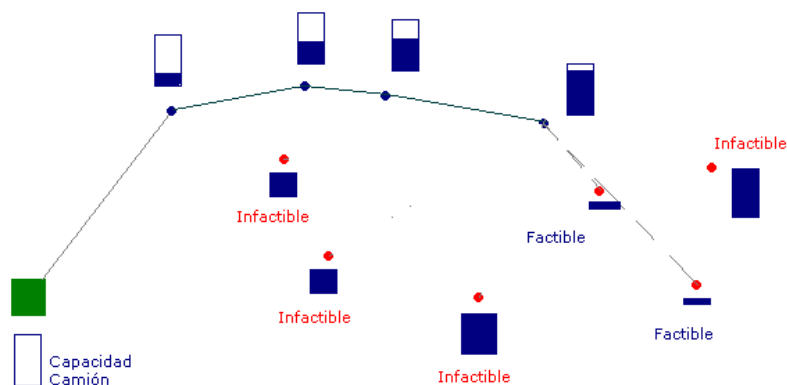


- ii. Condición Ventana Superior: Se evalúa para el cliente si el tiempo de salida del último cliente ingresado a la ruta más el tiempo de viaje cumple la cota superior de la ventana de tiempo definida por el cliente.



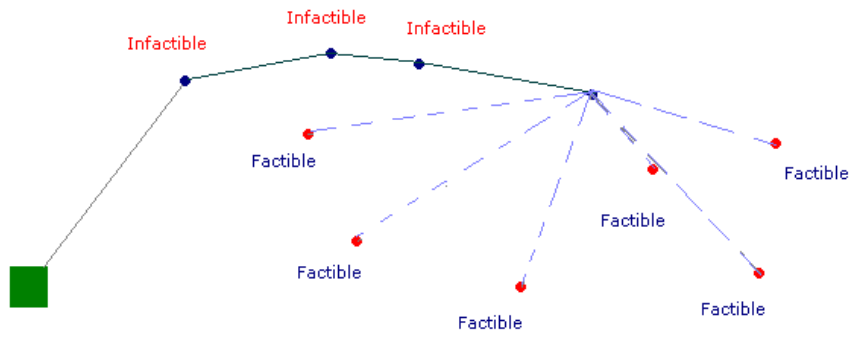
**Figura 15: Condición de infactibilidad de ventana superior**

- iii. Condición Capacidad: Se evalúa para el cliente si la demanda acumulada por los clientes ingresados en la ruta más la demanda del cliente potencial a ingresar a la ruta cumple la capacidad asignada del vehículo.



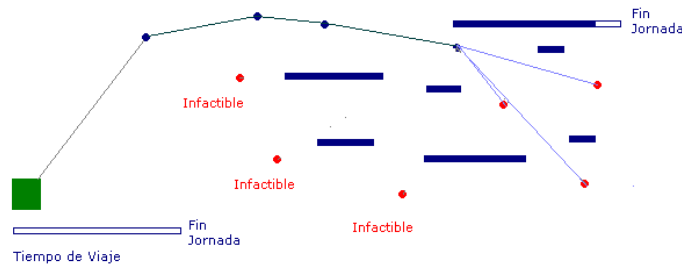
**Figura 16: Condición capacidad**

- iv. Condición Uso: Se evalúa para el cliente si ha sido utilizado en la ruta en una etapa anterior.



**Figura 17: Condición de utilización de clientes**

- v. **Condición Fin Jornada:** Se evalúa si el tiempo de viaje acumulado en la ruta está dentro del horizonte de tiempo asignado para el ruteo. Esta condición está referida para ver si se pueden mejorar los horarios asociados a la jornada laboral.



**Figura 18: Condición fin de jornada**

Por lo tanto cuándo se busca ingresar un cliente a la ruta se debe cumplir estas 5 condiciones. Esto se trabaja revisando las condiciones simultáneamente para cada cliente.

**Cliente Actual** 5 **Ruta Actual** 0-4-9-5  
**Tiempo Viaje Actual** 2:53:45  
**Capacidad Actual** 60 56% Capacidad Actual

Cliente	Condición Ventana Inferior	Condición Ventana Superior	Condición Uso	Condición Capacidad	Condición Fin Jornada	Indicador Factibilidad
1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	1	1	1	0
3	1	1	1	1	1	1
4	1	0	0	0	1	0
5	1	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0

**Tabla 5: Factibilidad de Ingreso de Clientes a Ruta**

Una vez determinados los clientes factibles a ingresar a la ruta se procede a determinar cuál será el cliente seleccionado para el ingreso. Para ello se calculan diferentes indicadores, entre ellos:

- El costo asociado al ingreso de cada cliente factible. Este costo solamente contemplará la distancia (llevada a unidades monetarias) y el costo de la demanda a entregar).
- La holgura de tiempo existente para el fin de la restricción horaria.

En base a estos dos indicadores se generó un indicador de “costo reajustado” para cada cliente,  $ca_j$ , de manera que los clientes que tienen una holgura menor

al fin de la restricción horaria ponderaran su costo según las siguientes formulaciones,

Costo de Trazo entre cliente i y j:  $c_{ij} = (c_{ij}^{viaje} + c_j^{desc} \cdot d_j)$

Costo Ajustado de Trazo entre cliente i y j:  $c_{ij}^{ajustado} = (c_{ij}^{viaje} + c_j^{desc} \cdot d_j) \cdot \alpha_j$

Costo Parcial Ruta:  $C_{r\{e_1, e_2, \dots, e_i, e_j\}} = C_{r\{e_1, e_2, \dots, e_i\}} + C_{ij^*}$

donde,  $C_{r\{e_1, e_2, \dots, e_i\}}$  es la configuración de la ruta que considera i clientes antes de seleccionar el cliente j-ésimo y el índice que minimiza el costo del tramo de ruta,  $j^* = \arg \min \{(c_{ij}^{viaje} + c_j^{desc} \cdot d_j) \cdot \alpha_j\}$ .

La idea de este indicador es que el parámetro  $\alpha$  permite ver el tipo de peso que le damos a la condición de holgura al término de la restricción horaria. En caso de que  $\alpha=1$ , no se considerará y solamente se tomará la condición del menor costo de visitar al cliente. Por otro lado en la medida que  $\alpha < 1$  mayor será el peso que tiene la ventana de tiempo.

Es importante notar que en el cálculo del costo de la ruta se usara el valor del costo no ajustado. De otra forma, el indicador  $\alpha$  solamente permitirá definir un costo para ordenar a los clientes dependiendo de su urgencia de atención.

En adelante el concepto de “costo ajustado” y costo se utilizará indistintamente.

**Cliente Actual** 5 **Ruta Actual** 0-4-9-5  
**Tiempo Viaje Actual** 2:53:45  
**Capacidad Actual** 60 56% Capacidad Actual

Cliente	Indicador Factibilidad	Costo Ingreso	Ponderador	Costo Ajustado
1	1	230.43	0.5	115.215
2		0	0	0
3	1	343.03	1	343.03
4		0	0	0
5		0	0	0
6		0	0	0
7	1	120.4	1	120.4
8	1	2345.4	0.1	234.54
9		0	0	0
10		0	0	0

Cliente a Ingresar	Modalidad 1	Modalidad 2	Modalidad 3
	7	3	2

**Tabla 6: Método de Cálculo del Costo de Clientes a Ingresar a la Ruta**

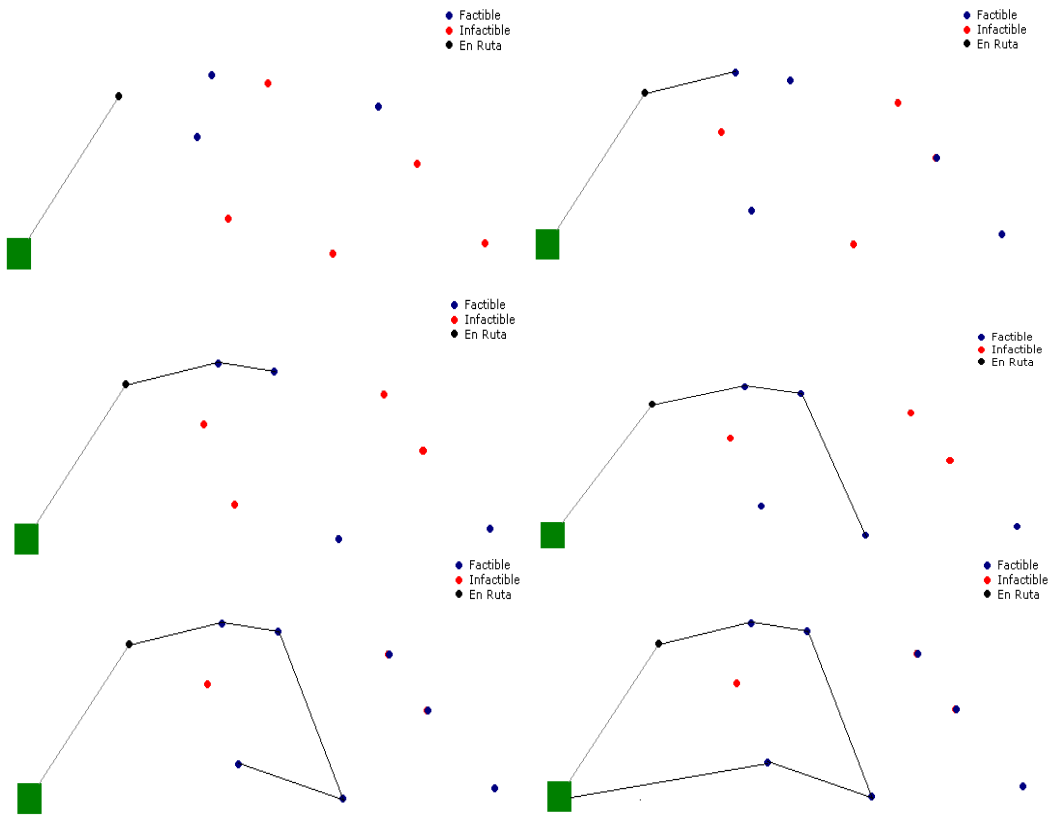
Como ya definimos el cálculo del costo de los clientes corresponde al valor de la distancia a recorrer para llegar a él más el costo asociado a la entrega de los productos en ese cliente. Los costos asociados a los clientes factibles se ordenaron de forma ascendente de manera de obtener un vector de costos y clientes asociados. Una vez determinado estos costos ordenados, se generaron 3 posibles formas de ingreso de los clientes. Estas son detalladas a continuación:

- i. Selección Aleatoria de Clientes: Se selecciona un cliente de forma aleatoria entre los 5 menores costos ordenados. De esta forma se permite generar rutas que no sean de menor costo. Esto nos permite

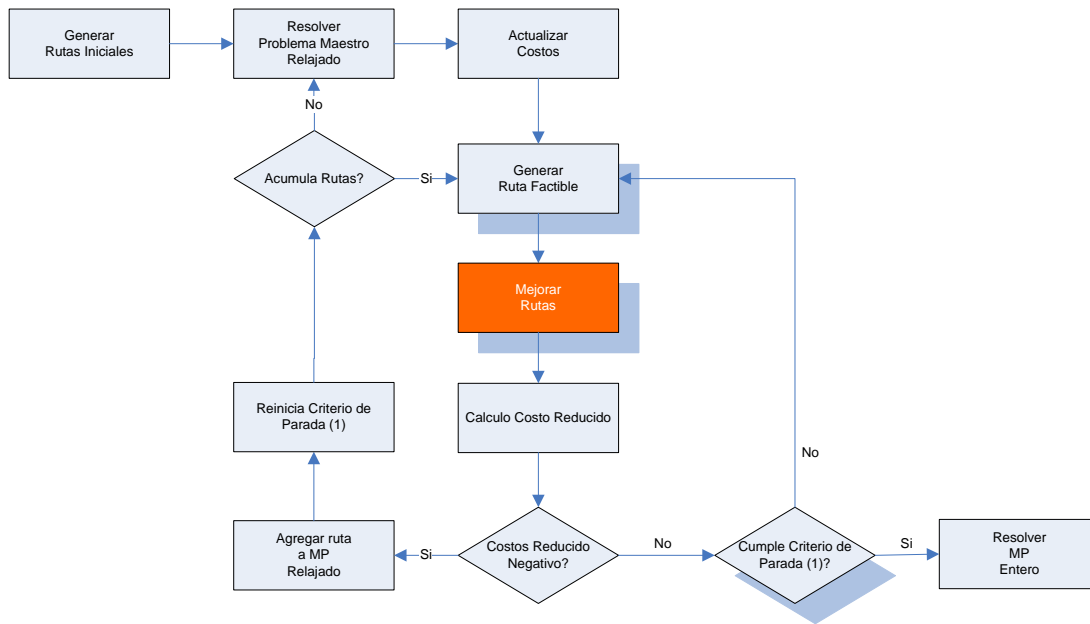
ingresar una mayor cantidad de posibilidades de rutas al Problema Maestro. Esta idea se basa en la aplicación de un método *GRASP* para la elección del siguiente cliente lo que nos permite encontrar un trazo de ruta no necesariamente de mínimo costo pero si factible. Esta elección puede generar una mejora en las iteraciones siguientes en la medida que se ajusten los costos reducidos de las variables en cuestión.

