

**Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil Industrial**



**Propuesta de Mejora del Sistema de Ruteo de Cencocal, para las ciudades de Quilpué y
Villa Alemana**

Por

**Macarena Polet Porras Toledo
Luciano Antonio Henríquez Villalobos**

Trabajo de Título para optar al Grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de
Ingeniero Civil Industrial.

Profesor Guía,
Giglia Gómez Villouta

Julio, 2014.

Dedicatoria y Agradecimientos

*Dedicamos este trabajo de título a nuestros padres: Oscar Porras, Margarita Toledo; Omar
Henríquez, Susana Villalobos.*

*Agradecemos a nuestra profesora guía Giglia Gómez, a
nuestras familias, amigos y Cencocal que nos apoyaron
en este momento.*

Macarena Porras; Luciano Henríquez

Índice

Índice	iii
Glosario	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas.....	ix
Resumen	x
Introducción.....	11
1. Descripción de la empresa.....	14
1.1 Historia de la empresa.....	14
1.2 Estructura organizacional	15
1.3 Actividades que realiza la empresa.....	16
1.4 Estructura de distribución	17
1.4.1 Proveedores	17
1.4.2 Centro de distribución	18
1.4.3 Sucursales de la empresa.....	20
1.4.4 Vendedores	21
1.4.5 Flota de vehículos.....	21
2. Descripción del problema.....	24
2.1 Descripción detallada del sistema bajo estudio	24
2.1.1 Vehículos.....	24
2.1.2 Proceso de despacho.....	25
2.1.3 Definición de rutas.....	25
2.2 Detección y cuantificación de problemas	26
2.2.1 Problemas en la actualidad	26
2.3 Objetivos.....	32
2.3.1 Objetivo general	32
2.3.2 Objetivos específicos.....	32
2.4 Resultados esperados	32

3.	Marco Teórico	34
3.1	Introducción	34
3.2	Cadena de suministro	35
3.3	Logística: Definición	36
3.3.1	Importancia de la logística.....	37
3.3.2	Niveles de planeación logística	39
3.3.3	Estructura del sistema logístico	40
3.4	Modelos de IO para la optimización de rutas distribución	45
3.4.1	El Problema del agente viajero (Travelling Salesman Problem –TSP)	45
3.4.2	VRP (Vehicule Routing Problem) o Problema de ruteo de vehículos	48
3.5	Elección del modelo de ruteo aplicable al caso de estudio.....	51
3.6	Métodos de solución.....	51
3.6.1	Heurísticas	52
3.6.2	Limitaciones de los algoritmos heurísticos	56
3.6.3	Metaheurísticas.....	56
3.7	Proceso de resolución del modelo mediante computadora	60
3.7.1	Tipos de herramientas para resolver problemas de ruteo de vehículos	60
3.7.2	Elección de la herramienta de ruteo	63
4.	Metodología de trabajo.....	66
5.	Descripción y metodología para la modelación y resolución del problema.....	70
5.1	Medir o calcular los parámetros de entrada al modelo	70
5.1.1	Matriz de distancias	71
5.1.2	Construcción del Grafo.....	73
5.1.3	Filtro de la información (clientes)	73
5.2	Descripción del Modelo Matemático que se aplicara	74
5.2.1	Observaciones del modelo matemático	76
5.3	Lingo: herramienta de resolución del problema	76
5.3.1	Estructura de un Modelo Lingo	76
5.3.2	Sintaxis de un modelo en LINGO	78
5.3.3	Implementación del Modelo.....	79

6.	Validación y Análisis de resultados.	85
6.1	Verificación y Validación del modelo matemático.	85
6.1.1	Comparación con un caso conocido en la literatura.	86
6.1.2	Análisis de los tiempos de ejecución con una matriz real del problema.	88
6.2	Análisis de resultados	93
6.2.1	Definición de la Línea base	93
6.2.2	Resultados de la Metodología Propuesta.....	97
6.2.3	Resultados de la Metodología Propuesta vs. Situación Actual.	101
6.2.4	Nivel de incumplimiento de entrega.....	103
7.	Factibilidad de la propuesta.....	107
8.	Conclusiones.....	110
9.	Bibliografía.....	113
10.	Anexos.....	116

Glosario

Casa matriz: Es el centro de operaciones donde se toman las decisiones importantes.

Código Fuente: Es un conjunto de líneas de texto que son las instrucciones que debe seguir la computadora para ejecutar dicho programa. Por tanto, en el código fuente de un programa está escrito por completo su funcionamiento.

Distribuidor Minorista: Es la empresa comercial o persona en régimen de autónomo que vende productos al consumidor final. Son el último eslabón del canal de distribución, el que está en contacto con el mercado.

Dominio discreto: Es una función matemática cuyo dominio de definición es un conjunto numerable.

Espacio de búsqueda: Se refiere al dominio de la función a ser optimizada. En el caso de los algoritmos de búsqueda, que manejan espacios discretos, se refiere al conjunto de todas las posibles soluciones candidatas a un problema.

Estibar: Colocar la carga a bordo del vehículo para ser transportada, ocupando el mínimo espacio posible, evitando averías en la misma y reduciendo al mínimo las demoras en la operación de descarga.

Flota heterogénea: Flota compuesta por vehículos con diferentes características operacionales, como por ejemplo: distintos rendimientos, capacidades y costos.

Flota homogénea: Flota compuesta por vehículos con similares características operacionales.

Heurística: Procedimientos simples que realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y dan soluciones de calidad aceptable en tiempos de cálculo generalmente moderados

Metaheurística: Procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimidad local.

NP Hards (Non deterministic Polynomial-time Hard): También llamados NP-Complejos, es una denominación que reciben cierto tipo de problemas en la Teoría de Complejidad Computacional, que se refiere al tipo de problemas que no tal vez no sea posible resolver en tiempo polinomial de una máquina de Turing, es decir que no existen algoritmos exactos de solución para ellos, a menos que sea posible convertirlos en problemas más simples equivalentes.

Ole: (del inglés *Object Linking and Embedding*) Es un *framework* fabricado por Microsoft para la comunicación de datos entre aplicaciones.

Óptimo local: Un estado óptimo fácil de encontrar en el espacio de estados, pero no garantizado que sea el óptimo global.

Programación: Es el proceso de diseñar, codificar, depurar y mantener el código fuente de programas computacionales.

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora. (RAE, 2013)

Solver: Conjunto de solucionadores que trae incorporado lingo, para resolver diferentes tipos ecuaciones.

Subtour: En problemas de ruteo de vehículos, son aquellas rutas que no comienzan o no terminan en la facilidad central. Usualmente parten de un punto de entrega y terminan en otro, haciendo un ciclo cerrado. Surgen de una formulación deficiente de las restricciones del problema.

Teoría de Grafos: Es un campo de estudio de las matemáticas y las ciencias de la computación, que estudia las propiedades de los grafos, estructuras que constan de dos partes, el conjunto de vértices, nodos o puntos; y el conjunto de aristas, que pueden ser orientados o no.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Estructura organizacional de la empresa.....	15
Figura 1.2: Actividades de distribución de la empresa.....	16
Figura 1.3: Principales proveedores de Cencocal S.A.....	17
Figura 1.4: Marcas propias de la organización.....	18
Figura 1.5: Bodega Centro de distribución Nogales.	19
Figura 1.6: Ubicación de los centros de distribución.	20
Figura 1.7: Vehículos de la empresa.	21
Figura 2.1: Vehículo y sus dimensiones.....	25
Figura 2.2: Representación de las rutas de Quilpué.	26
Figura 2.3: Gráfico que ilustra el aumento de la cantidad de clientes.....	27
Figura 2.4: Esquema que representa las principales causas del problema de transporte.....	31
Figura 3.1: La cadena de suministro.....	36
Figura 3.2: Importancia de la logística para la empresa.	38
Figura 3.3: Subsistemas de la logística.....	40
Figura 3.4: Aspecto de una solución al problema del TSP.....	47
Figura 3.5: Representación grafica del VRP.....	49
Figura 3.6: Representación grafica de un VRP en un grafo G.	50
Figura 3.7: Representación grafica del algoritmo de ahorro.....	55
Figura 3.8: Las hormigas y el camino más corto.....	59
Figura 5.1: Datos de las distancias entre los nodos, para la creación de matrices	71
Figura 5.2: Matriz de distancia entre nodos de Ruta 4- Villa-Alemana.....	72
Figura 5.3: Grafo representativo de los nodos de la Ruta 4-Villa Alemana.....	73
Figura 5.4: Formulación matemática del TSP.....	75
Figura 6.1: Datos de salida entregados por LINGO.....	87
Figura 6.2: Formula de costos de ruta.	88
Figura 6.3: Extracto de matriz día jueves Villa Alemana.....	89
Figura 6.4: Ventana final del <i>solver</i> de LINGO.....	90
Figura 6.5: Grafo de recorrido ruta del día jueves Villa Alemana.	91
Figura 6.6: Gráfico de tiempos de ejecución del modelo.....	92
Figura 6.7 : Formula de costos de ruta.	95
Figura 6.8: Secuencia de visita a los clientes.	100
Figura 6.9: Simplificación del Sistema de distribución actual de Cencocal.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Muestra de un extracto de datos de los clientes de la Región de Valparaíso.	22
Tabla 2.1: Problemas originados en el sistema actual de rutas.	29
Tabla 3.1: Áreas de Decisión de la Logística.	39
Tabla 3.2: Dimensiones máximas de cada versión.....	63
Tabla 3.3: “Resumen comparativo entre las herramientas alternativas”	64
Tabla 5.1: Operadores lógicos utilizados en las restricciones	78
Tabla 5.2: Funciones de dominio de variable.....	78
Tabla 5.3: Matriz de distancia de nodos (Km)	80
Tabla 5.4: Formatos compatibilidad Lingo	82
Tabla 6.1: Extracto de la matriz utilizada para la validación del modelo LINGO.	86
Tabla 6.2: Comparación solución LINGO versus solución teórica de literatura.....	87
Tabla 6.3: Orden de ruta para el día jueves de Villa Alemana.	90
Tabla 6.4: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.	94
Tabla 6.5: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Villa Alemana.	94
Tabla 6.6: Costos de combustible del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.....	95
Tabla 6.7: Costos de combustible del mes de octubre del 2013, para la ciudad de V.A.....	96
Tabla 6.8: Costos de distribución Mes de octubre 2013 (Quilpué y Villa Alemana).....	96
Tabla 6.9: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.	97
Tabla 6.10: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Villa Alemana.	98
Tabla 6.11: Costos de combustible para la ciudad de Quilpué.....	98
Tabla 6.12: Costos de combustible para la ciudad de Villa Alemana.	99
Tabla 6.13: Costos de distribución Mes de octubre 2013 (Quilpué y Villa Alemana)	100
Tabla 6.14: Comparativa Situación Actual vs. Metodología Propuesta.....	101
Tabla 6.15: Impacto en los kilómetros recorridos.	102
Tabla 6.16: Impacto en los costos de combustibles.....	102
Tabla 6.17: Nivel de Incumplimiento de entregas.....	105
Tabla 6.18: Resultado promedio de indicadores	105
Tabla 7.1: Requerimientos para la implementación de la propuesta y su disponibilidad.	107

Resumen

El problema de ruteo de vehículos ha sido estudiado hace bastante tiempo, ya que juega un papel central en la gestión de los sistemas logísticos y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros para las organizaciones. En la actualidad existen varios métodos basados en la Investigación de Operaciones para la optimización de redes logísticas centradas en el transporte de mercancías, tal como es el caso del TSP (*Travelling Salesman Problem*) y VRP (*Vehicule Routing Problem*). Cada uno de ellos permite diseñar rutas de transporte para uno o más vehículos que visiten diferentes puntos específicos, para entregas que se encuentren dispersas geográficamente. El presente estudio es un trabajo aplicativo de uno de los problemas mencionados anteriormente. En este caso el *Travelling Salesman Problem* (Problema del Agente Viajero).

La necesidad de efectuar este trabajo surge debido a que en la empresa bajo estudio, no existe un método confiable para determinar el orden de las rutas de distribución. Es por esto que el objetivo que se planteo para la presente memoria de título fue generar una “Propuesta de mejora del sistema de ruteo de Cencocal S.A para las ciudades de Quilpué y Villa Alemana”.

El aumento de clientes en los últimos años ha sido una de las principales causas de los problemas que posee actualmente la empresa. Este crecimiento se ha debido principalmente a los proyectos adquiridos el año 2009 con las empresas Watts y Unilever, dificultando la determinación de rutas por parte del rutero. Lo anterior conlleva una serie de consecuencias, tales como:

- Aumento en el consumo de combustibles, los cuales han excedido los límites establecidos por la empresa.
- No se cumple con las entregas acordadas con los clientes.

Con respecto a la herramienta de solución del modelo, se realizó el estudio de varias alternativas de las cuales se escogió la más apropiada al caso.

Los resultados que se obtuvieron con la aplicación de la metodología propuesta, conducen a una disminución de los kilómetros recorridos de los vehículos, lo que se traduce en ahorros económicos debido a la disminución de los costos de combustible. También la metodología propuesta se traduce en mejoras con respecto a los actuales niveles de servicio. Los resultados anteriores demuestran las ventajas de utilizar metodologías para la optimización de rutas de distribución, con el objetivo de minimizar costos dentro de una organización.

Introducción

Una de las principales actividades de la cadena logística corresponde a la logística de distribución, la cual se encarga de proporcionar un puente entre los puntos de producción con los clientes. Actualmente para las empresas es fundamental que logren un manejo eficiente de sus productos hacia los diferentes clientes, de tal forma de minimizar los costos de transporte y aumentar la satisfacción del cliente.

Lo anterior es sumamente importante para la competitividad de las empresas y más aun cuando su principal actividad es la distribución de productos, como es el caso de Cencocal. Por ende una adecuada gestión de la distribución se puede traducir en ahorros en los costos de transporte, específicamente en los costos de combustibles. En este contexto la Investigación de Operaciones cumple un papel fundamental debido a las diferentes metodologías que presenta que facilitan la planificación del transporte y la logística, como son los llamados “problemas de ruteo de vehículos”

En un problema de ruteo de vehículos existen tres elementos principales: clientes, vehículos y depósitos. Los clientes corresponden a sitios que demandan ser visitados, los vehículos son aquellos que se mueven para realizar dichas visitas y los depósitos constituyen los lugares de partida y regreso de los vehículos. Suelen modelarse como problemas de optimización combinatoria, en los cuales existe un conjunto de restricciones y una función objetivo. Las restricciones se utilizan para modelar las diferentes características y limitaciones asociadas a los clientes, vehículos y depósitos, mientras que la función objetivo representa una medida del costo de cada una de las potenciales soluciones.

Resolver el problema consiste en optimizar el orden lógico de la ruta, considerando que se respeten todas las restricciones, de modo que se minimice el valor de la función objetivo. Para ello la evolución de la tecnología juega un papel fundamental, debido a la creación de innovadoras herramientas de apoyo a la toma de decisiones, las cuales permiten en poco tiempo, hacer cálculos exactos sobre la ruta óptima que se debiese seguir.

Cencocal distribuye productos de consumo (como lo son los abarrotes, bebidas, lácteos, aseo y hogar etc.), entre las regiones III y VII y posee dos centros de distribución en las ciudades de Coquimbo (IV Región) y Nogales (V Región). El estudio del presente trabajo de título se centrará específicamente en la distribución de productos para las ciudades de Villa Alemana y Quilpué, considerando para esto solo el centro de distribución ubicado en la ciudad de Nogales (los motivos se explican en el Capítulo 2).

La estructura del presente trabajo se configura de la siguiente manera. En el capítulo I presenta la descripción de la empresa. En el capítulo II se describe el problema a resolver y los objetivos del trabajo, así como los resultados esperados. En el capítulo III se detalla los

antecedentes recabados para abordar el problema, consiste en realizar la revisión bibliográfica de trabajos anteriores que tengan relación con el problema estudiado. El capítulo IV presenta los lineamientos generales de la metodología que se utilizará a lo largo del trabajo. El capítulo V, el más relevante en todo este trabajo, detalla el desarrollo de la propuesta que se debe utilizar para enfrentar el problema. Se detallan las variables, restricciones, parámetros y función objetivo del problema general. En el capítulo VI se realiza el análisis de los resultados, así como también la validación de estos mismos. Luego de lo anterior en el capítulo VII, se realiza una breve justificación de invertir en la metodología propuesta, para finalizar en el capítulo VIII con las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I: Descripción la Empresa

En esta sección se presenta una descripción de la empresa en la cual se enmarca el problema a estudiar. Con el objetivo de entregar una visión global de la estructura, servicios, clientes y sistema de distribución.

1. Descripción de la empresa

1.1 Historia de la empresa

Central de Compras la Calera (Cencocal) fue creada en el año 1973 en la cámara de comercio de la ciudad de La Calera con la finalidad de atender y abastecer al comercio minorista de ciudad.

En 1982, se convierte en Sociedad Anónima y en esta misma década comienza su etapa de expansión donde crea su primera sucursal en la ciudad de Illapel, continuando con las ciudades de Los Andes, Quillota, Valparaíso.

La distribuidora en sus inicios contaba con solo dos trabajadores, pero el crecimiento sostenido se ha traducido en un aumento de los recursos humanos y actualmente cuenta con más de 500 empleados y más de 135 trabajadores indirectos, cumpliendo con un procedimiento distribuidor que implica una atención personalizada a sus clientes y un rápido despacho de los pedidos a sus locales, para ello cuentan con 130 vendedores radicados en las distintas zonas geográficas donde la empresa distribuye.

En el año 2006 llega a Cencocal “Disvet”, proyecto de operación comercial proveniente de Nestlé Chile S.A., destinado a la distribución de su línea tradicional y enfocada al aumento de cobertura en la IV y V Región. Posteriormente a principios del año 2009 llega a Cencocal “Disone”, proyecto de operación comercial proveniente de Unilever Chile S.A. A mediados del 2009 se une a Cencocal la operación comercial de Watts, partiendo en una primera etapa en la V región, para luego expandirse a la RM. Por último, en Diciembre de 2009 ingresa el proyecto de operación comercial de empresas Carozzi tanto para III y IV región, fortaleciendo a Cencocal aun más en esas zonas.

Actualmente Cencocal crece a un ritmo vertiginoso siendo uno de los mayores distribuidores del comercio mayorista y minorista de productos de consumo a nivel nacional, abasteciendo a más de 10.000 comerciantes ubicados entre las regiones III y VI, incluyendo la región metropolitana.

La Misión y la Visión de la empresa se presentan a continuación:

Misión

“Satisfacer las necesidades y expectativas de nuestros clientes, llegando a ser una empresa líder en el mercado, buscando alcanzar los objetivos de crecimiento y financieros de nuestros accionistas, así como contribuir al desarrollo de nuestros miembros”.