- ii. Selección Aleatoria Ponderada de Clientes: Se selecciona un cliente factible de forma aleatoria entre los 5 menores costos ordenados. A diferencia del caso i. en este caso se le da una probabilidad de selección mayor al de menor costo y el resto de las probabilidades se distribuyen de forma descendente. La idea de esto es que en la medida que se vayan generando más rutas la tolerancia a tener soluciones peores se va haciendo menor.
- iii. Selección Mínimo Costo: Se selecciona el cliente factible con el menor costo de visita.

En general se probaron todas las opciones, siendo el segundo caso la que entregó mejores resultados. Luego de seleccionado el cliente se ingresa a la ruta y se actualizan los valores de las variables de estado. Esto se realiza iterativamente hasta que no existan clientes factibles.



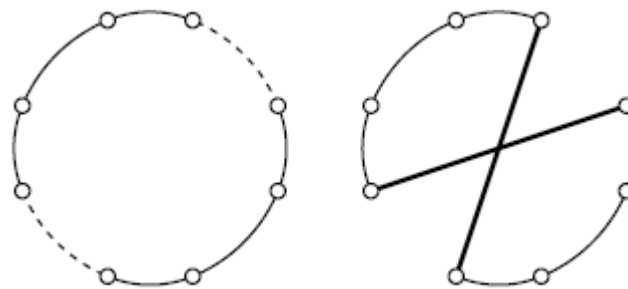
**Figura 19: Heurística de Generación de Ruta (Vista Gráfica)**



(1) # Rutas sin Costo Reducido Negativo

**Figura 20: Mejoramiento Rutas**

Una vez generada la ruta se procede a una etapa de mejoramiento de las rutas generadas de manera de generar las mejores rutas posibles en cada iteración. El mejoramiento de las rutas se realizó intercambiando lugares de dos clientes dentro de la ruta. En caso que el intercambio de estos dos clientes genera una disminución en el costo de la ruta se procede a evaluar su factibilidad.

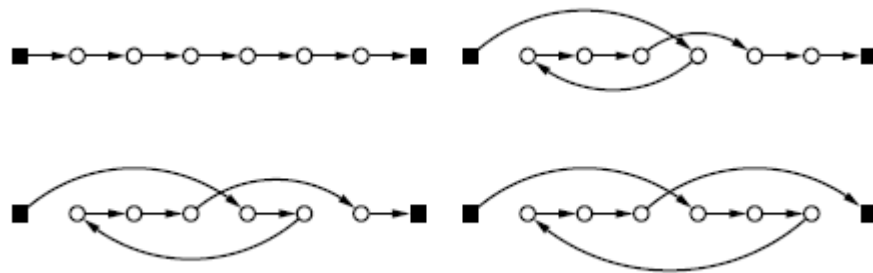


**Figura 21: Intercambio 2-Opt en Ruta**

La forma de intercambio de clientes se realizó seleccionando dos clientes aleatoriamente dentro de la ruta. Este intercambio de rutas se realizó definiendo



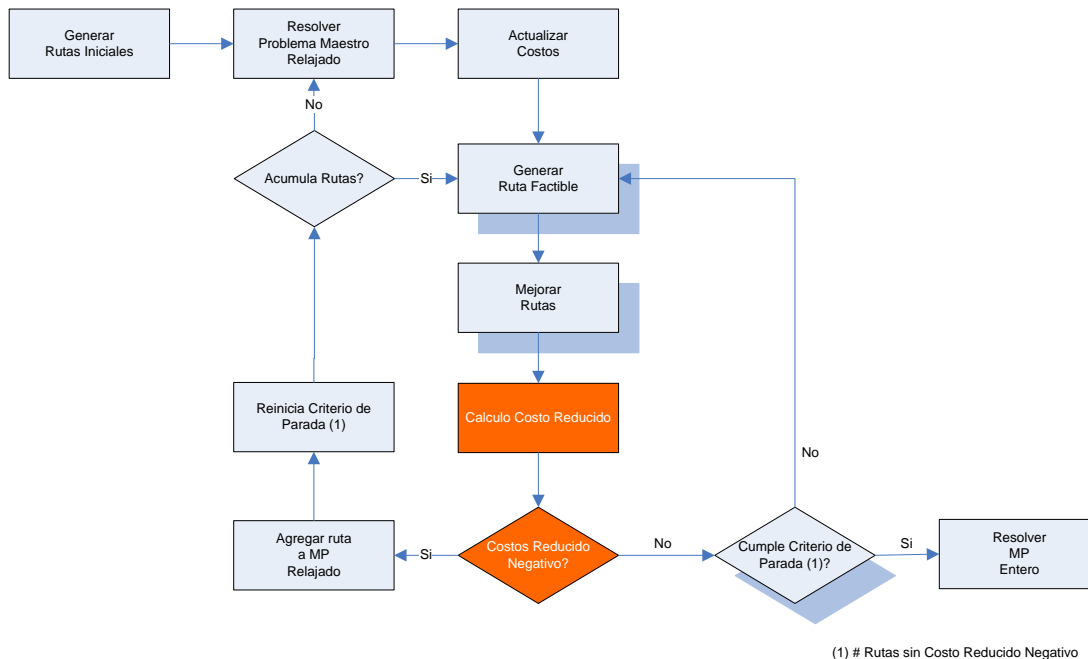
un criterio de parada relacionado con el número de intercambios sin mejoras. La idea es simple, en caso de que no se produzcan mejoras luego de un número definido de iteraciones, se considera que la ruta no puede ser mejorada. En caso de que la ruta factible se mejore su costo se reinicializa el criterio de parada. Una vez realizado esto se busca un mejoramiento de la ruta haciendo un intercambio secuencial de clientes dentro de la ruta, esto se puede ver reflejado de mejor manera en la siguiente figura:



**Figura 22: Intercambio Secuencial de Clientes**

La idea principal de esto es revisar la posición de los clientes dentro de la ruta para determinar en qué lugar genera un menor costo.

Es importante notar que al tener rutas con un número alto de cliente, es necesario definir un criterio que considere un número de iteraciones relativamente alto. En general se utilizará un criterio que toma el cuadrado del largo de la ruta, como iteraciones sin mejoras para definir el criterio de parada.



**Figura 23: Validación Costo Reducido Negativo**

Una vez finalizado el mejoramiento de las rutas se procede a evaluar si la ruta generada (con el mejoramiento) genera o no un costo reducido negativo. Para esto se procede a calcular el costo reducido de la ruta con la formulación antes explicada:

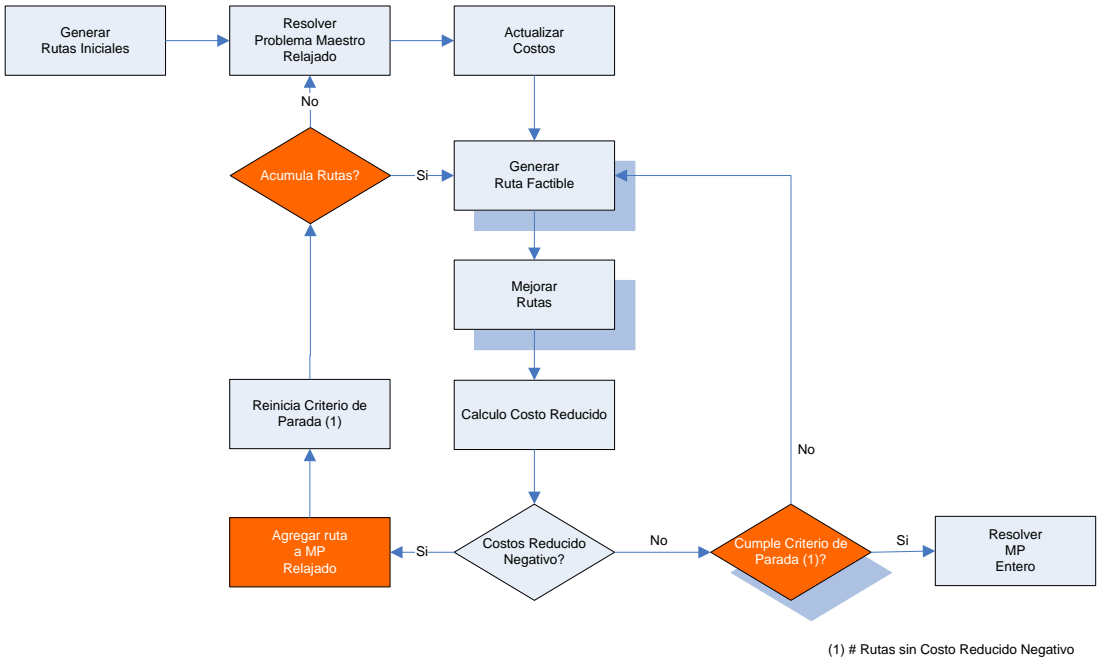
$$\bar{c}_r = c_r - \sum_{i \in N \setminus \{0\}} \pi_i \cdot \delta_{ir}$$

Con el cálculo de los costos reducidos se determina si esta ruta generada es recomendable ingresar al Problema Maestro.

Se define la regla que requiere que una ruta será ingresada solamente si tiene un costo reducido negativo. En caso de que la ruta generada tenga un costo reducido negativo ingresará al Problema Maestro. Al ingresar la ruta al Problema Maestro se evalúa si se resuelve el problema directamente o se

acumula una cantidad de columnas antes de realizar la solución del problema. En nuestro caso se agregan en grupos de 100 columnas antes de realizar la solución del Problema Maestro.

Por otro lado, en caso de que la ruta generada no tenga un costo reducido negativo se procederá a generar otra ruta.



**Figura 24: Criterio de Parada según Costo Reducido**

Es importante notar que la heurística planteada iterara hasta que se cumpla el criterio de parada definido como **número máximo de intentos de creación de rutas con costo reducido negativo**. Este criterio se traduce en que se generarán rutas hasta que no se pueda encontrar una ruta luego de un número grande de intentos.

Luego cumplidos todos los criterios incluidos en esta heurística se procede a resolver el Problema Maestro de forma entera de manera que con las rutas generadas proceda a encontrar una configuración de rutas - clientes que permita dar solución al problema.

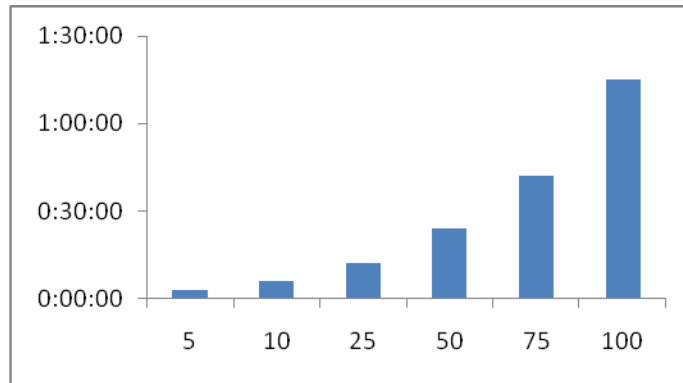
## **8. SOLUCION DEL MODELO**

### **8.1 INSTANCIA DE PRUEBA**

Para calibrar los parámetros y criterios de parada en cada etapa existente en la heurística se realizan diferentes escenarios iniciales que consideran una cantidad abordable de clientes, de manera que se pueda obtener soluciones factibles en tiempos razonables. Es importante notar que dado el uso de variables aleatorias en la elección de los clientes iniciales de las rutas o en el lugar del costo de visita a los clientes es que se generan diferentes corridas para una misma instancia.