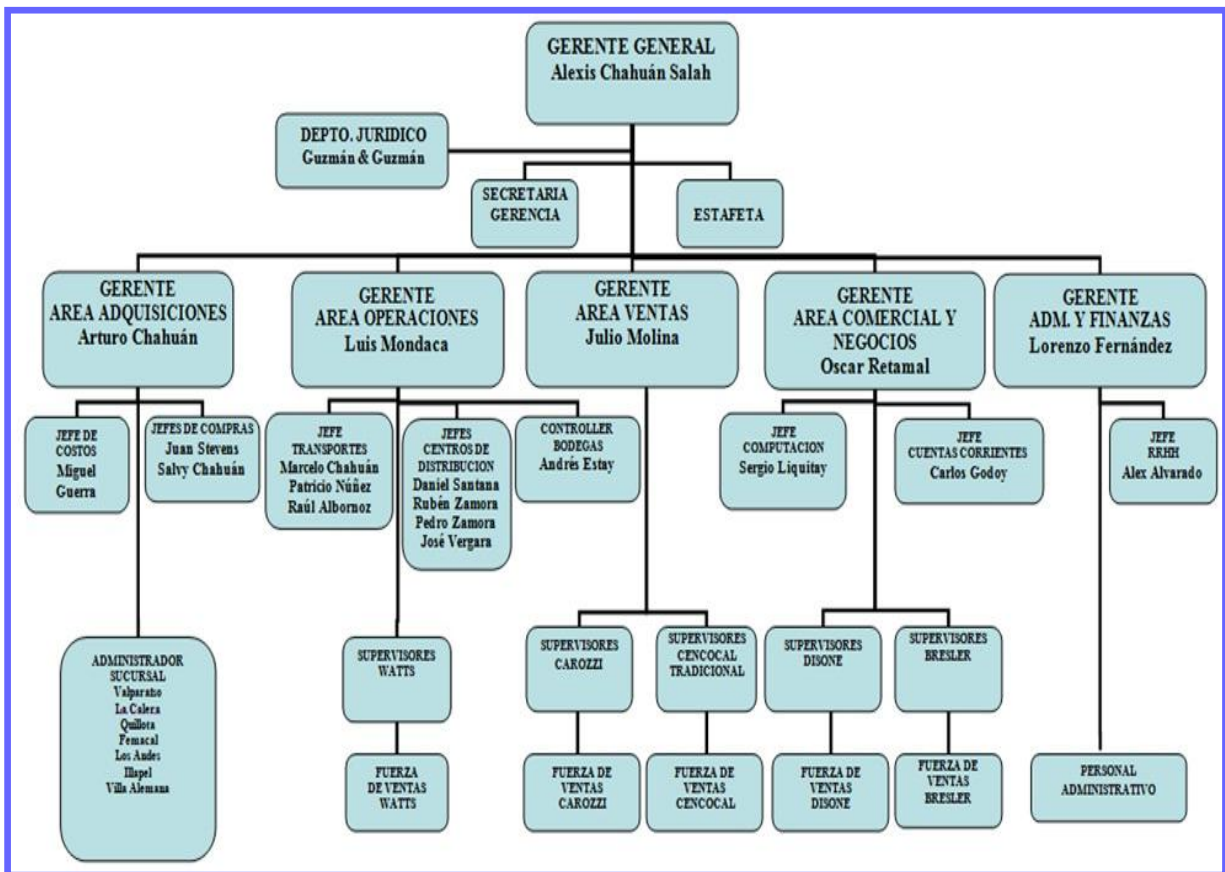
Visión

“Crear valor a nuestros productos y servicios, estando a la vanguardia de los cambios en el mercado”.

1.2 Estructura organizacional

En la figura 1.1 se presenta la estructura organizacional actual de la empresa, con sus respectivas líneas de mando y las diferentes áreas en que se subdivide la gerencia de la organización.

Figura 1.1: Estructura organizacional de la empresa



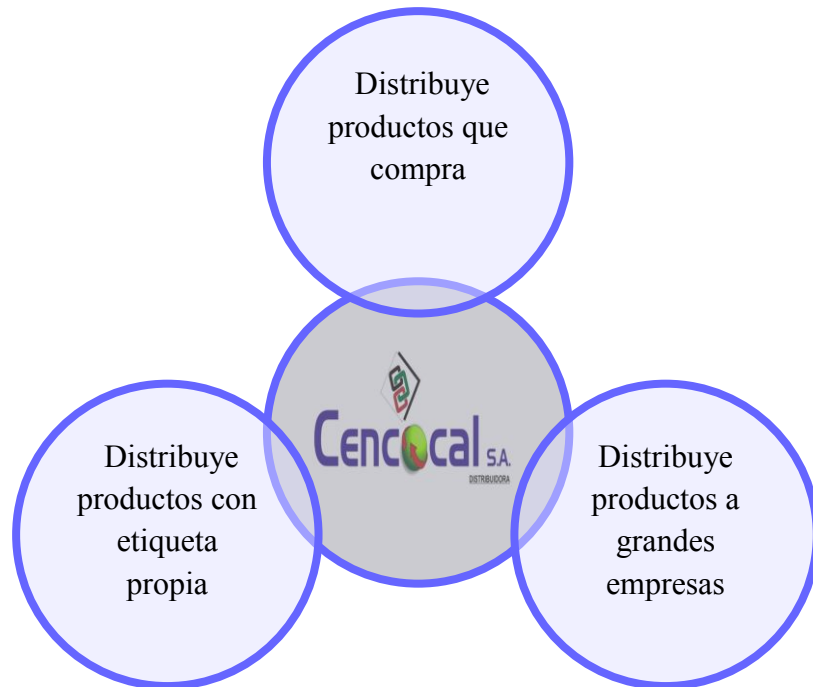
Fuente: Pagina web de Cencocal (www.Cencocal.cl).

1.3 Actividades que realiza la empresa

Cencocal se encarga de la distribución de productos de consumo hacia el comercio minorista y mayorista, siendo un pilar fundamental del sistema logístico de las empresas que fabrican productos de consumo de Chile.

La empresa como se muestra en la figura 1.2, realiza tres actividades de distribución:

Figura 1.2: Actividades de distribución de la empresa



Fuente: Elaboración propia, en base a información proporcionada por Cencocal.

- Una de las actividades que realiza la empresa es comprar productos a diversos proveedores, para luego almacenarlos en su bodega (nogales), para después distribuirlos a sus clientes.
- Otra de las actividades que realiza Cencocal S.A. Es comprar productos sin etiquetación para luego colocarle una etiqueta propia de la empresa (marca “Cien”), para luego distribuir los productos a sus clientes.
- Por último se encarga de distribuir los productos de grandes empresas como lo son Nestlé; Unilever; Watts; Carozzi.

1.4 Estructura de distribución

La organización para cumplir con su proceso distribuidor se compone de lo siguiente:

- Proveedores
- Centro de distribución
- Vendedores
- Sucursales de ventas
- Flota de Vehículos

1.4.1 Proveedores

Son los encargados de abastecer a la empresa con los productos de consumo los cuales son almacenados en la bodega principal (Nogales) y a partir de esta abastecer a sus clientes, sucursales y centro de distribución menor.

Dentro de los principales proveedores que cuenta la compañía se encuentran Watts, Carozzi, Unilever y Nestlé, los cuales abastecen a Cencocal con sus respectivas líneas de productos.

Figura 1.3: Principales proveedores de Cencocal S.A.



Fuente: Elaboración propia, en base a información proporcionada por Cencocal.

1.4.1.1 Productos

En el proceso de aprovisionamiento Cencocal se abastece por parte de sus proveedores de una diversidad de productos que se clasifican dentro de distintas categorías, las que se presentan en el siguiente listado:

- Abarrotes
- Lácteos y Refrigerados
- Jugos y Bebidas
- Vinos y Licores
- Perfumería y Cuidado personal
- Confeitería y Snacks
- Aseo y Hogar
- Varios

1.4.1.2 Marcas propias

La compañía también cuenta con dos marcas que son propias de la empresa las cuales corresponden a la marca “Cien” y “Marymar”. Para ello la empresa compra productos sin etiquetación para luego adherirle su marca. A continuación se presenta una imagen ilustrativa de los productos de marca propia de la compañía.

Figura 1.4: Marcas propias de la organización.



Fuente: Elaboración propia, en base a información proporcionada por Cencocal.

1.4.2 Centro de distribución

La empresa cuenta con un amplio centro logístico ubicado en la localidad de Nogales, específicamente en la panamericana norte Km 114. Este centro de distribución cuenta con una infraestructura de 20.000 mts² y es el principal de la organización, de éste se distribuyen

las mercaderías hacia los clientes de la quinta, sexta y región metropolitana, como también a las sucursales que tiene la empresa en las diferentes ciudades de la zona.

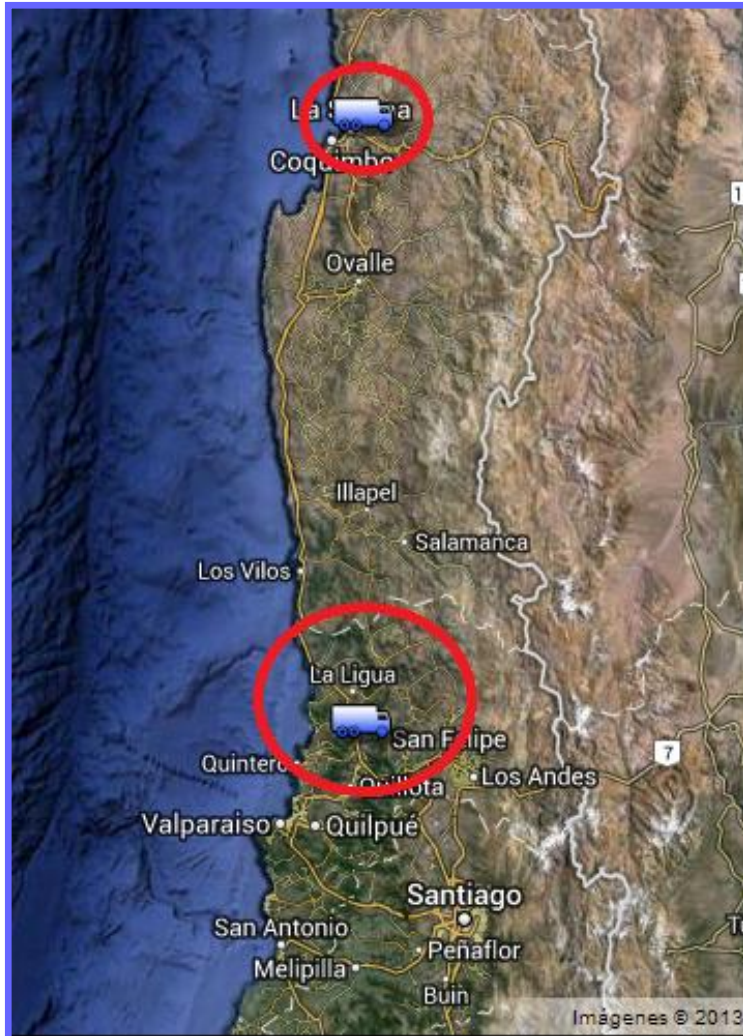
Figura 1.5: Bodega Centro de distribución Nogales.