Previo al desarrollo de la instancia de prueba, se procede a evaluar diferentes escenarios de clientes para determinar el tiempo promedio que toma ejecutar la metodología propuesta. Dentro del análisis realizado se ve que los tiempos asociados a encontrar una solución van creciendo exponencialmente en la medida que van aumentando los clientes.

En una revisión simple se evaluaron los diferentes tiempos de ejecución para un escenario con nivel de tolerancia bajo para terminar el proceso de mejora de rutas y una tolerancia baja para terminar el proceso de generación de columnas.



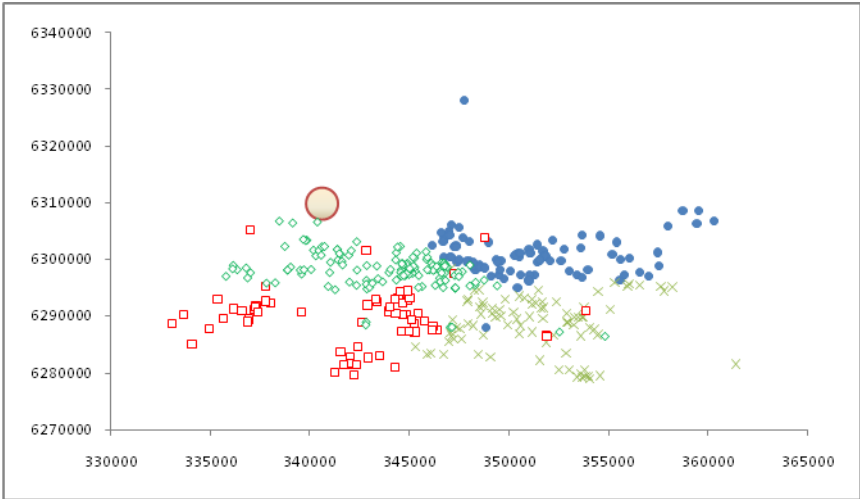
**Figura 25: Evolución del Tiempo de Proceso según número de clientes**

En definitiva en vista de la calibración del modelo se utilizará un modelo que contemple un nivel de tolerancia de mejoramiento alto, es decir, que se consideren muchas iteraciones sin disminución de costos para detener el proceso de mejoramientos de rutas.

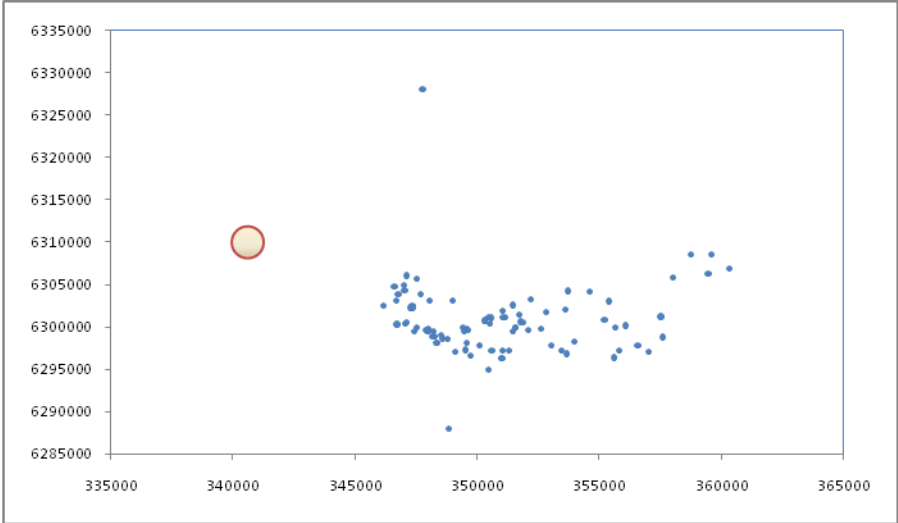
Los escenarios trabajados para la calibración de los parámetros corresponden a un subconjunto de clientes pertenecientes a un ruteo realizado por la empresa. Actualmente la empresa hace el ruteo de sus pedidos, considerando los siguientes criterios:

- Elección de la agrupación de la comuna asociada a la dirección de los clientes.
- Selección de un cliente entre los que están próximos a terminar su restricción horaria
- Selección de clientes según el tipo de estos, teniendo más prioridad aquellos clientes con mayor demanda.

Para comenzar se consideran la información de 90 clientes situados en un grupo de comunas específico. La idea de esta elección es comparar en pequeños escenarios la metodología utilizada por la empresa y la metodología propuesta, de manera de proponer un método de solución general, en la que se consideran más de 350 clientes.



**Figura 26: Distribución de Clientes (Pedido Real)**



**Figura 27: Distribución de Clientes Comuna 1 (Instancia de Prueba)**

En anexos se presenta el listado de clientes utilizados para la calibración del modelo con sus características.

La elección de estos clientes como instancia de pruebas se debe principalmente a la metodología de ruteo que se presento antes. Dado que la empresa define el ruteo por grupos de comunas, podemos revisar la performance de los ruteos obtenidos para ese grupo. No se considerará el tiempo de resolución en esta etapa ya que no se puede determinar de forma exacta cuanto es el tiempo que se entrega para el ruteo por grupo de comunas.

Para el escenario actual se presentan los resultados que se han obtenido con la metodología que actualmente trabaja la empresa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos clientes.

**Clientes a Rutear** 90 **Clientes**  
**Capacidad Camión** 550 **Cajas**

<b>Ruta</b>	<b>Cantidad Clientes en Ruta</b>	<b>Distancia Recorrida [Km]</b>	<b>Demanda Satisfecha [Cajas]</b>	<b>Utilización Capacidad [%]</b>	<b>Servicio [%]</b>
<b>Ruta 1</b>	30	192.23	250	45.5%	56.7%
<b>Ruta 2</b>	24	104.32	436	79.3%	79.2%
<b>Ruta 3</b>	12	41.75	504	91.6%	100.0%
<b>Ruta 4</b>	24	71.33	534	97.1%	54.2%
<b>Total</b>	<b>90</b>	<b>409.63</b>	<b>1724</b>	<b>78.4%</b>	<b>67.8%</b>

**Tabla 7: Resultados Metodología Actual (Instancia de Prueba)**



En la tabla anterior se presentan las medidas de gestión asociadas a las metodologías. El porcentaje de utilización y porcentaje de servicio se calcula por cada ruta y luego se entregan los resultados de estos indicadores para el pedido en general.

El porcentaje de utilización de la capacidad hace referencia a la relación de capacidad del camión utilizada en la ruta. Es importante notar que para algunas rutas este indicador es muy bajo, ya que la distribución de clientes en las rutas tiene muchos niveles de espera y tiempos de descarga elevados. Por otro lado, el porcentaje de servicio corresponde a la cantidad de clientes que son efectivamente atendidos por la configuración de rutas. Dado que asumimos que el cliente recibirá el pedido se puede argumentar el servicio como la llegada al cliente dentro de su restricción temporal. En caso de que el vehículo llegue antes o después de las ventanas de tiempo impuestas se considerará que el cliente no fue atendido.

Actualmente se asignan más clientes a las rutas de los que corresponden, esto se debe a que no existe una regla efectiva de asignación de clientes a las rutas. En definitiva se asigna la ruta mejor calificada por el programador, independiente de las restricciones horarias del cliente. La mayoría de las veces no se respeta la restricción horaria lo que conlleva a que no se reciba el pedido y se pierda la venta. Es por esto que el nivel de servicio es tan bajo.

Ahora bien los costos asociados a esta configuración se presentan a continuación. En primer lugar se estudia cuáles son los costos fijos asociados al arriendo de un camión. En anexos se presenta el detalle de todos los costos fijos asociados al camión.

Dentro del detalle de los costos fijos se encuentra el costo asociado al pago del chofer y de los dos ayudantes que se encargan de la entrega de los pedidos. Es interesante ver que los costos, tanto mensuales y anuales, fueron llevados a valores diarios. Esta acción se debe principalmente a que las rutas asociadas a cada camión contempla una utilización del 100% del día por lo tanto el costo diario corresponderá al costo de cada viaje realizado por los vehículos.

Dado que los costos anteriores corresponden a valores fijos independiente de la cantidad de kilómetros recorridos o de la demanda transportada es que se presenta una tabla resumen de los costos asociados.

	<b>Costo Anual</b>	<b>Costo Mensual</b>	<b>Costo Diario o Viaje</b>
Costo promedio por Remuneraciones (Mensual & Diario)	\$ 5,927,220	\$ 493,935	\$ 16,464.50
Costo promedio por Indumentaria (Mensual & Diario)	\$ 270,280	\$ 22,523	\$ 750.78
Costo promedio por Patentes (Mensual & Diario)	\$ 1,327,200	\$ 110,600	\$ 3,686.67
Costo promedio por Mantenición (Mensual & Diario)	\$ 3,579,312	\$ 298,276	\$ 9,942.53
<b>Costo Fijo</b>	<b>\$ 11,104,012</b>	<b>\$ 925,334</b>	<b>\$ 30,844</b>

**Tabla 8: Resumen de Costos Fijos**

Por lo tanto cada camión tiene un costo diario o por viaje de \$30.844. Por lo tanto ahora estamos en condiciones de calcular el costo asociado a la instancia de pruebas. Para el cálculo de los costos variables se considera el costo asociado a la distancia recorrida junto con el costo asociado a la entrega de los productos.

El valor de la distancia recorrida se calcula considerando un rendimiento de 6 [Km/Lt] para cada camión y un costo de combustible de 540 [\$/Lt], con esto y considerando la distancia recorrida en cada ruta se calcula el costo como:

$$\text{Costo de Viaje} = \frac{\text{Distancia Recorrida} \cdot \text{Costo en Combustible}}{\text{Rendimiento del vehículo}}$$

Por otro lado el costo asociado a las entregas se calcula como:

$$\text{Costo de Viaje} = \text{Demanda Entregada} \cdot \text{Costo de Entrega}$$

Definido esto podemos revisar cuál es el valor asociado a la metodología utilizada actualmente por la empresa. En Anexos se presenta los cálculos de costos asociados al ruteo de 90 clientes. Sin embargo se presentan un resumen de los costos asociados:

	<b>Costo Diario</b>
Costo Fijo (4 Rutas)	\$ 123,378
Costo Variable	\$ 1,685,501
<b>Costo Total</b>	<b>\$ 1,808,879</b>

**Tabla 9: Resumen de Costos para la instancia de pruebas**

En resumen la generación de las rutas para atender a 90 clientes, conlleva un costo total de \$1.808.879 diarios. Por otra parte es necesario evaluar el impacto que tiene el nivel de servicio de la empresa. Actualmente el nivel de entregas<sup>6</sup> se encuentra en un 63.8%. El hecho de que no se atiendan todos los clientes o no se

---

<sup>6</sup> El nivel de entregas se define como la cantidad de cajas asignadas al camión sobre la cantidad de entregas efectivas. Donde una entrega efectiva es referida a si la entrega fue realizada dentro de la ventana de tiempo

alcance a cumplir el ruteo en la totalidad de los casos afecta en el nivel de ventas de la empresa.

Ahora bien el hecho de que las entregas tengan un nivel tan bajo, genera que los ingresos generados por la venta de estos pedidos no se efectuó. Dado esto es importante identificar el nivel de utilidades que presenta esta metodología.

Consideremos el caso de la instancia de prueba en donde existe la siguiente configuración de entrega de productos.

## 8.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En base a la metodología de ruteo de vehículos utilizado por la empresa. En anexos, se encuentra el detalle de cada uno de los siguientes conceptos:

### Configuración de Utilidades de Instancia de Prueba

	<b>Costo Fijo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Utilidades</b>
<b>Ruta 1</b>	\$ 30,844	\$ 203,504	\$ 624,000	\$ 420,496
<b>Ruta 2</b>	\$ 30,844	\$ 624,886	\$ 2,340,000	\$ 1,715,114
<b>Ruta 3</b>	\$ 30,844	\$ 790,463	\$ 3,024,000	\$ 2,233,537
<b>Ruta 4</b>	\$ 30,844	\$ 190,026	\$ 612,000	\$ 421,974
	\$ 123,378	\$ <b>1,808,879</b>	\$ <b>6,600,000</b>	\$ <b>4,791,121</b>

**Tabla 10: Distribución de Costos - Metodología Actual**

- De la Tabla 7 podemos ver que se consideran 90 clientes para la configuración de la flota, en adelante el pedido.