Fuente: Elaboración Propia.

También la compañía cuenta con un segundo centro logístico ubicado en la ciudad de Coquimbo. Este centro de distribución fue inaugurado el año 2009, cuenta con una infraestructura de 2.714 mts² y se encarga de abastecer a los clientes de la tercera y cuarta región.

Figura 1.6: Ubicación de los centros de distribución.



Fuente: Elaboración Propia.

1.4.3 Sucursales de la empresa.

1.4.3.1 Casa matriz

Ubicada en la ciudad de la calera con 1000 mts², aquí se albergan los altos directivos de la empresa, por ende es el lugar donde se toman las decisiones importantes que le dan el rumbo a la organización.

1.4.3.2 Centros de venta

La organización también cuenta con diferentes sucursales que funcionan como salas de ventas en donde el cliente se dirige directamente a comprar al lugar la mercadería. Las sucursales que existen en la actualidad son las que se mencionan a continuación:

- Sucursal Illapel (ubicada en Calle Buin 611)
- Sucursal Valparaíso (ubicada en Calle Uruguay 213)
- Sucursal La Calera (ubicada en Avenida Gonzalo Lizasoain 305)
- Sucursal Villa Alemanda (ubicada en Avenida Valparaíso 882)
- Sucursal Los Andes (ubicada en Avenida Santa Teresa 440)
- Sucursal Quillota (ubicada en 21 de mayo 319)

1.4.4 Vendedores

Son los encargados de ir a cada local y tomar el pedido de los clientes, para ello registran los pedidos en una computadora portátil y envían la información de manera simultánea al centro de distribución de Nogales. Cabe destacar que cuentan con 130 vendedores radicados en las distintas zonas geográficas donde la empresa distribuye.

1.4.5 Flota de vehículos.

Cencocal S.A cuenta con una flota compuesta por vehículos con diferentes características operacionales, es decir, distintos rendimientos, capacidades, costos, tiempo de viajes y tiempos de descarga, para atender a los diferentes puntos de venta; este tipo de flota es conocida como “*flota heterogénea*”.

Figura 1.7: Vehículos de la empresa.



Fuente: Elaboración Propia.

La cantidad de vehículos por la cual está compuesta esta flota es de 41 vehículos pesados y 7 transportes menores, los cuales se encargan de abastecer a la totalidad de clientes que tiene la organización. En el anexo 10.1 presenta información con respecto a las características de la flota.

1.4.6 Clientes

El principal tipo de cliente de Cencocal, pertenece al denominado comercio minorista¹, es decir, se centran principalmente en la venta y distribución hacia pequeños locales.

Los clientes están ubicados entre la Región de Atacama y la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, alcanzando un total que sobrepasa los 10.000 clientes. A continuación en la tabla 1.1 se presenta un extracto de la base de datos de los clientes que la empresa nos facilitó:

Tabla 1.1: Muestra de un extracto de datos de los clientes de la Región de Valparaíso.

RUT -NOMBRE	DIRECCIÓN	CIUDAD
11,196,323-1 000 DONAIRE CACERES MANUEL JESUS	C.4#367	CONCON
12,008,085-7 000 AGUILERA LLANO MARCELA ANDREA	CALLE MANIO # 113 PB.VISTA DEL MAR	CONCON
12,103,079-9 000 CORREA TORO FABIOLA JIMENA	LAS ENCINAS 62 POBL, VISTA AL MAR	CONCON
12,145,383-5 000 ROJAS ANABALON JOANNA E.	AV.PIMPINELAS MANZANA 6 CASA 8	CONCON
12,485,206-4 000 HIDALGO GONZALEZ MARCELO	VICUNA MACKENA 687 LOCAL 21	QUILPUE
3,766,760-9 000 VELGAR PONCE ANA ROSA	PEDRO MONTT#1753	QUILPUE
5,146,982-8 000 ARAYA AGUIRRE FRANCISCO MARCIA	PROVIDENCIA#073	QUILPUE
5,354,103-8 000 LOPEZ QUINONEZ PEDRO ISMAEL	CUMMING#956	QUILPUE
5,986,608-7 000 ARAYA PENA JUANA	DR. SALAS 1466	QUILPUE
5,991,893-1 000 ESCALANTE FUENTES SILVIA	LOS CARRERA#878 L.3	QUILPUE
6,163,915-2 000 INOSTROZA OPAZO ESMERALDA.	P NERUDA S/N C CUMMING	QUILPUE
4,402,206-0 000 COLLARTE ARCOS JOSE	ARICA 51 PARAD.2 N.AURORA	VINA DEL MAR
6,635,711-2 000 VEGA OLMOS MARIA DEL CARMEN	C/PRINCIPAL 130 DEP.RECRE	VINA DEL MAR
7,058,686-K 000 ROJAS DALLETTO JULIO RUBEN	PRINCIPAL#167 D.RECREO	VINA DEL MAR
76,586,690-1 000 FAUNDEZ Y ARDILES LTDA.	AV. REPUBLICA 213	LIMACHE
8,533,161-2 001 CABELLO CARTER ROBERTO	LOS DESCUBRIDORES 1059 L-4 V.FUND.C	VALPARAISO
7,544,510-5 000 SALAZAR ESTHER	D.DE ALMAGRO # 798	BELLOTO
6,239,942-2 001 VALENZUELA SALINAS HERNAN	FREIRE#444	PENABLANCA
6,419,566-2 000 FIGUEROA LEIVA ELIANA	BAQUEDANO#415	PENABLANCA
8,647,724-6 000 TAPIA MORALES FELIX EDUARDO	ROMA#480 L.1	VILLA ALEMANA
9,185,638-7 000 ULLOA RODRIGUEZ IVAN	SARGENTO ALDEA 1008	VILLA ALEMANA
9,469,547-3 000 CATALAN NUNEZ RAMON	BAQUEDANO#401 P.BLANCA	VILLA ALEMANA

Fuente: Elaboración Propia.

¹ Minorista: Es la empresa comercial o persona en régimen de autónomo que vende productos al consumidor final. Son el último eslabón del canal de distribución, el que está en contacto con el mercado.

Capítulo II: Descripción del Problema

En este capítulo se identifica y describe el problema a tratar en este trabajo de título. Además se definen los Objetivos y los Resultados esperados.

2. Descripción del problema

2.1 Descripción detallada del sistema bajo estudio

En los puntos anteriores se realizó la descripción general de la empresa, donde se presentó la situación actual desde un enfoque global. En este punto se acotará el análisis de la situación a dos ciudades (Villa Alemana-Quilpué), del total de ciudades que abarca la cobertura geográfica que actualmente tiene la organización. Esto se hizo por petición del Gerente de Operaciones de la empresa, el que considera que es en esas ciudades donde existen mayores problemas con respecto a la distribución de productos.

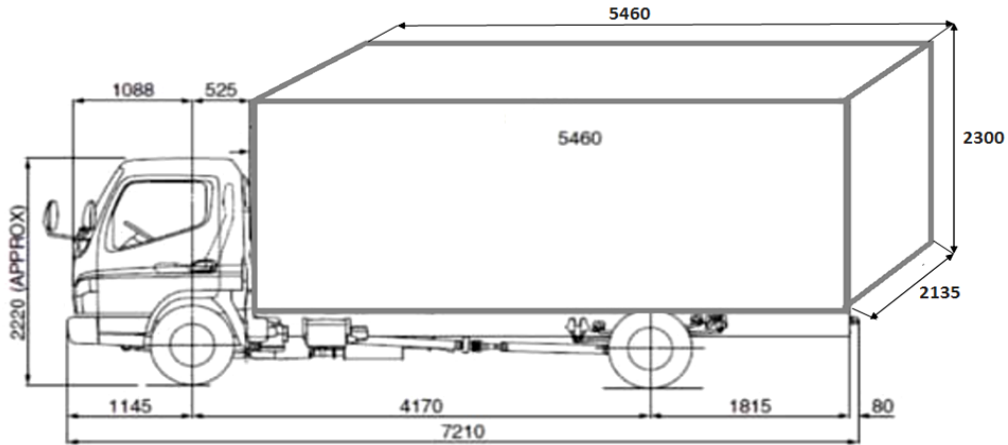
Para el caso de estudio el problema que se aborda es el despacho de productos hacia los clientes de las ciudades de Villa Alemana y Quilpué, desde el Centro de Distribución de Nogales, realizado por una flota de vehículos propios compuesta de 2 camiones (1 vehículo para cada ciudad). Cabe mencionar que no existen ventanas horarias para las entregas.

La cantidad de clientes pertenecientes a las ciudades bajo estudio son 314 en Quilpué y 245 en Villa Alemana.

2.1.1 Vehículos

La empresa para distribuir en las ciudades de Villa Alemana y Quilpué dispone de 2 camiones homogéneos (mismas características operacionales) de Marca Chevrolet, Modelo NPR 4.9. Los vehículos cuentan con carrocería cerrada, con dimensiones de 5,5 metros de largo, 2,1 de ancho y 2,3 de alto; esto indica por lo tanto que el volumen aproximado de la carrocería es de 27 m³. Los vehículos cuentan con una capacidad de carga de 5.000 Kg.

A continuación se presenta una figura donde se pueden apreciar las dimensiones de los vehículos.

Figura 2.1: Vehículo y sus dimensiones.

Fuente: Elaboración Propia

2.1.2 Proceso de despacho

Los vendedores van al sector que les corresponde ese día, toman las notas de ventas² de todos los clientes, éstas son enviadas al centro de distribución en donde se generan las facturas correspondientes a cada pedido. Luego una persona llamada “rutero” toma todas las facturas, y guiándose por la ubicación de cada cliente dentro del sector crea un orden de despacho tratando así de generar la ruta más óptima para ese sector. Por último se procede a estibar³ los camiones y enviarlos a realizar la ruta que les corresponda.

Es necesario mencionar que para el despacho de productos, Cencocal se compromete a entregar el pedido durante cierto día determinado de la semana, independiente de la hora de la entrega, por lo tanto no existen ventanas horarias.

2.1.3 Definición de rutas

Las rutas de Quilpué y Villa Alemana están definidas de la siguiente manera: Se tiene establecida una ruta para cada ciudad por día, es decir, se trabaja con 2 rutas diarias. Entonces al cabo de la semana laboral (lunes a viernes) se realizan 10 rutas distintas entre ambas ciudades, que abarcan la totalidad de los clientes. Las rutas se definen según sectores dentro de

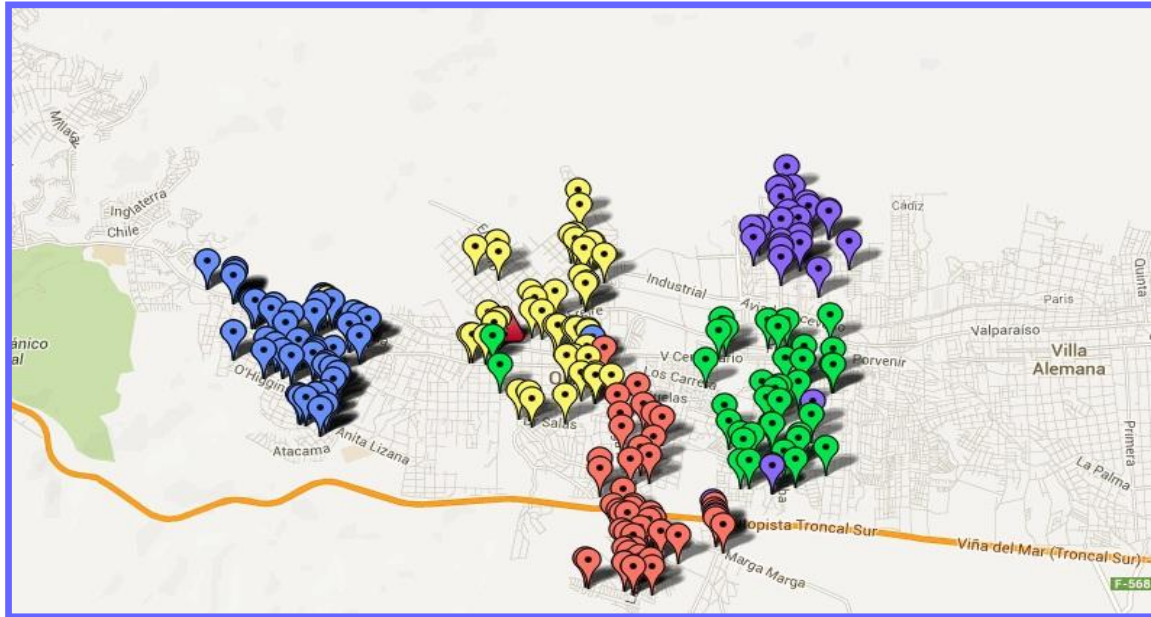
² Notas de venta: Documento comercial en el que el vendedor detalla las mercaderías que ha vendido al comprador, indicando, cantidad, precio, fecha de entrega y forma de pago.

³ Estibar: Colocar la carga a bordo del vehículo para ser transportada, ocupando el mínimo espacio posible, evitando averías en la misma y reduciendo al mínimo las demoras en la operación de descarga.

cada ciudad, un ejemplo podría ser: La Ruta 1, representa el sector centro-sur de Quilpué, mientras que la Ruta 2, representa el sector centro-norte de Quilpué.

A continuación en la figura 2.2 se muestran las 5 rutas definidas para la ciudad de Quilpué, de manera que quede más claro lo dicho en el párrafo anterior.

Figura 2.2: Representación de las rutas de Quilpué.



Fuente: Elaboración Propia, a través de la herramienta Google Maps.

2.2 Detección y cuantificación de problemas

En este trabajo, nos centramos en el estudio del actual sistema de ruteo de la empresa en la distribución de productos desde el centro de distribución ubicado en la localidad de Nogales hacia los clientes de las ciudades de Quilpué y Villa Alemana, para así poder desarrollar una propuesta de mejora del actual sistema de ruteo.

2.2.1 Problemas en la actualidad

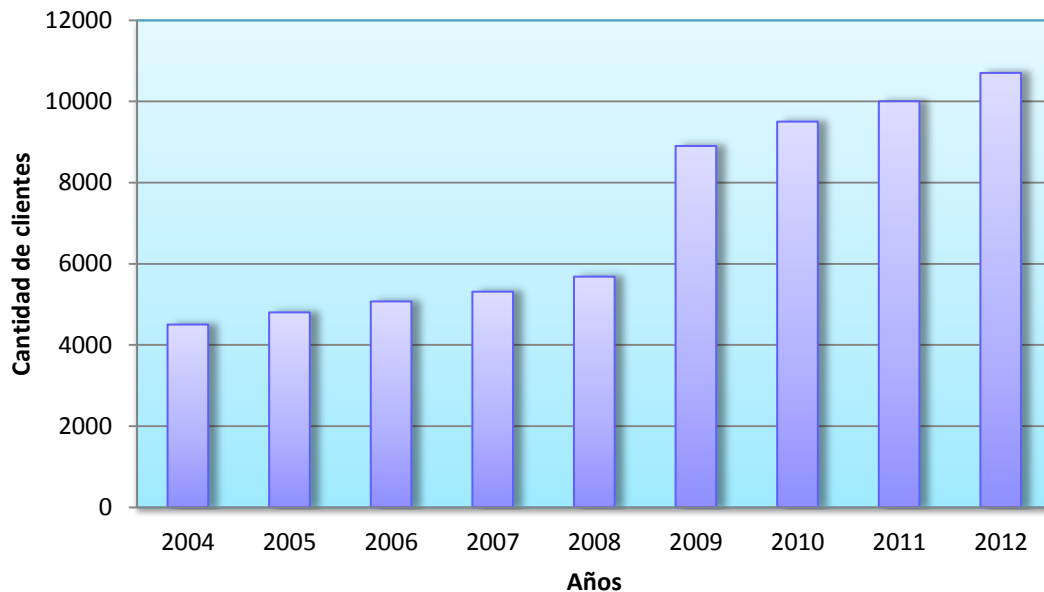
Como ya se explicó en el proceso de despacho, existe una persona encargada de generar las rutas de manera manual, es decir, existe un tomador de decisiones en cuanto a las rutas de los vehículos que sirven a sus clientes. Esta persona (llamado rutero) debe decidir en

qué orden se realizará el despacho. Cabe destacar que ha este proceso de creación de la ruta no se le dedica más de una hora.

Este mecanismo para rutear fue efectivo durante varios años, pero en los últimos 3 años se ha producido un crecimiento de la empresa debido principalmente a los proyectos adquiridos el año 2009 con las empresas Watts y Unilever, lo que se ha traducido en un aumento en el número de clientes, dificultando la determinación de rutas por parte del rutero en los últimos años.

A continuación se presenta un gráfico generado a partir de la información proporcionada por el “Gerente de Ventas” de Cencocal, Don Oscar Retamal, en donde se presenta el crecimiento de la empresa en cuanto al número de clientes. Este gráfico toma datos desde el año 2004, hasta el año 2012.

Figura 2.3: Gráfico que ilustra el aumento de la cantidad de clientes desde el 2004, hasta el 2012.



Fuente: Elaboración Propia, en base a información proporcionado por Cencocal.

El determinar las rutas de manera manual (en los últimos años), trajo una serie de consecuencias, que se mencionan a continuación:

- Elevados costos en combustibles: El costo en combustible es un factor muy importante para las finanzas de la empresa, sobre todo en el caso de una empresa que tiene como giro la “distribución de productos”, por lo tanto para el caso de Cencocal, es de suma

relevancia mantener estos costos dentro de ciertos límites fijados entre un 40% y un 45% de los costos variables de distribución. En los últimos 3 años estos costos han excedido por mucho los límites establecidos, alcanzando incluso el 55% de los costos totales de distribución.

- La empresa al tener una gran cantidad de clientes localizados en las ciudades de Quilpué y Villa Alemana, hace que muy compleja la correcta determinación de la ruta. En la empresa ésta es una decisión que se toma muy rápidamente, sin mayor análisis, por lo que muchas veces la decisión que se toma no es la mejor.
- La alta exigencia de nivel de servicio por parte del mercado: En el rubro de la distribución es sumamente importante que se cumpla con los despachos acordados para un día en particular, para así entregar un servicio que cumpla 100% las expectativas de los clientes. Es por esta razón que es fundamental la optimización de las rutas de distribución para poder cumplir con todas las entregas solicitadas. Tema que en la actualidad no se está cumpliendo al 100% en la empresa.

Haciendo un recuento de la información, se tiene que el problema a resolver por parte del rutero es:

Determinar el problema de ruteo de vehículos, utilizando una flota homogénea de vehículos en capacidad, costos fijos y costos variables, minimizando los costos de transporte y satisfaciendo las siguientes restricciones:

- ✓ Cada pedido debe ser entregado el día acordado
- ✓ Cada cliente debe ser atendido por un solo vehículo

Resulta evidente que las decisiones en cuanto a la optimización del ordenamiento de las rutas para cada vehículo no es sencilla y menos aun si tomamos en cuenta las restricciones anteriormente señaladas.