- De la Tabla 7 podemos ver que la configuración de flota se basa en 4 rutas (vehículos) que deben entregar la demanda asignada (1.724 Cajas). Esto considera un costo de \$ 123.378 para el pedido.
- La configuración de rutas considera una distancia recorrida de 409.63 [Km], contemplando un costo de viaje de \$35.501 en conceptos de combustible<sup>7</sup>.
- El nivel de entrega de esta configuración es muy baja llegando a cerca del 63,8%.
- El nivel de Utilidades es de \$6.166.121 por pedido.
- Tiempo de resolución: Aproximadamente 1 hora.

Ahora bien, considerando el mismo escenario de clientes se procede a desarrollar la metodología planteada. Dado que ya se presentó la forma de cálculo de los costos solamente se mostrarán los valores finales asociados a la nueva metodología.

### Resultados Metodología Actual

	<b>Costo Fijo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Utilidades</b>
<b>Ruta 1</b>	\$ 30,844	\$ 203,504	\$ 624,000	\$ 420,496
<b>Ruta 2</b>	\$ 30,844	\$ 624,886	\$ 2,340,000	\$ 1,715,114
<b>Ruta 3</b>	\$ 30,844	\$ 790,463	\$ 3,024,000	\$ 2,233,537
<b>Ruta 4</b>	\$ 30,844	\$ 190,026	\$ 612,000	\$ 421,974
	<b>\$ 123,378</b>	<b>\$ 1,808,879</b>	<b>\$ 6,600,000</b>	<b>\$ 4,791,121</b>

<sup>7</sup> Considera un rendimiento de 6 [Km/Lt] para los camiones utilizados.

## Resultados Metodología Propuesta

	<b>Costo Fijo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Utilidades</b>
<b>Ruta 1</b>	\$ 30,844	\$ 532,026	\$ 1,986,000	\$ 1,453,974
<b>Ruta 2</b>	\$ 30,844	\$ 656,134	\$ 2,484,000	\$ 1,827,866
<b>Ruta 3</b>	\$ 30,844	\$ 751,176	\$ 2,868,000	\$ 2,116,824
<b>Ruta 4</b>	\$ 30,844	\$ 484,887	\$ 1,800,000	\$ 1,315,113
<b>Ruta 5</b>	\$ 30,844	\$ 157,505	\$ 480,000	\$ 322,495
<b>Ruta 6</b>	\$ 30,844	\$ 219,197	\$ 726,000	\$ 506,803
	<b>\$ 185,067</b>	<b>\$ 2,800,924</b>	<b>\$ 10,344,000</b>	<b>\$ 7,543,076</b>

**Tabla 11: Configuración Rutas - Metodología Actual vs Propuesta**

Para revisar los resultados de nuestra metodología se presenta el siguiente cuadro comparativo. El detalle de cada valor se puede revisar en los anexos.

Variable	Metodología Actual	Metodología Propuesta
Cantidad de Clientes	Se consideran 90 clientes para la configuración de la flota, en adelante el pedido.	Se consideran 90 clientes para la configuración de la flota, en adelante el pedido.
Cantidad de Rutas	La configuración de flota se basa en <b>4 rutas</b> (vehículos) que deben entregar la demanda asignada (1.724 Cajas). Esto considera un costo fijo de \$ 123.378 para el pedido.	La configuración de flota se basa en <b>6 rutas</b> (vehículos) que deben entregar la demanda asignada (1.724 Cajas). Esto considera un costo fijo de \$ 185.076 para el pedido.
Distancia Recorrida	La configuración de rutas considera una distancia recorrida de 409.63 [Km], contemplando un costo de viaje de \$35.501 en conceptos de combustible <sup>8</sup> .	La configuración de rutas considera una distancia recorrida de 344.51 [Km], contemplando un costo de viaje de \$35.501 en conceptos de combustible <sup>9</sup> .
Nivel de Entregas	El nivel de entrega de esta configuración es muy bajo llegando a cerca del 63,8%.	El nivel de entrega de esta configuración es excelente llegando al 100%.

<sup>8</sup> Considera un rendimiento de 6 [Km/Lt] para los camiones utilizados.

<sup>9</sup> Considera un rendimiento de 6 [Km/Lt] para los camiones utilizados.

% Utilización Capacidad Camión	El nivel de entrega de esta configuración es muy baja llegando a cerca del 78.4%.	El nivel de entrega de esta configuración es muy baja llegando a cerca del 52.2%.
Costo Despacho (Entrega)	La configuración de flota se basa en la entrega de 1.100 cajas de las 1.724 cajas asignadas, con un costo de \$1.650.000.	La configuración de flota se basa en la entrega de 1.724 cajas de las 1.724 cajas asignadas, con un costo de \$2.586.000.
Ingresos	La configuración de flota se basa en la entrega de 1.100 cajas de las 1.724 cajas asignadas, con un costo de \$1.650.000.	La configuración de flota se basa en la entrega de 1.100 cajas de las 1.724 cajas asignadas, con un costo de \$1.650.000.
Utilidades	Dado el nivel de entregas, las utilidades ascienden a \$ 4.791.121 para el pedido	Dado el nivel de entregas, las utilidades ascienden a \$ 7.543.076 para el pedido
Jornada Laboral	07:00:00 a 02:00:00 (19 Horas)	07:00:00 a 20:00:00 (13 Horas)
Tiempo Resolución	1-2 [HH]	0,5-0,75 [HH]

**Tabla 12: Comparativo - Metodología Actual vs Propuesta**

Del cuadro anterior podemos concluir lo siguiente:

- Se presentó un aumento en la cantidad de rutas, lo que conlleva a un aumento en el nivel de costos fijos.
- Se generó una configuración de rutas de mayor calidad que la generada por la metodología realizada por la empresa en la actualidad.
- Cada una de estas rutas, asegura visitar a los clientes dentro de su restricción temporal, dado esto se asegura la entrega de la totalidad de

la demanda solicitada. Este hecho conlleva a que el nivel de servicio definido aumente al máximo valor.

- Junto con esto al tener un mayor nivel de entrega también se intuye el aumento en el nivel de ingresos. Al revisar esto se ve que existe un aumento en el nivel de utilidades. Por lo tanto, se anula el aumento de costo debido al aumento de los vehículos arrendados.
- Además se procede a definir una jornada laboral mucho mejor para los encargados de repartir el producto. Dada la nueva configuración se bajan las horas trabajadas de 19 a 13 horas. Sin duda este es un punto importante en la calidad de trabajo de las personas presentes en la empresa.
- Es importante considerar que los tiempos de resolución son muchos menores con excelentes resultados.

Dada la revisión de esta instancia de prueba, se procede a realizar la validación completa del pedido generado. Este análisis se presenta en el siguiente capítulo.



## 9. VALIDACIÓN DEL MODELO

La metodología tradicionalmente utilizada para validar un modelo consiste en una prueba retrospectiva, esto es, contemplar la comparación de los resultados de la estrategia de ruteo que utiliza actualmente la empresa versus los resultados planteados por la metodología desarrollada.

Los resultados de esta instancia utilizando la metodología actual de ruteo son:

- Clientes: 379
- Rutas: 13
- Nivel de Utilidades por pedido: \$15.855.407
- Nivel de Entrega: 66.18%
- Nivel de Servicio: 64.12%
- Utilización de Capacidad: 60.34%
- Utilización de Capacidad Real: 39.93%

En Anexo se presentan los resultados en detalle para cada configuración. Sin embargo se presentan un resumen de las características de la solución entregada por nuestro modelo:

- Se considera la utilización de 18 vehículos para cumplir con los pedidos.
- Los vehículos consideran un aumento en la utilización de la capacidad real de los camiones en un 4%.

- La distancia recorrida por los vehículos utilizados es aproximadamente menor en un 37.5% (1153.19 [Km])
- El nivel de demanda satisfecha con la configuración de flota logra ser un 100%, lo cuál significa que todos los clientes son visitados y se les entrega su demanda.
- Las utilidades de la empresa aumentan cerca de un 50% (\$ 8.363.959) en comparación a los resultados entregados por la metodología utilizada actualmente. Esto se explica debido a que se genera un mayor número de entregas de producto lo que genera un mayor nivel de ingreso. Este aumento en la demanda que enfrenta la es factible de satisfacer, dado que todas las solicitudes de los clientes son conocidas.
- El tiempo de resolución de este problema está dentro de los márgenes esperados. En total el procesamiento de la información, generación de rutas factibles y la solución del problema considera un tiempo de 3,5 a 4,5 Horas.

## 10. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FUTURAS

En el presente trabajo de tesis abordamos el problema operacional de ruteo de vehículos que enfrentan CERVECERIAS CHILE S.A. en el momento de decidir como transportar sus productos hasta sus clientes, respetando sus restricciones horarias. Se construyó para resolver dicho problema un modelo de generación de columnas debido principalmente a la magnitud de variables que tenía el problema a resolver y de lo práctico que ha sido este tipo de modelo en aplicaciones similares, en diferentes industrias en las que se involucra el ruteo de vehículos para la entrega de productos.

El problema de ruteo de vehículos puede ser modelado mediante un enfoque de programación matemática, basado en modelos mixtos con variables de naturaleza entera o lineal. Por otro lado la utilización de variables binarias permite representar de mejor forma el carácter de las decisiones involucradas, pero el excesivo tamaño del modelo resultante hace infactible su resolución con las tecnologías de procesamiento actuales.

En este trabajo se optó por utilizar un generador dinámico de columnas que va entregando un conjunto de nuevas ruta en cada iteración del problema y no considera el ingreso de cualquier ruta al Problema Maestro, sino que en cada iteración busca la ruta que más aporte a la configuración de rutas existente en el modelo.

Además se ha mostrado que existen variadas formas de generar las columnas o programas de viajes, en base a la heurística construida. La definición de

diferentes formas de generación de rutas se basa en la forma de elección del primer cliente de la ruta y en la elección del criterio que será utilizado para insertar un nuevo cliente a la ruta.

Como se vio en el informe, con la heurística basada en Generación de Columnas, se logra mantener el tiempo implicado en la generación de ruteos pero con una configuración de rutas de mejor calidad. Los resultados de la metodología propuesta son mucho mejores que la estrategia que actualmente utiliza la empresa. Aunque se puede incurrir en mayores costos por temas de arriendo de vehículos el aumento del nivel de servicio desde un 65% a un 100% conlleva a tener un mejor nivel de ingresos dado que se asume un mayor nivel de utilidades por cajas entregadas.

El modelo de datos desarrollado permite soportar los requerimientos de información del modelo de programación matemática. Sin embargo, se recomienda migrar la lectura de la información de los clientes y las demandas generadas cada día a un sistema de centralización de datos lo que permitirá tener un formato único de información que a la postre beneficiara en la operatividad del personal encargado del ruteo.

Dada la naturaleza aleatoria de algunos parámetros conlleva a que se deba generar un nivel de pruebas representativo. El modelo fue testado con varias instancias de prueba que representan situaciones reales a las que se enfrentan la empresa cervecera con el fin de probar la capacidad del modelo de resolver diferentes escenarios de pedidos.

En todas las instancias de prueba, para mantener un balance entre buenos resultados y pequeños tiempos de resolución de los modelos, se encontraron resultados con varianza relativa menor a un 5%, manteniendo tiempos de ejecución. Sin embargo, cada una de las soluciones encontradas encontraba una configuración de costos menores que las desarrolladas por la empresa. Dado el tiempo de resolución, 1,5 horas para la mayor instancia realizada), hace al modelo útil para usarse en situaciones en que deben programarse viajes diariamente.

El modelo construido permite además construir una serie de indicadores y hacer una serie de mediciones de tiempos en la jornada laboral, niveles de servicio, niveles de porcentajes de utilización de recursos, entre otros, lo que agrega aun más valor al trabajo realizado, permitiéndole a un potencial futuro usuario hacer un acabado análisis de las programaciones diarias o por jornada laboral de sus camiones.