En efecto, las decisiones de ruteo como muchas otras en el campo operacional, tienen muchas combinaciones posibles. De este modo, las decisiones manuales basadas en buenos criterios y experiencia han mostrado que no pueden explorar una amplia gama de combinaciones, y generalmente no se consiguen soluciones eficientes por este medio. Por ello es recomendable analizar las opciones que se encuentran en la amplia bibliografía existente sobre este tipo de problema, para así encontrar la herramienta que entregue la mejor solución adaptada a las características del problema.

A continuación se presenta una tabla con las diferentes causas de los problemas de la empresa y el por qué se originan:

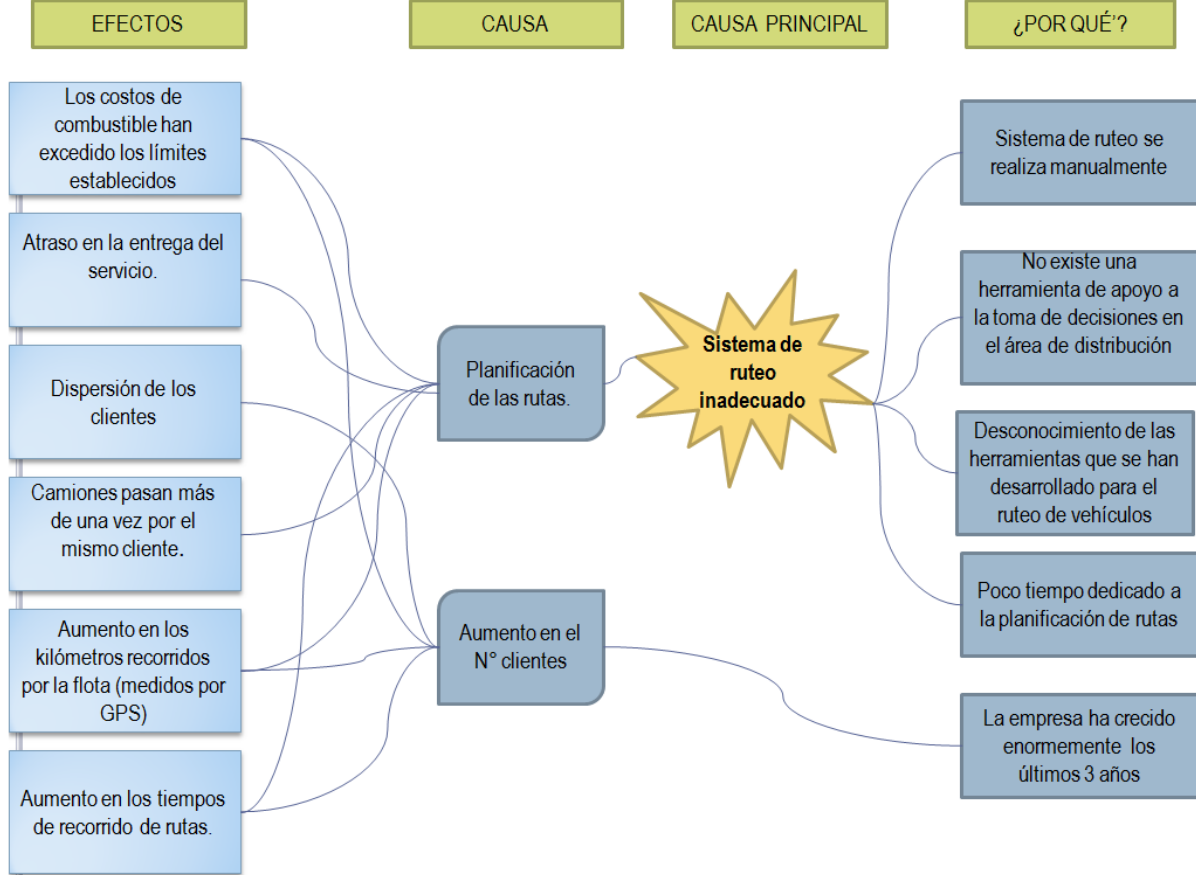
Tabla 2.1: Problemas originados en el sistema actual de rutas.

EFECTO	SUBCAUSA	CAUSA PRINCIPAL	¿POR QUE?
<p>Los costos de combustible han excedido los límites establecidos por la empresa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de las rutas. • Aumento en el número de clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Ruteo inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de ruteo se realiza manualmente. • Desconocimiento de las herramientas que se han desarrollado en los últimos años para el problema de ruteo de vehículos. • No existe una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el área de distribución • Poco tiempo dedicado a la planificación de rutas • La empresa ha crecido enormemente en los últimos 3 años.
<p>Atraso en la entrega del servicio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de las rutas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Ruteo inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de ruteo se realiza manualmente. • Desconocimiento de las herramientas que se han desarrollado en los últimos años para el problema de ruteo de vehículos. • No existe una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el área de distribución • Poco tiempo dedicado a la planificación de rutas
<p>Dispersión de los clientes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en el número de clientes. 		<ul style="list-style-type: none"> • La empresa ha crecido enormemente en los últimos 3 años.
<p>Camiones pasan más de una vez por el mismo cliente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de las rutas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Ruteo inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de ruteo se realiza manualmente. • No existe una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el área de distribución. • Desconocimiento de las

			herramientas que se han desarrollado en los últimos años para el problema de ruteo de vehículos.
Aumento en los kilómetros recorridos por la flota (medidos por GPS)	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación de la ruta. • Aumento en el número de clientes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Ruteo inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de ruteo se realiza manualmente. • No existe una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el área de distribución • Desconocimiento de las herramientas que se han desarrollado en los últimos años para el problema de ruteo de vehículos. • Poco tiempo dedicado a la planificación de rutas • La empresa ha crecido enormemente en los últimos 3 años.
Aumento en los tiempos de recorrido de rutas.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en el número de clientes. • Planificación de la ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Ruteo inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • La empresa ha crecido enormemente en los últimos 3 años. • No existe una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en el área de distribución • Desconocimiento de las herramientas que se han desarrollado en los últimos años para el problema de ruteo de vehículos. • Poco tiempo dedicado a la planificación de rutas

Fuente: Elaboración propia

Figura 2.4: Esquema que representa las principales causas del problema de transporte.



Fuente: Elaboración Propia

En base al esquema que se presenta en la figura 2.4, se puede llegar a la conclusión que la mayor parte de los efectos indeseables son consecuencia de que el actual sistema de ruteo es inadecuado. Por ello es de suma importancia realizar una mejora al actual sistema de la organización con el fin de reducir dichos efectos indeseables.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejora del sistema de distribución operacional a través de una herramienta computacional que apoye la toma de decisiones del proceso de ruteo de vehículos, con el fin de encontrar la asignación de ruta que permita reducir al mínimo los costos de transporte asociados.

2.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar información del área logística de la empresa, para poder comprender el actual sistema de ruteo de la compañía.
- Analizar los diferentes modelos matemáticos de investigación de operaciones y las diferentes herramientas de ruteo para la aplicación y solución del modelo.
- Aplicar un modelo matemático que represente claramente la operación de transporte en las ciudades de Quilpué y Villa Alemana
- Analizar y validar los resultados obtenidos.

2.4 Resultados esperados

- Disminuir los costos de operación del servicio de transporte a través de un modelo que genere una ruta de entrega de los productos a los respectivos clientes.
- Disminución de la incertidumbre del área de logística en la Empresa debido al incumplimiento en la entrega de pedidos a los clientes.
- Sugerencia de la ruta que podrá seguir el conductor, sin que tenga que estar preocupado de cuál es la ruta que debiese tomar desde un destino a otro para cumplir los objetivos propuestos.

Capítulo III: Marco Teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos en los cuales se sustenta el tema de esta memoria para resolver el problema que presenta la empresa.

3. Marco Teórico

3.1 Introducción

En la actualidad la Logística de Distribución se ha ido haciendo cada vez más importante, esto debido a que un buen manejo de los productos hacia los clientes conlleva a ahorros económicos importantes para las organizaciones como también conlleva la satisfacción del cliente. Es por ello que diferentes ámbitos de estudios se han dedicado a estudiar las actividades que pueden ser mejoradas en la logística de distribución. Uno de ellos corresponde al ruteo de vehículos, en donde la investigación de operaciones propone diferentes modelos matemáticos para resolver este tipo de problemas, pero el más general y del cual se derivan todos los demás modelos, es conocido como *Traveling Salesman Problem (TSP)* [Viena & Harvard, 30], en donde un vehículo parte de un depósito y visita diferentes ciudades y vuelve al mismo depósito.

Así como existen varios modelos matemáticos, también encontramos diferentes métodos de solución a éstos. Por una parte se encuentran los denominados algoritmos exactos que se ocupan generalmente en problemas pequeños, y por otro lado se encuentran los denominados algoritmos aproximados, los cuales se dividen a su vez en dos grupos: las y las metaheurísticas.), los cuales al programarlos en una computadora, entregan una solución aceptable de la ruta que debe seguir el vehículo.

Por otra parte gracias a la evolución que ha tenido la tecnología en los últimos años, se han desarrollado diferentes *software* de apoyo a la toma de decisiones con respecto a los problemas de ruteo de vehículos, estos permiten en poco tiempo hacer cálculos exactos sobre la ruta óptima que se debiese seguir, según la ubicación de los clientes dentro de un sector predeterminado. Estas herramientas ocupan algoritmos avanzados para la resolución del problema, en donde lo único que se debe hacer es programar el modelo matemático en el *software*.