Como se vio en la validación del modelo, la metodología propuesta en este trabajo conlleva una mejora sustancial en los niveles de servicio que tiene la empresa. A pesar de que existe un aumento en la cantidad de camiones que tienen que servir los pedidos estudiados, es importante rescatar las potenciales mejoras que tendría la aplicación de este modelo. Entre las mejoras podemos mencionar: mejores horarios de trabajo, mayor cantidad de pedidos, mejoramiento del nivel de servicio, mejoramiento en los tiempos de entrega, viajes más económicos, etc. Sin duda, la aplicación de esta metodología conlleva beneficios económicos representativos. Es más en la instancia de validación se puede apreciar un aumento de las utilidades por pedido en un 50%

aproximadamente. Lo anterior se debe considerar un éxito dado que se desarrolla en tiempos similares de ejecución que la metodología actual.

Los pasos futuros en el desarrollo de esta herramienta están orientados a la incorporación de probabilidades de pago o de disponibilidad de envases para la entrega de cada pedido. Además se debe considerar una actualización de los parámetros de tiempos de entrega y descarga considerados para cada cliente, puesto que estos parámetros son relevantes en los resultados que se obtengan en futuras aplicaciones de la heurística.

Un trabajo interesante es estudiar la forma de ingresar mejores soluciones iniciales al problema. Si bien el modelo reconoce que la mayoría de los programas de viajes ingresados como soluciones iniciales en este trabajo no deberán formar parte de la solución final del problema, ingresar “mejores” soluciones iniciales podría traer consigo mejoras en los tiempos de ejecución del modelo dado que se generarían probablemente menos columnas durante la ejecución del modelo.

Una formulación que permite mejorar los tiempos de resolución es la realización de un pre-procesamiento de datos. La idea general es agrupar clientes ya sea por su ubicación o características específicas, para así disminuir el número de elementos del modelo. Se propone para trabajos futuros de nuestro modelo la agrupación de clientes según la ubicación en las “grillas” de manera de mejorar los tiempos de resolución.

Otro punto que se debe profundizar en etapas posteriores, corresponde a proveer información acerca del comportamiento de la solución ante variaciones en los

valores de los parámetros del modelo. Es importante tener actualizada la información de los tiempos de espera y de descarga, ya que estos tienen una importancia relativa en la configuración de la flota. El estudio de estos parámetros se debe ajustar y afinar de manera de tener valores representativos al momento de realizar los ruteos.

Para finalizar, los resultados de este trabajo indican la conveniencia de desarrollar un sistema computacional que permita que profesionales o encargados del ruteo utilizar la metodología desarrollada en ciclos regulares de configuración de pedidos.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

- [1] Toth, P., Vigo, D. (2000): “An Overview of Vehicle Routing Problems. Monographs on Discrete Mathematics and Applications”. In: The Vehicle Routing Problem. SIAM 1–26
- [2] G.B. Dantzig and R.H. Ramser (1959): “The Truck Dispatching Problem”. Management Science 6, 80–91.
- [3] Clarke, G., Wright, W. (1964): “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points”. Operations Research 12, 568–581.
- [4] Cordeau, F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon and M., Soumis, F. (1999): “The VRP with time windows”. Technical Report Cahiers du GERAD G-99-13, École des Hautes Études Commerciales de Montreal
- [5] Golden, B., Assad, A., Levy, L. and Gheysens, F. (1984): “The fleet size and mix vehicle routing problem”. Computers & Operations Research 11, 49–66
- [6] Solomon, M., and Desrosiers, J. (1988): “Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems”. Transportation Science, Volume 22, 1-13
- [7] Pullen, H. and Webb, M. (1967): “A Computer Application to a Transport Scheduling Problem”. Computation Journal, Volume 10, 10-13
- [8] Knight, K. and Hofer, J. (1968): “Vehicle Scheduling with Timed and Connected Calls: A Case Study”. Operations Research. Quart. 19, 299-310
- [9] Laporte, G. and Nobert, Y. (1987): “Exact algorithms for the vehicle routing problem”. Annals of Discrete Mathematics 31, 147–184
- [10] Laporte, G. (1992): “The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms”. European Journal of Operational Research 59, 345–358
- [11] Nemhauser, G., and Wolsey, L. (1988): “Integer and Combinatorial Optimization”. John Wiley & Sons, New York.



- [12] Clarke, G. and Wriqth, W. (1964): “Scheduling of Vehicles from a central Depot to a number of Delivery Points”. *Operation Research* 12, 568-581.
- [13] Yellow, P. (1970): A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Operational Research Quarterly* 21, 281–283
- [14] Golden, B., Magnanti, T., Nguyen, H. (1977): “Implementing vehicle routing algorithms”. *Networks* 7 113–148
- [15] Gaskell, T. (1967): “Bases for vehicle fleet scheduling”. *Operational Research Quarterly* 18, 281–295
- [16] Gabow, H. (1976): “An efficient implementation of Edmonds algorithm for maximum matching on graphs”. *Journal of the ACM* 23, 221–234
- [17] Desrochers, M., Verhoog, T. (1989): “A matching based savings algorithm for the vehicle routing problem”. Technical Report Cahiers du GERAD G-89-04, École des Hautes Études Commerciales de Montreal
- [18] Altinkemer, K., and Gavish, B. (1991): “Parallel savings based heuristics for the delivery problem”. *Operations Research* 39, 456–469
- [19] Bodin, L., Golden, B., Assad, A., and Ball, M. (1983): “Routing and scheduling of vehicles and crews – the state of the art”. *Computers & Operations Research* 10, 63–211
- [20] Potvin, J.Y., Rousseau, J.M. (1993): A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research* 66, 331–340
- [21] Mole, R.H., Jameson, S.R. (1976): A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion. *Operational Research Quarterly* 27, 503–511
- [22] Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1979): “The Vehicle Routing Problem”. In: *Combinatorial Optimization*. Wiley, Chichester 315–338
- [23] Wren, A. (1971): *Computers in transport planning and operation*. Ian Allan, Londres.

- [24] Wren, A., Holliday, A. (1972): Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. *Operational Research Quarterly* 23, 333–344
- [25] Gillett, B., Miller, L. (1974): A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research* 22, 340–349
- [26] Fisher, M., Jaikumar, R. (1981): A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem. *Networks* 11, 109–124
- [27] Bramel, J., Simchi-Levi, D. (1995): A location based heuristic for general routing problems. *Operations Research* 43, 649–660
- [28] Beasley, J. (1983): Route first – cluster second methods for vehicle routing. *Omega* 11, 403–408
- [29] Lin, S.: Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal* 44 (1965) 2245–2269
- [30] Renaud, J., Boctor, F., Laporte, G. (1996): A fast composite heuristic for the symmetric traveling salesman problem. *INFORMS Journal on Computing* 8, 134–143
- [31] Johnson, D., McGeoch, L. (1997): The Traveling Salesman Problem: a case study in local optimization. In: *Local Search in Combinatorial Optimization*. John Wiley and Sons 215–310
- [32] Lin, S., Kernighan, B. (1973): An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research* 498–516
- [33] Colomi, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. (1991): Distributed optimization by ant colonies. In Varela, F., Bourguine, P., eds.: *Proceedings of the European Conference on Artificial Life*, Elsevier, Amsterdam 134–142
- [34] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. (1996): The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics* 26, 29–41

- [35] Bullnheimer, B., Hartl, R., Strauss, C. (1997): A new rank based version of the ant system – a computational study. Technical report, University of Viena, Institute of Management Science
- [36] Glover, F. (1991): Multilevel tabu search and embedded search neighborhoods for the traveling salesman problem. Technical report, Graduate School of Business and Administration, University of Colorado
- [37] Osman, I. (1993): Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research* 41, 421–451
- [38] Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. (1994): A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science* 40, 1276–1290
- [39] Taillard, E.D. (1993): Parallel iterative search methods for vehicle routing problems. *Networks* 23, 661–673
- [40] Holland, J. (1975): *Adaptation in Natural and artificial systems*. The University of Michigan Press
- [41] Potvin, J.Y. (1996): Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research* 63 339–370
- [42] Thangiah, S. (1995): Vehicle Routing with Time Windows using Genetic Algorithms. In: *Application Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, Volume II*. CRC Press 253–277
- [43] Blanton, J., Wainwright, R. (1993): Multiple vehicles routing with time and capacity constraints using genetic algorithms. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*. 452–459
- [44] Potvin, J.Y., Bengio, S. (1996): The vehicle routing problem with time windows – part II: Genetic search. *INFORMS Journal on Computing* 8, 165–172
- [45] Goldberg, D. (1989): *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA

- [46] Metropolis, W., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., Teller, E. (1953): Equation of the state calculations by fast computing machines. *J. Chemical Physics* 21, 1087-1092
- [47] KirkPatrick, S, Gellat, C., Vecchi, P. (1983): Optimization by simulated annealing. *Science* 220, 671-680.
- [48] Aarts, J., Korst, H., Van Laarhaven, J. (1997): Simulated Annealing. E. Aarts, J. K. Lenstra, eds. *Local Search in Combinatorial Optimization*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 91.120
- [49] Russell, R. (1995): Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Sci.* 29, 156-166.
- [50] Christofides, N., Beasley, J. (1984).: The period routing problem. *Networks* 14, 237-246.
- [51] Czech, Z., Czarnas, P. (2002): Parallel simulated annealing for the vehicle routing problem with time windows. *Proc. 10<sup>th</sup> Euromicro WorkShop Parallel Distributed Network-Based Processing*, Canary Island, Spain, 376-383
- [52] Taillard, E. (1996): A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *CRT-96-03*,
- [53] Desrochers, M., Desrosiers, J., and Solomon, M. (1992): A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research*, 342-354,.
- [54] Derosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. and Soumis, F. (1995): Time Constrained Routing and Scheduling. In Ball, M., Magnanti, T., Monma, C. and Nemhauser, G. Editors, *Network Routing*, volume 8 of *Handbooks in Operation Research and Management Science*, pp. 35-139. North-Holland, Amsterdam,.
- [55] Barnhart, C., Johnson, E.L., Nemhauser, G.L., Savelsbergh, M.W.P., and Vance, P.H. (1998): Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations Research*, 46, 316-329,
- [56] Vanderbeck, F. and Wolsey, L.A. (1996): An exact algorithm for IP column generation. *Operations Research Lett.*, 19, 151-159,

[57] Desaulniers, G., Desrosiers, J., and Solomon, M.M. (2001): Accelerating strategies in column generation methods for vehicle routing and crew scheduling problems. In C.C. Ribeiro and P. Hansen, editors, *Essays and Surveys in Metaheuristics*, 309–324, Boston, Kluwer.

[58] Sol, M. (1994): *Column Generation Techniques for Pickup and Delivery Problems*. PhD thesis, Eindhoven University of Technology.

[59] Vanderbeck, F. (1999): Computational study of a column generation algorithm for bin packing and cutting stock problems. *Math. Programming*, 86, 565–594, 1999.

[60] Villeneuve, D (1999): *Logiciel de Generation de Colonnes*. PhD thesis, Ecole Polytechnique de Montreal.

[61] Wilhelm, W.E. (2001): A technical review of column generation in integer programming. *Optimization and Engineering*, 2, 159–200,.

[62] Soumis, F. (1997): Decomposition and column generation. M. Dell'Amico, F. Maffioli, S. Martello, eds. *Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 115-126

[63] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M.M., and Soumis, F. (1995). Time constrained routing and scheduling. In M.O. Ball, T.L. Magnanti, C.L. Monma, and G.L. Nemhauser, editors, *Network Routing*, volume 8 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, pages 35–139 North-Holland, Amsterdam,

[64] Toth, P.,Vigo, D. (2002): *The vehicle Routing Problem, III*. Siam, *Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia,

## 12.ANEXOS

### 12.1 DISTRIBUCION DE CLIENTES

	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>SPMK</b>	<b>Total</b>
Total general	3575	765	183	4523
Total general (%)	79.0%	16.9%	4.0%	

**Tabla 13: Distribución de Clientes por Tipo**

<b>Grupo 1 Zona Nor-Oriente</b>	<b>Grupo 2 Zona Sur-Oriente</b>	<b>Grupo 3 Zona Sur-Poniente</b>	<b>Grupo 4 Zona Nor-Poniente &amp; Centro</b>
COLINA	LA FLORIDA	BUIN	CATEMU
HUECHURABA	LA GRANJA	CALERA DE TANGO	CERRO NAVIA
LA REINA	LA PINTANA	CERRILLOS	CONCHALI
LAS CONDES	MACUL	EL BOSQUE	ESTACION CENTRAL
LO BARNECHEA	PENALOLEN	ISLA DE MAIPO	INDEPENDENCIA
NUNOA	PIRQUE	LA CISTERNA	LAMPA
PROVIDENCIA	PUENTE ALTO	LO ESPEJO	LO PRADO
RECOLETA	SAN JOAQUIN	MAIPU	PUDAHUEL
VITACURA	SAN JOSE DE MAIPO	PAINE	QUILICURA
	SAN RAMON	PEDRO AGUIRRE CERDA	QUINTA NORMAL
		SAN BERNARDO	RENCA
		SAN MIGUEL	SANTIAGO
			SANTIAGO-CENTRO

**Tabla 14: Agrupación de Comunas**

<b>Grupo Comuna</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>Supermercado</b>	<b>Total</b>
Nor-Oriente	507	343	56	906
Sur-Oriente	888	1	40	929
Sur-Poniente	970	1	38	1009
Nor-Poniente	1210	420	49	1680
Total	3575	765	183	4523

**Tabla 15: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas**

<b>Grupo Comuna</b>	<b>Comuna</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>Supermercado</b>	<b>Total</b>
Nor - Oriente	COLINA	17	2		19
	HUECHURABA	23	1	2	26
	LA REINA	65	3	3	71
	LAS CONDES	52	71	21	144
	LO BARNECHEA	19	6	2	27
	NUNOA	105	3	9	117
	PROVIDENCIA	86	163	11	260
	RECOLETA	123	69	3	195
	VITACURA	17	25	5	47
Nor - Oriente		507	343	56	906

**Tabla 16: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas de Zona Nor-Oriente**

<b>Grupo Comuna</b>	<b>Comuna</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>Supermercado</b>	<b>Total</b>
Sur - Oriente	LA FLORIDA	194	1	15	210
	LA GRANJA	75		5	80
	LA PINTANA	57		1	58
	MACUL	96		4	100
	PENALOEN	113		6	119
	PIRQUE	10			10
	PUENTE ALTO	137		9	146
	SAN JOAQUIN	109			109
	SAN JOSE DE MAIPO	16			16
	SAN RAMON	81			81
	Sur - Oriente		888	1	40

**Tabla 17: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Sur-Oriente**

<b>Grupo Comuna</b>	<b>Comuna</b>	<b>BOTILLERIA</b>	<b>PUB</b>	<b>Supermercado</b>	<b>Total</b>
Sur - Poniente	BUIN	26		1	27
	CALERA DE TANGO	9			9
	CERRILLOS	48		2	50
	EL BOSQUE	111		3	114
	ISLA DE MAIPO	8			8
	LA CISTERNA	128		4	132
	LO ESPEJO	73		2	75
	MAIPU	198		15	213
	PAINE	13			13
	PEDRO AGUIRRE				
	CERDA	112		1	113
	SAN BERNARDO	130	1	5	136
	SAN MIGUEL	114		5	119
Sur - Poniente		970	1	38	1009

**Tabla 18: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Sur-Poniente**

Grupo Comuna	Comuna	BOTILLERIA	PUB	Supermercado	Total
Nor - Poniente	CATEMU	3			3
	CERRO NAVIA	100		1	101
	CONCHALI	118		6	124
	ESTACION CENTRAL	116	18	3	137
	INDEPENDENCIA	92	5	4	101
	LAMPA	17			17
	LO PRADO	71		4	75
	PUDAHUEL	92	1	2	95
	QUILICURA	30	1	3	34
	QUINTA NORMAL	176	2	4	182
	RENCA	80	2	3	85
	SANTIAGO	280	197	11	488
	SANTIAGO-CENTRO	35	194	8	237
Nor - Poniente		1210	420	49	1679

Tabla 19: Distribución de Clientes por Tipo y Agrupación de Comunas Zona Nor-Poniente

## 12.2 DISTRIBUCION DE VENTANAS DE TIEMPO

Hora Inicio	Hora Fin	Cantidad de Clientes	%
10:00:00	21:00:00	2845	62.9%
7:30:00	21:00:00	1130	25.0%
8:00:00	10:00:00	107	2.4%
10:00:00	16:00:00	57	1.3%
8:00:00	14:00:00	48	1.1%
7:00:00	10:00:00	40	0.9%
7:30:00	15:00:00	38	0.8%
7:30:00	16:00:00	31	0.7%
9:00:00	12:00:00	25	0.6%
8:00:00	12:00:00	22	0.5%
9:00:00	10:00:00	22	0.5%
7:30:00	14:00:00	20	0.4%
7:00:00	21:00:00	16	0.4%
8:00:00	16:00:00	12	0.3%
8:00:00	17:00:00	12	0.3%
9:00:00	14:00:00	11	0.2%
9:00:00	21:00:00	9	0.2%
12:00:00	18:00:00	9	0.2%
12:00:00	16:00:00	8	0.2%
7:00:00	15:00:00	7	0.2%
8:00:00	14:30:00	5	0.1%
9:00:00	16:00:00	5	0.1%
17:00:00	19:00:00	4	0.1%
8:00:00	15:00:00	3	0.1%
11:00:00	15:00:00	3	0.1%



<b>Hora Inicio</b>	<b>Hora Fin</b>	<b>Cantidad de Clientes</b>	<b>%</b>
13:00:00	16:00:00	3	0.1%
18:00:00	20:00:00	3	0.1%
7:00:00	16:00:00	2	0.0%
7:30:00	18:00:00	2	0.0%
9:00:00	13:00:00	2	0.0%
10:00:00	12:00:00	2	0.0%
10:00:00	14:00:00	2	0.0%
12:00:00	17:00:00	2	0.0%
13:00:00	17:00:00	2	0.0%
14:00:00	16:00:00	2	0.0%
15:00:00	18:00:00	2	0.0%
16:00:00	19:00:00	2	0.0%
0:00:00	23:59:00	1	0.0%
7:30:00	10:00:00	1	0.0%
8:30:00	12:00:00	1	0.0%
10:00:00	19:00:00	1	0.0%
15:00:00	17:00:00	1	0.0%
16:00:00	18:00:00	1	0.0%
19:00:00	20:00:00	1	0.0%
19:00:00	21:00:00	1	0.0%

**Tabla 20: Distribución de Restricciones Temporales para la entrega de pedidos**

## 12.3CLIENTES INSTANCIA DE PRUEBA

Código Cliente	Código Cliente Modelo	Comuna	Posición Geográfica X [Mt]	Posición Geográfica Y [Mt]	Hora Inicio [hh:mm:ss]	Hora Fin [hh:mm:ss]	Tipo Local	Tiempo Descarga [hh:mm:ss/dda]	Tiempo Espera [hh:mm:ss]	Grupo Comuna	Demanda [Cajas]
23661	2023	COLINA	347757	6328089	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	9
7884	588	HUECHURABA	347109	6306097	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	16
9348	758	HUECHURABA	347504	6305667	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:35	00:20:00	1	5
5661	357	LA REINA	353973	6298268	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:30	00:36:40	1	37
6184	416	LA REINA	357006	6297066	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	4
19718	1769	LA REINA	356560	6297813	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:21:40	1	4
24632	2144	LA REINA	357560	6298830	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:21:40	1	5
30678	3011	LA REINA	355573	6296404	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	10
33557	4011	LA REINA	355625	6299947	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	8
33967	4255	LA REINA	355814	6297305	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:30	00:36:40	1	5
9378	764	LAS CONDES	355197	6300934	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:30	00:36:40	1	5
25345	2212	LAS CONDES	356072	6300207	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	4
32348	3530	LAS CONDES	360301	6306884	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:30	00:36:40	1	5
33076	3798	LAS CONDES	353606	6302092	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:21:40	1	5
33809	4169	LAS CONDES	357502	6301262	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	3
23403	2009	LAS CONDES	359443	6306320	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:20	00:20:00	1	6
28050	2511	LAS CONDES	351015	6301911	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:35	03:59:10	1	6
30099	2877	LAS CONDES	352804	6301845	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	6
30324	2933	LAS CONDES	355397	6303064	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	3
33532	3995	LAS CONDES	351722	6301495	10:00:00	21:00:00	PUB	00:00:25	00:16:40	1	45
31524	3269	NUNOA	353446	6297294	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:30	00:36:40	1	6
5142	315	LO BARNECHEA	359551	6308571	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	4
31712	3324	LO BARNECHEA	358731	6308652	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	9
8155	617	NUNOA	350591	6297286	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	8
9595	786	NUNOA	349742	6296637	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:21:40	1	3
9724	798	NUNOA	353033	6297905	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	3
12858	1164	NUNOA	349504	6297311	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	7
17714	1603	NUNOA	353666	6296876	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:21:40	1	10
28864	2623	NUNOA	351001	6296335	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	3

Código Cliente	Código Cliente Modelo	Comuna	Posición Geográfica X [Mt]	Posición Geográfica Y [Mt]	Hora Inicio [hh:mm:ss]	Hora Fin [hh:mm:ss]	Tipo Local	Tiempo Descarga [hh:mm:ss/dda]	Tiempo Espera [hh:mm:ss]	Grupo Comuna	Demanda [Cajas]
34355	4521	LAS CONDES	357982	6305876	00:00:00	23:59:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	6
27534	2434	NUNOA	351306	6297223	07:30:00	15:00:00	SPMK	00:00:30	00:36:40	1	215
32570	3592	NUNOA	349107	6297109	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:25:00	1	8
33083	3801	NUNOA	350438	6295020	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:21:40	1	6
33639	4065	NUNOA	351025	6297255	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:21:40	1	6
27097	2390	PROVIDENCIA	348132	6298913	08:00:00	12:00:00	PUB	00:00:25	00:16:40	1	57
2546	110	PROVIDENCIA	351454	6299529	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	6
6845	487	PROVIDENCIA	350068	6297907	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	5
13767	1261	PROVIDENCIA	351122	6301201	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	13
33944	4241	NUNOA	351006	6296303	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	4
18290	1651	PROVIDENCIA	348852	6288034	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	4
26374	2295	PROVIDENCIA	348344	6298214	08:00:00	15:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	3
13833	1276	PROVIDENCIA	347989	6299512	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	9
30728	3029	PROVIDENCIA	352621	6299871	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	7
34230	4430	PROVIDENCIA	348519	6299011	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:20:00	1	4
26566	2333	PROVIDENCIA	348314	6298173	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:20:00	1	13
21883	1904	PROVIDENCIA	350298	6300743	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	4
34265	4458	PROVIDENCIA	349556	6298207	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	17
20714	1838	PROVIDENCIA	349546	6299837	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	3
23659	2022	PROVIDENCIA	349392	6299949	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:35	03:59:10	1	6
24977	2174	PROVIDENCIA	351782	6300648	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	21
25224	2201	PROVIDENCIA	351852	6300583	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	3
25657	2237	PROVIDENCIA	348244	6298864	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	12
28570	2582	PROVIDENCIA	352095	6299712	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	4
29700	2780	PROVIDENCIA	351554	6299926	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:25	00:16:40	1	6
31785	3351	PROVIDENCIA	348013	6299787	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	328
31907	3381	PROVIDENCIA	348197	6299480	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	15
32149	3458	PROVIDENCIA	349630	6299725	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	10
32288	3508	PROVIDENCIA	350444	6301141	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	15
33058	3791	PROVIDENCIA	348568	6298693	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:20	00:21:40	1	3
33124	3814	PROVIDENCIA	348781	6298571	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	30
33253	3863	PROVIDENCIA	350511	6300473	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	15