3.2 Cadena de suministro

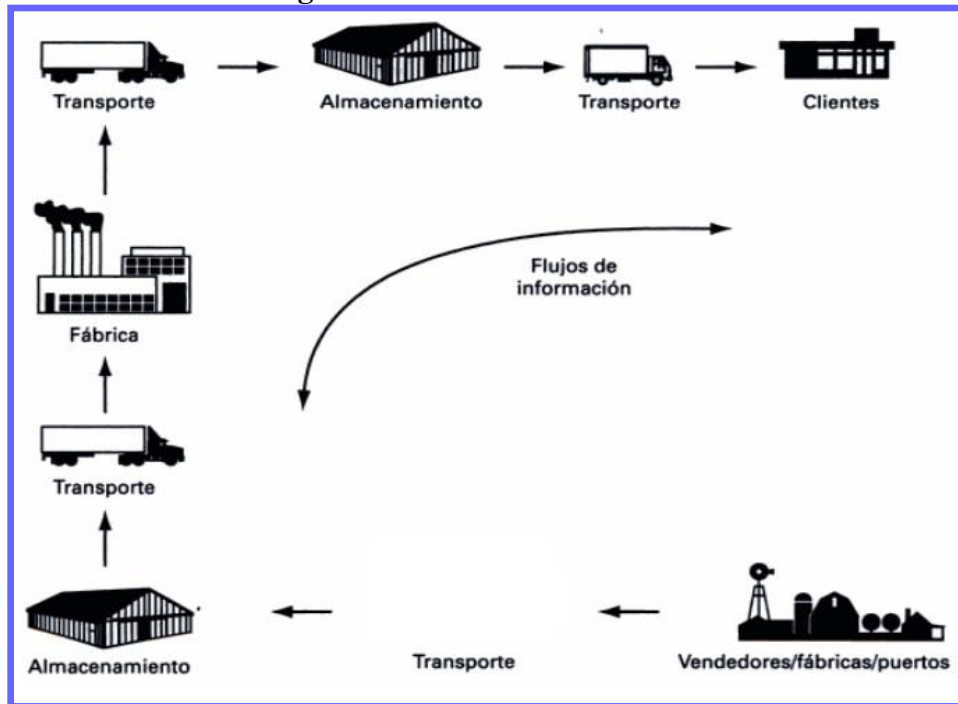
La cadena de suministro corresponde a la integración de empresas comprendidas por proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores (mayoristas o detallistas) coordinados eficientemente por medio de relaciones de colaboración en sus procesos clave para colocar los requerimientos de insumos o productos en cada eslabón de la cadena en el tiempo preciso al menor costo, buscando el mayor impacto en la cadena de valor de los integrantes con el propósito de satisfacer los requerimientos de los consumidores finales.

Aunque estrictamente no es una cadena, sino una red, la estructura de la cadena de suministro son todas las empresas que participan en una cadena de producción y servicios desde las materias primas hasta el consumidor final. Por ello podemos identificar los principales elementos que componen la cadena de suministro:

- Proveedores: Son los encargados de abastecer a las empresas de materias primas, materiales e insumos, necesarios para que esta última elabore sus productos o realice sus servicios.
- Centro de producción o fábrica: Corresponde al lugar donde se les añade valor a las entradas (materias primas, materiales, insumos), es decir, donde se generan salidas (bienes y servicios) a partir de los factores de producción, (tierra, trabajo, capital,) con la finalidad de que sean adquiridos o consumidos por las familias (unidades de consumo) y satisfagan las necesidades que éstos presentan.
- Almacenes centrales: Corresponde al lugar donde son almacenados los productos que se elaboran en los centros de producción. Para luego despachar los bienes a los almacenes locales o directamente hacia los clientes, todo dependerá de la cobertura geográfica de la organización.
- Almacenes locales y/o regionales: En algunos casos las organizaciones deben tener más almacenes aparte de un almacén central (diferentes hábitos de consumo entre zonas, extensión del territorio de atención, entre otras). Para estos casos se construyen o arriendan almacenes regionales. En algunos casos estos almacenes también realizan venta a clientes.
- Puntos de ventas: Lugar físico donde se venden los productos elaborados por la empresa.
- Clientes: Destinatarios finales de los productos elaborados en los centros de producción.

A continuación se presenta en la figura 3.1 la cadena de suministro:

Figura 3.1: La cadena de suministro.



Fuente: Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. México: Prentice Hall. Pearson Educación

3.3 Logística: Definición

El término “logística” frecuentemente se asocia con la distribución y transporte de productos terminados; sin embargo, ésta es una apreciación parcial de la misma, ya que la logística es un concepto más amplio que se relaciona con la administración del flujo de bienes y servicios, desde la adquisición de las materias primas e insumos en su punto de origen, hasta la entrega del producto terminado en el punto de consumo. Cabe destacar que el término logística ha sido estudiado por diferentes autores, es por ello que podemos encontrar diferentes definiciones con sutiles diferencias con respecto a otros escritores. Por tal razón a continuación se presentan distintos puntos de vista del término logística:

“La logística es todo movimiento y almacenamiento que facilite el flujo de productos desde el punto de compra de los materiales hasta el punto de consumo, así como los flujos de información que se ponen en marcha, con el fin de dar al consumidor el nivel de servicio adecuado a un costo razonable” (Ballou, 2004)

“La logística se refiere a la responsabilidad de diseñar, y administrar sistemas de control de movimiento y posicionamiento geográfico de materias primas, producto en proceso y producto terminado al mínimo costo total” (Bowersox, 2006)

“La Logística es aquella parte de la gestión de la Cadena de Abastecimientos que planifica, implementa y controla el flujo -hacia atrás y adelante- y el almacenamiento eficaz y eficiente de los bienes, servicios e información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los consumidores” (Council of Supply Chain Management Professionals, 2008)

Como hemos visto existen diferentes definiciones del término “logística”, pero en síntesis podemos decir que la *logística es la parte de la cadena de suministros que planifica, implementa y controla el flujo efectivo y eficiente; el almacenamiento de artículos y servicios y la información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de destino con el objetivo de satisfacer las necesidades de los clientes*. Por esta razón la logística se convierte en uno de los factores más importantes de competitividad, ya que, puede decidir el éxito o fracaso de la comercialización de un producto.

3.3.1 Importancia de la logística.

Las actividades de almacenamiento y los traslados innecesarios de materias primas, materiales, productos en proceso y productos finales, son actividades que generan un gran porcentaje de los costos, por ende, no agregan valor para el cliente. Es tarea de la logística eliminar todas aquellas actividades que comprometen costos sin agregar valor, con el fin de aumentar la eficiencia del sistema y ofrecer una rápida velocidad de respuesta a los requerimientos de los clientes, este último punto tiene especial importancia ya que cualquiera de las ventajas que una empresa pueda llegar a tener (Ejemplos: superioridad tecnológica o excelencia de sus recursos humanos), pierden su valor si el servicio no está disponible en el momento exacto en que los consumidores lo requieren. Por ello la velocidad de llegada al mercado, esto es, la rapidez de respuesta por parte de la empresa a los requerimientos de los clientes, se convierte entonces en una herramienta indispensable para crear valor y lograr una buena posición en la carrera de la competencia.

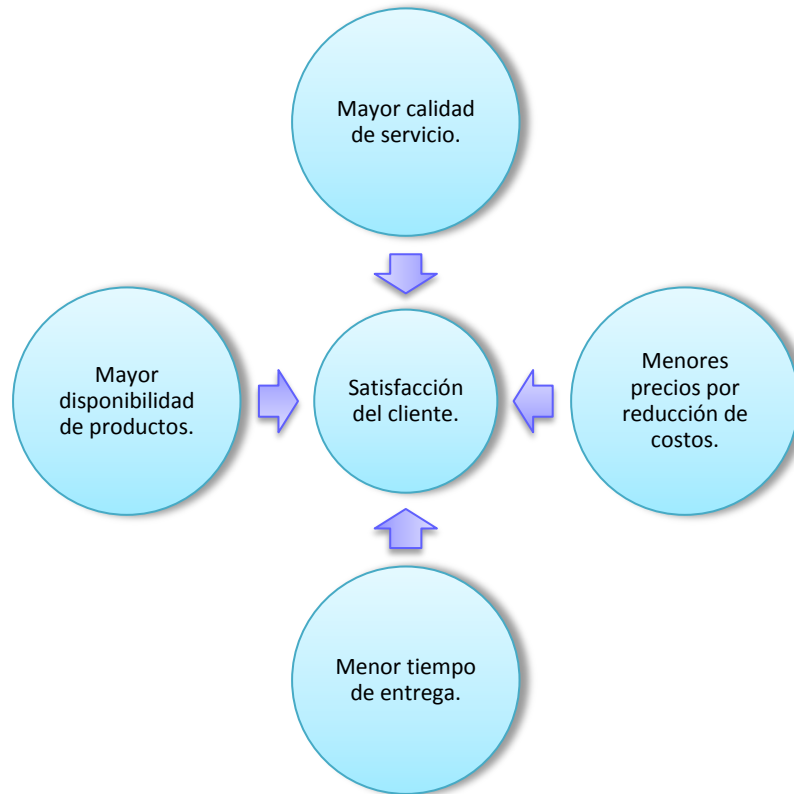
En base a lo anterior la importancia de la logística radica principalmente en *la satisfacción del cliente*, mejorando los precios, calidad y tiempos de entrega del producto o servicio. Como también se traducen en los siguientes beneficios para la empresa:

- Incrementar y mejorar la rentabilidad de la empresa.
- Coordinación óptima de todos los factores que influyen en la decisión de compra: calidad, confiabilidad, precio, empaque, distribución, protección, servicio.

- Entregar el producto al cliente en el tiempo y en la forma adecuada, al menor costo posible.

A continuación en la figura 3.2 se presenta de forma ilustrativa la importancia de la logística:

Figura 3.2: Importancia de la logística para la empresa.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Niveles de planeación logística

La planeación logística trata de responder a las preguntas qué, cuándo y cómo, y tiene su lugar en tres niveles: estratégica, táctica y operativa. La principal diferencia entre ellas es el horizonte de tiempo para la planeación. La *planeación estrategia* se considera de largo alcance, donde el horizonte de tiempo es mayor de un año. La *planeación táctica* implica un horizonte de tiempo intermedio, por lo general menor de un año. La *planeación operativa* es una toma de decisiones de corto alcance, son decisiones que con frecuencia se toman sobre la base de cada hora o a diario. La cuestión es cómo mover el producto de manera efectiva y eficiente a través del canal de logística estratégicamente planeado. A continuación en la tabla 3.1 se presentan diferentes ejemplos de tipos de decisiones que se deben tomar en cada uno de estos niveles mencionados anteriormente.