Código Cliente	Código Cliente Modelo	Comuna	Posición Geográfica X [Mt]	Posición Geográfica Y [Mt]	Hora Inicio [hh:mm:ss]	Hora Fin [hh:mm:ss]	Tipo Local	Tiempo Descarga [hh:mm:ss/dda]	Tiempo Espera [hh:mm:ss]	Grupo Comuna	Demanda [Cajas]
33669	4087	PROVIDENCIA	350320	6300795	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	33
33711	4108	PROVIDENCIA	350568	6301102	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:25	00:16:40	1	4
34046	4310	PROVIDENCIA	349459	6299538	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	15
34195	4410	PROVIDENCIA	351540	6299954	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:10	00:21:40	1	21
34212	4415	PROVIDENCIA	351039	6301214	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:10	00:21:40	1	15
1590	55	RECOLETA	346760	6303848	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	6
2765	120	RECOLETA	347338	6302544	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:20:00	1	6
6194	419	RECOLETA	346978	6305013	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:20:00	1	3
9525	773	RECOLETA	347677	6303877	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:25:00	1	4
10038	839	RECOLETA	348035	6303139	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	3
2892	137	RECOLETA	346711	6300353	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	3
3768	198	RECOLETA	347046	6300410	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:10	00:20:50	1	30
5511	349	RECOLETA	347960	6299637	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:10	00:20:50	1	15
12539	1124	RECOLETA	346605	6304823	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:25:00	1	3
12837	1158	RECOLETA	346703	6303128	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:20:00	1	3
21343	1861	RECOLETA	347024	6304351	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:40	04:00:00	1	7
22151	1926	RECOLETA	347262	6302323	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:16:40	1	9
2237	92	RECOLETA	347406	6299559	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:10	00:20:50	1	30
26396	2301	RECOLETA	347338	6302305	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:15	00:11:40	1	10
22326	1940	RECOLETA	347507	6300030	10:00:00	16:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	328
15018	1365	RECOLETA	347971	6299597	15:00:00	18:00:00	PUB	00:00:15	00:11:40	1	12
16532	1507	RECOLETA	347886	6299657	16:00:00	19:00:00	PUB	00:00:30	00:36:40	1	3
29702	2782	RECOLETA	346164	6302587	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:40	04:00:00	1	4
29809	2804	RECOLETA	348982	6303100	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:25	00:21:40	1	6
22111	1923	RECOLETA	347089	6300521	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:25	00:16:40	1	9
16022	1473	VITACURA	351446	6302622	10:00:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:20	00:21:40	1	6
23829	2057	VITACURA	352205	6303354	07:30:00	21:00:00	BOTILLERIA	00:00:10	00:20:50	1	4
25020	2180	VITACURA	354574	6304216	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:30	00:20:00	1	12
33978	4263	VITACURA	353691	6304280	07:30:00	21:00:00	PUB	00:00:15	00:25:00	1	18

**Tabla 21: Clientes considerados para la instancia de prueba**

## 12.4 RESULTADOS INSTANCIA DE PRUEBA

**Clientes a Rutear** 90      **Clientes**  
**Capacidad Camión** 550      **Cajas**

Ruta	Ruta	Cantidad Clientes en Ruta	Distancia Recorrida [Km]	Demanda Satisfecha [Cajas]	% Utilización Capacidad	% Servicio
0-2023-588-758-357-416-1769-2144-3011-4011-4255-764-2212-3530-3798-4169-2009-2511-2877-2933-3995-3269-315-3324-617-786-798-1164-1603-2623-4521-0	Ruta 1	30	192.23	250	45.5%	56.7%
0-2434-3592-3801-4065-2390-110-487-1261-4241-1651-2295-1276-3029-4430-2333-1904-4458-1838-2022-2174-2201-2237-2582-2780-0	Ruta 2	24	104.32	436	79.3%	79.2%
0-3351-3381-3458-3508-3791-3814-3863-4087-4108-4310-4410-4415-0	Ruta 3	12	41.75	504	91.6%	100.0%
0-55-120-419-773-839-137-198-349-1124-1158-1861-1926-92-2301-1940-1365-1507-2782-2804-1923-1473-2057-2180-4263-0	Ruta 4	24	71.33	534	97.1%	54.2%
		90	<b>409.63</b>	<b>1724</b>	<b>78.4%</b>	<b>67.8%</b>

**Tabla 22: Detalle de Rutas según Metodología Actual - Instancia de Prueba**

## 12.5 CONFIGURACION DE COSTOS FIJOS

### Costos Asociados a Entrega de Productos

#### Costos Fijos

		Cantidad	Costo Unitario Mensual	Costo Total Mensual	Costo Diario
Chofer	Salario Base	1	\$ 140,000	\$ 140,000	\$ 4,666.67
	Comisiones	1	\$ 30,000	\$ 30,000	\$ 1,000.00
	Cargas Sociales	1	\$ 26,535	\$ 26,535	\$ 884.50
	<b>Total</b>			<b>\$ 196,535</b>	<b>\$ 6,551.17</b>
Ayudante	Salario Base	2	\$ 115,000	\$ 230,000	\$ 7,666.67
	Comisiones	2	\$ 15,000	\$ 30,000	\$ 1,000.00
	Cargas Sociales	2	\$ 18,700	\$ 37,400	\$ 1,246.67
	<b>Total</b>			<b>\$ 297,400</b>	<b>\$ 9,913.33</b>
Costo promedio por Remuneraciones (Mensual & Diario)				\$ 493,935	\$ 16,465

**Tabla 23: Costo por concepto de remuneraciones**

		Cantidad	Costo Unitario Trimestral	Costo Total Trimestral	Costo Diario
Chofer	Pantalón	2	\$ 3,832	\$ 7,664	\$ 85.16
	Camisas	2	\$ 2,328	\$ 4,656	\$ 51.73
	Kepis	1	\$ 1,500	\$ 1,500	\$ 16.67
	Zapatos	1	\$ 5,050	\$ 5,050	\$ 56.11
	Poleras	1	\$ 7,760	\$ 7,760	\$ 86.22
	<b>Total</b>			<b>\$ 26,630</b>	<b>\$ 295.89</b>
Ayudante	Pantalón	2	\$ 3,832	\$ 7,664	\$ 85.16
	Camisas	2	\$ 2,328	\$ 4,656	\$ 51.73
	Kepis	2	\$ 1,500	\$ 3,000	\$ 33.33
	Zapatos	2	\$ 5,050	\$ 10,100	\$ 112.22
	Poleras	2	\$ 7,760	\$ 15,520	\$ 172.44
	<b>Total</b>			<b>\$ 40,940</b>	<b>\$ 454.89</b>
Costo promedio por Indumentaria (Mensual & Diario)				\$ 22,523	\$ 751

**Tabla 24: Costo por concepto de indumentaria**

		Cantidad	Costo Unitario Anual	Costo Total Anual	Costo Diario
Costos por Patentes	Costo anual Habilitación/Verificación	1	\$ 1,200,000	\$ 1,200,000	\$ 3,333.33
	Costo anual de la Chapa	1	\$ 43,200	\$ 43,200	\$ 120.00
	Seguro anual de Carga	1	\$ 84,000	\$ 84,000	\$ 233.33
<b>Costo promedio por Patentes (Mensual &amp; Diario)</b>				<b>\$ 110,600</b>	<b>\$ 3,687</b>
		Cantidad	Costo Unitario Anual	Costo Total Anual	Costo Diario
Costos Mantenición	Mantenición Cubiertas y Cámaras	1	\$ 733,320	\$ 733,320	\$ 2,009.10
	Mantenición Batería	2	\$ 22,500	\$ 45,000	\$ 123.29
	Aceite	1	\$ 120,000	\$ 120,000	\$ 328.77
	Neumáticos	1	\$ 35,000	\$ 35,000	\$ 95.89
	Lavado y Engrase	1	\$ 180,000	\$ 180,000	\$ 493.15
	Filtros	1	\$ 35,000	\$ 35,000	\$ 95.89
	Caja de Cambios	1	\$ 72,000	\$ 72,000	\$ 197.26
	Diferencial	1	\$ 72,000	\$ 72,000	\$ 197.26
	Pintura	1	\$ 30,000	\$ 30,000	\$ 82.19
	Sistema Eléctrico	1	\$ 60,000	\$ 60,000	\$ 164.38
	Amortiguadores	1	\$ 24,192	\$ 24,192	\$ 66.28
	Inyectores	1	\$ 86,400	\$ 86,400	\$ 236.71
	Frenos	1	\$ 86,400	\$ 86,400	\$ 236.71
	Mano de Obra Mantenición	1	\$ 2,000,000	\$ 2,000,000	\$ 5,479.45
<b>Costo promedio por Mantenición (Mensual &amp; Diario)</b>				<b>\$ 298,276</b>	<b>\$ 9,943</b>

**Tabla 25: Costo por patentes y mantención**



## 12.6 RESULTADOS INSTANCIA DE PRUEBA

Configuración de Utilidades de Instancia de Prueba

<b>Costo Entrega Unitarios</b> [\$/Caja]
\$ 1,500

<b>Ingresos Unitarios</b> [\$/Caja]
\$ 6,000

	<b>Costo Fijo</b>	<b>[Km]</b>	<b>Costo Viaje</b>	<b>Demanda Asignada [Cajas]</b>	<b>Demanda Entregada [Cajas]</b>	<b>Costo Demanda</b>	<b>Costo Total</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Utilidades</b>
<b>Ruta 1</b>	\$ 30,844	192.23	\$ 16,660	250	104	\$ 156,000	\$ 203,504	\$ 624,000	\$ 420,496
<b>Ruta 2</b>	\$ 30,844	104.32	\$ 9,041	436	390	\$ 585,000	\$ 624,886	\$ 2,340,000	\$ 1,715,114
<b>Ruta 3</b>	\$ 30,844	41.75	\$ 3,618	504	504	\$ 756,000	\$ 790,463	\$ 3,024,000	\$ 2,233,537
<b>Ruta 4</b>	\$ 30,844	71.33	\$ 6,182	534	102	\$ 153,000	\$ 190,026	\$ 612,000	\$ 421,974
	\$ 123,378	409.63	\$ 35,501	1,724	1,100	\$ 1,650,000	<b>\$ 1,808,879</b>	<b>\$ 6,600,000</b>	<b>\$ 4,791,121</b>

**Tabla 26: Detalle de Costos según Metodología Actual - Instancia de Prueba**

Configuración de Utilidades de Metodología Propuesta

<b>Costo Entrega Unitarios [\$/Caja]</b>
\$ 1,500

<b>Ingresos Unitarios [\$/Caja]</b>
\$ 6,000

	Costo Fijo	[Km]	Costo Viaje	Demanda Asignada [Cajas]	Demanda Entregada [Cajas]	Costo Demanda	Costo Total	Ingresos	Utilidades
<b>Ruta 1</b>	\$ 30,844	54.02	\$ 4,681	331	331	\$ 496,500	\$ 532,026	\$ 1,986,000	\$ 1,453,974
<b>Ruta 2</b>	\$ 30,844	49.49	\$ 4,289	414	414	\$ 621,000	\$ 656,134	\$ 2,484,000	\$ 1,827,866
<b>Ruta 3</b>	\$ 30,844	38.44	\$ 3,331	478	478	\$ 717,000	\$ 751,176	\$ 2,868,000	\$ 2,116,824
<b>Ruta 4</b>	\$ 30,844	46.65	\$ 4,043	300	300	\$ 450,000	\$ 484,887	\$ 1,800,000	\$ 1,315,113
<b>Ruta 5</b>	\$ 30,844	76.85	\$ 6,660	80	80	\$ 120,000	\$ 157,505	\$ 480,000	\$ 322,495
<b>Ruta 6</b>	\$ 30,844	79.06	\$ 6,852	121	121	\$ 181,500	\$ 219,197	\$ 726,000	\$ 506,803
	\$ 185,067	344.51	\$ 29,857	1,724	1,724	\$ 2,586,000	\$ 2,800,924	\$ 10,344,000	\$ 7,543,076

**Tabla 27: Detalle de Costos según Metodología Propuesta - Instancia de Prueba**

**Clientes a Rutear**  
**Capacidad Camión**

90 **Clientes**  
550 **Cajas**

Ruta	Ruta	Cantidad Clientes en Ruta	Distancia Recorrida [Km]	Demanda Asignada [Cajas]	% Utilización Capacidad	% Servicio
0-1923-3814-3791-2333-2237-487-4410-2201-2174-2780-3798-2877-2180-4263-2057-3995-4415-1261-3863-1904-4108-4087-3508-4430-4310-0-	Ruta 1	25	54.02	331	60.2%	100.0%
0-2933-2511-3029-2582-3381-92-137-1276-3351-1507-1473-0-	Ruta 2	11	49.49	414	75.3%	100.0%
0-1124-2390-1164-198-1940-1365-2301-1926-120-2804-839-1158-2782-0-	Ruta 3	13	38.44	478	86.9%	100.0%
0-4255-3011-2434-617-4458-3592-2295-349-2022-1838-3458-0-	Ruta 4	11	46.65	300	54.5%	100.0%
0-758-588-419-1861-55-773-315-3530-2009-3324-4521-2023-0-	Ruta 5	12	76.85	80	14.5%	100.0%
0-4065-4241-3801-1651-786-2623-798-1603-416-2144-4169-764-357-3269-1769-2212-4011-110-0-	Ruta 6	18	79.06	121	22.0%	100.0%
		90	<b>344.51</b>	<b>1724</b>	<b>52.2%</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 28: Detalle según Metodología Propuesta –Instancia de Prueba**

## 12.7 RESULTADOS INSTANCIA REAL

	Cantidad Clientes en Ruta	Costo Fijo	Costo Variable				Costo Demanda	Costo Total	Ingresos	Utilidades
			[Km]	Costo Viaje	Demanda Asignada [Cajas]	Demanda Entregada [Cajas]				
<b>Ruta 1</b>	30	\$ 30,844	192.23	\$ 16,660	250	104	\$ 26,000	\$ 73,504	\$ 624,000	\$ 550,496
<b>Ruta 2</b>	24	\$ 30,844	104.32	\$ 9,041	436	390	\$ 97,500	\$ 137,385	\$ 2,340,000	\$ 2,202,615
<b>Ruta 3</b>	12	\$ 30,844	41.75	\$ 3,618	504	504	\$ 126,000	\$ 160,462	\$ 3,024,000	\$ 2,863,538
<b>Ruta 4</b>	24	\$ 30,844	71.33	\$ 6,182	534	102	\$ 25,500	\$ 62,526	\$ 612,000	\$ 549,474
<b>Ruta 5</b>	30	\$ 30,844	140.64	\$ 12,189	320	231	\$ 57,750	\$ 100,783	\$ 1,386,000	\$ 1,285,217
<b>Ruta 6</b>	31	\$ 30,844	147.24	\$ 12,761	177	101	\$ 25,250	\$ 68,855	\$ 606,000	\$ 537,145
<b>Ruta 7</b>	27	\$ 30,844	165.43	\$ 14,337	151	67	\$ 16,750	\$ 61,931	\$ 402,000	\$ 340,069
<b>Ruta 8</b>	30	\$ 30,844	219.24	\$ 19,001	240	109	\$ 27,250	\$ 77,095	\$ 654,000	\$ 576,905
<b>Ruta 9</b>	34	\$ 30,844	222.00	\$ 19,240	204	140	\$ 35,000	\$ 85,084	\$ 840,000	\$ 754,916
<b>Ruta 10</b>	25	\$ 30,844	98.78	\$ 8,561	493	493	\$ 123,250	\$ 162,655	\$ 2,958,000	\$ 2,795,345
<b>Ruta 11</b>	36	\$ 30,844	111.33	\$ 9,649	282	210	\$ 52,500	\$ 92,993	\$ 1,260,000	\$ 1,167,007
<b>Ruta 12</b>	35	\$ 30,844	178.86	\$ 15,501	466	289	\$ 72,250	\$ 118,595	\$ 1,734,000	\$ 1,615,405
<b>Ruta 13</b>	41	\$ 30,844	151.51	\$ 13,130	257	115	\$ 28,750	\$ 72,724	\$ 690,000	\$ 617,276
<b>Total</b>	379	\$ 400,972	1844.66	\$ 159,871	4314	2855	\$ 713,750	<b>\$ 1,274,593</b>	<b>\$ 17,130,000</b>	<b>\$ 15,855,407</b>

Tabla 29: Detalle de Utilidades según Metodología Actual - Validación del Modelo

	Cantidad Clientes en Ruta	Costo Fijo	Costo Variable				Costo Demanda	Costo Total	Ingresos	Utilidades
			[Km]	Costo Viaje	Demanda Asignada [Cajas]	Demanda Entregada [Cajas]				
<b>Ruta 1</b>	26	\$ 30,844	92.49	\$ 8,016	246	246	\$ 61,500	\$ 100,360	\$ 1,476,000	\$ 1,375,640
<b>Ruta 2</b>	27	\$ 30,844	69.17	\$ 5,995	403	403	\$ 100,750	\$ 137,589	\$ 2,418,000	\$ 2,280,411
<b>Ruta 3</b>	18	\$ 30,844	33.67	\$ 2,918	464	464	\$ 116,000	\$ 149,762	\$ 2,784,000	\$ 2,634,238
<b>Ruta 4</b>	18	\$ 30,844	49.19	\$ 4,263	225	225	\$ 56,250	\$ 91,357	\$ 1,350,000	\$ 1,258,643
<b>Ruta 5</b>	9	\$ 30,844	40.35	\$ 3,497	416	416	\$ 104,000	\$ 138,341	\$ 2,496,000	\$ 2,357,659
<b>Ruta 6</b>	17	\$ 30,844	71.50	\$ 6,196	91	91	\$ 22,750	\$ 59,790	\$ 546,000	\$ 486,210
<b>Ruta 7</b>	25	\$ 30,844	72.23	\$ 6,260	234	234	\$ 58,500	\$ 95,604	\$ 1,404,000	\$ 1,308,396
<b>Ruta 8</b>	20	\$ 30,844	58.95	\$ 5,109	253	253	\$ 63,250	\$ 99,203	\$ 1,518,000	\$ 1,418,797
<b>Ruta 9</b>	19	\$ 30,844	71.40	\$ 6,188	139	139	\$ 34,750	\$ 71,782	\$ 834,000	\$ 762,218
<b>Ruta 10</b>	19	\$ 30,844	69.71	\$ 6,042	135	135	\$ 33,750	\$ 70,636	\$ 810,000	\$ 739,364
<b>Ruta 11</b>	25	\$ 30,844	73.24	\$ 6,347	413	413	\$ 103,250	\$ 140,441	\$ 2,478,000	\$ 2,337,559
<b>Ruta 12</b>	20	\$ 30,844	52.98	\$ 4,592	135	135	\$ 33,750	\$ 69,186	\$ 810,000	\$ 740,814
<b>Ruta 13</b>	22	\$ 30,844	86.31	\$ 7,480	133	133	\$ 33,250	\$ 71,574	\$ 798,000	\$ 726,426
<b>Ruta 14</b>	12	\$ 30,844	28.12	\$ 2,437	197	197	\$ 49,250	\$ 82,531	\$ 1,182,000	\$ 1,099,469
<b>Ruta 15</b>	20	\$ 30,844	49.09	\$ 4,254	158	158	\$ 39,500	\$ 74,598	\$ 948,000	\$ 873,402
<b>Ruta 16</b>	29	\$ 30,844	79.49	\$ 6,889	201	201	\$ 50,250	\$ 87,983	\$ 1,206,000	\$ 1,118,017
<b>Ruta 17</b>	27	\$ 30,844	72.24	\$ 6,261	191	191	\$ 47,750	\$ 84,855	\$ 1,146,000	\$ 1,061,145
<b>Ruta 18</b>	26	\$ 30,844	83.06	\$ 7,198	292	292	\$ 73,000	\$ 111,042	\$ 1,752,000	\$ 1,640,958
<b>Total</b>	379	\$ 555,192	1153.19	\$ 99,943	4326	4326	\$ 1,081,500	\$ 1,736,635	\$ 25,956,000	\$ 24,219,365

**Tabla 30: Detalle de Utilidades según Metodología Propuesta - Validación del Modelo**

Ruta	Ruta	Cantidad Clientes en Ruta	Distancia Recorrida [Km]	Demanda Satisfecha [Cajas]	% Utilización Capacidad	% Servicio
0-35-130-133-140-227-156-138-143-142-139-136-144-137-145-141-8-5-7-6-10-28-21-4-9-12-15-0	Ruta 1	26	92.49	246	44.7%	100%
0-32-27-25-39-29-31-34-24-37-47-11-13-16-22-23-30-19-89-14-43-53-36-54-65-51-50-63-0	Ruta 2	27	69.17	403	73.3%	100%
0-67-76-68-78-86-73-81-74-347-46-58-85-216-71-70-75-69-3-0	Ruta 3	18	33.67	464	84.4%	100%
0-52-44-59-60-64-57-48-49-61-66-38-26-18-90-88-20-2-77-0	Ruta 4	18	49.19	225	40.9%	100%
0-42-55-56-62-17-82-83-87-84-0	Ruta 5	9	40.35	416	75.6%	100%
0-349-161-170-107-147-155-321-105-131-126-129-324-41-45-158-72-263-0	Ruta 6	17	71.50	91	16.5%	100%
0-356-376-166-151-91-352-99-102-100-33-160-362-372-360-367-241-348-343-311-310-309-264-259-266-262-0	Ruta 7	25	72.23	234	42.5%	100%
0-308-340-344-313-342-354-116-104-92-103-110-109-106-95-101-134-135-127-335-79-0	Ruta 8	20	58.95	253	46.0%	100%
0-331-379-164-119-120-146-96-94-125-132-128-169-369-355-341-346-307-306-260-0	Ruta 9	19	71.40	139	25.3%	100%
0-265-261-304-339-345-326-357-365-163-167-165-117-112-113-108-199-203-159-93-0	Ruta 10	19	69.71	135	24.5%	100%
0-181-185-183-111-121-98-173-123-178-175-243-253-172-171-114-115-40-174-177-118-162-176-179-187-180-0	Ruta 11	25	73.24	413	75.1%	100%
0-198-195-219-192-193-191-188-190-182-189-184-168-226-220-223-225-222-229-328-332-0	Ruta 12	20	52.98	135	24.5%	100%
0-334-359-150-149-154-153-152-148-157-97-122-124-224-228-374-363-252-255-245-296-317-336-0	Ruta 13	22	86.31	133	24.2%	100%
0-351-330-257-375-337-377-338-312-364-327-323-373-0	Ruta 14	12	28.12	197	35.8%	100%
0-80-329-366-350-333-353-258-358-378-370-371-325-368-256-254-251-247-287-194-298-0	Ruta 15	20	49.09	158	28.7%	100%
0-211-196-217-233-242-236-230-232-238-240-239-237-231-235-234-197-316-300-221-246-249-250-361-303-270-288-292-305-286-0	Ruta 16	29	79.49	201	36.5%	100%
0-276-213-204-202-212-208-210-200-214-201-206-207-218-280-215-205-209-281-268-301-271-267-269-273-272-244-248-0	Ruta 17	27	72.24	191	34.7%	100%
0-283-285-186-274-278-279-277-275-282-322-320-319-315-294-302-314-318-290-295-289-297-299-291-293-284-1-0	Ruta 18	26	83.06	292	53.1%	100%
		<b>379</b>	<b>1153.19</b>	<b>4326</b>	<b>43.70%</b>	<b>100%</b>

**Tabla 31: Detalle de Rutas según Metodología Propuesta – Validación del Modelo**

## 12.8 COMPARATIVO DE RESULTADOS INSTANCIA REAL

	Cantidad de Rutas	Cantidad Clientes en Ruta	Costo Fijo	Costo Variable				Costo Demanda
				[Km]	Costo Viaje	Demanda Asignada [Cajas]	Demanda Entregada [Cajas]	
Metodología Actual	13	379	\$ 400,972	1844.66	\$ 159,871	4326	2855	\$ 713,750
Metodología Propuesta	18	379	\$ 555,192	1153.19	\$ 99,943	4326	4326	\$ 1,081,500

	Cantidad de Rutas	Costo Total	Ingresos	Utilidades	% Utilización Capacidad	% Utilización Real Capacidad	% Servicio [Clientes Atendidos / Clientes Asignados]	Nivel de Entregas [Demanda Entregada / Demanda Asignada]
Metodología Actual	13	\$ 1,274,593	\$ 17,130,000	\$ 15,855,407	60.34%	39.93%	64.12%	66.18%
Metodología Propuesta	18	\$ 1,736,635	\$ 25,956,000	\$ 24,219,365	43.70%	43.70%	100.00%	100.00%

Tabla 32: Cuadro Comparativo de Resultados - Metodología Actual versus Metodología Propuesta