Tabla 3.1: Áreas de Decisión de la Logística.

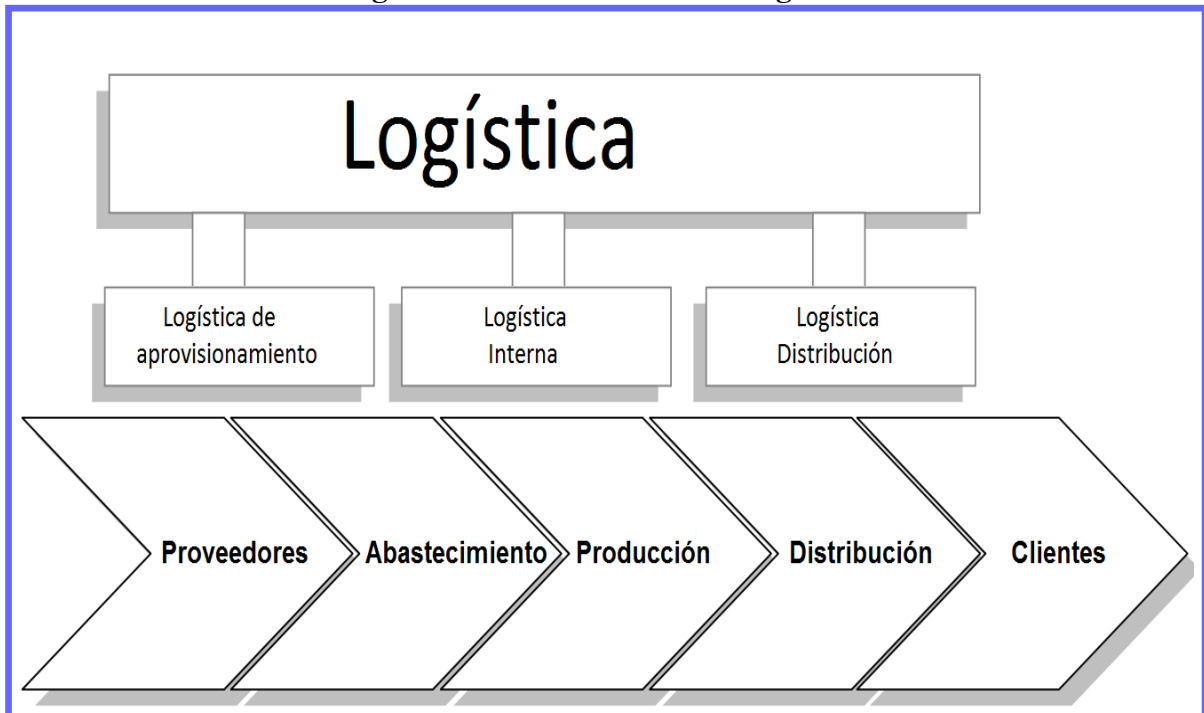
Áreas de decisión	Estratégica	Táctica	Operativa
Ubicación de instalaciones	Numero, tamaño y ubicación de almacenes, plantas y terminales.		
Inventarios	Ubicación de inventarios y políticas de control.	Niveles de inventario de seguridad.	Cantidades y tiempos de re abastimiento.
Transportación	Selección del modo.	Arrendamiento estacional de equipo.	<u>Asignación de ruta, despacho.</u>
Procesamiento de pedidos	Ingreso de pedidos, transmisión y diseño del sistema de procesamiento.		Procesamiento de pedidos, cumplimiento de pedidos atrasados.
Servicio al cliente	Establecimiento de estándares.	Reglas de prioridad para pedidos de clientes.	Aceleración de entregas.
Almacenamiento	Manejo de la selección de equipo, diseño de la distribución.	Opciones de espacio estacional y utilización de espacio privado.	Selección de pedidos y reaprovisionamiento.
Compras	Desarrollo de las relaciones proveedor-comprador.	Contratación, selección de vendedor, compras adelantadas.	Liberación de pedidos y aceleración de suministros.

Fuente: Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. México: Prentice Hall. Pearson Educación

3.3.3 Estructura del sistema logístico

Un sistema logístico está formado tres eslabones principales como lo son: logística de aprovisionamiento (relación entre la empresa y sus proveedores), logística interna (relaciones entre las instalaciones de la empresa) y logística de distribución (relación entre la empresa y sus clientes). A continuación en la figura 3.3 se presenta de forma ilustrativa los pilares de la logística.

Figura 3.3: Subsistemas de la logística



Fuente: Elaboración Propia.

Claramente las organizaciones deben gestionar adecuadamente estos tres pilares para satisfacer de la mejor forma posible las necesidades de sus clientes, pero cabe recalcar, que las empresas le dan mayor importancia a ciertos eslabones dependiendo de las características de cada organización. Para el caso de Cencocal, el principal subsistema que es de mayor importancia corresponde a la logística de distribución debido a la actividad que realiza la empresa y es en el cual se centrará el trabajo de título más adelante.

3.3.3.1 Logística de aprovisionamiento.

La Logística del aprovisionamiento se ocupa del proceso de adquisición y almacenamiento de productos que pueden ser materias primas, materiales, partes, piezas, entre otros, desde los proveedores hasta el comienzo del proceso productivo en empresas productivas. Debe tenerse en cuenta que en empresas puramente comerciales también se presenta y con gran fuerza el aprovisionamiento, lo que en estos casos generalmente se trata de la adquisición de productos terminados que se utilizan para satisfacer las necesidades del cliente final. Por lo tanto es una función que abarca tres áreas: Compras, almacenamiento y gestión de inventarios; destinada a poner a disposición de la empresa todos los productos, bienes y servicios del exterior que son necesarios para su funcionamiento.

Para cumplir estas funciones es necesario realizar las siguientes actividades:

- Prever las necesidades de la empresa.
- Planificarlas en el tiempo.
- Expresarlas en términos adecuados desde el punto de vista descriptivo en forma cuantitativa y cualitativa.
- Buscar en el mercado los productos que las satisfacen
- Adquirir los productos.
- Asegurarse que son recibidos en las condiciones demandadas.
- Pagar los productos adquiridos.

La función de aprovisionamiento es clave dentro de la actividad empresarial, constituyendo además una función compleja. Esta complejidad se deriva lógicamente de la naturaleza y diversidad de los productos o servicios objeto de adquisición, sin olvidar otros aspectos fundamentales como: la necesidad de adaptarse a un entorno económico altamente cambiante motivado por la globalización de los mercados, las variaciones cualitativas y cuantitativas de la demanda de los productos, la escasez de capitales y el crecimiento de los costos financieros, así como los cambios tecnológicos y el constante incremento de las exigencias de calidad.

3.3.3.2 Logística interna

La Logística Interna agrupa las actividades que ordenan los flujos de información y materiales, coordinando recursos y demanda para asegurar un nivel determinado de servicio al menor costo posible, es decir, comprende todas aquellas actividades para la transformación de las materias primas, piezas y partes en productos intermedios o terminados y su posterior almacenamiento.

Dentro de las principales actividades internas se pueden mencionar:

- Almacenamiento interno: Comprende cualquier tipo de almacén, en donde principalmente su función es abastecer y regular producción de manera constante.
- Transporte interno: Dentro de transportes se consideran los montacargas o cualquier vehículo interno que lleve los elementos necesarios al sitio y en el momento en donde se requiera para producir.
- Mantenimiento Interna: Se enfoca principalmente en el abastecimiento a las estaciones de trabajo agrupando cualquier tipo de operación que requiera mantenimiento como el transporte y almacenaje.
- Información y Comunicación: La comunicación interna es muy necesaria debido a los sistemas aplicados dentro de las estaciones de trabajo, pero estos sistemas a su vez nos ofrecen información más confiable a menor tiempo y es posible obtener información y comunicación independiente.
- Mantenimiento Interno: Este se compone del control, revisión y reparación de las estaciones de trabajo y este debe ser rápido y sin mover a los operarios de sus lugares de trabajo.

3.3.3.3 Logística de distribución

El último sub sistema de la logística corresponde a la distribución de productos. El cual comprende las actividades de despacho y distribución de los productos terminados a los diferentes clientes, es decir, es acercar el producto al consumidor para que este lo pueda adquirir fácilmente cuando lo desee.

La distribución de productos supone un conjunto de decisiones complejas e interrelacionadas que requieren una adecuada planificación. El funcionamiento efectivo puede ser un factor esencial para mantener una ventaja competitiva, sobre todo en empresas que llevan a cabo una distribución intensiva. Es en este eslabón de la logística en donde nos centraremos debido a que Cencocal se dedica a la distribución de productos terminados, por ende, es aquí donde se centra todo su actuar como organización.

En el proceso de distribución se deben considerar las características del producto que se desea distribuir, el tiempo de vida del producto, la forma de cómo se acomodara dentro del vehículo de transporte, como también algunas características especiales para que el producto se conserve de buena forma (temperatura, fragilidad, empaques especiales etc.). Por otra parte para muchos productos, el grupo mayor de los costos operativos es el relativo a los de la distribución física, mientras que para otros productos estos costos alcanzan tanto como la mitad del precio de mayoreo cuando se realizan actividades de transporte y almacenamiento. La distribución implica la planeación *óptima de transporte y de las rutas*, para llegar con el producto a los clientes, de tal forma de minimizar costos y asegurar que la mercadería llegue en buen estado hacia el consumidor.

La tarea de distribución la podemos dividir en cinco etapas:

- *Establecer el sistema de almacenamiento:*
Este punto hace referencia a conseguir que los materiales o productos para el proceso que realiza la empresa (sea productiva o comercial de distribución), estén disponibles en el momento apropiado. Una función de los almacenes es la de dar una solución a la incertidumbre que provocan las previsiones, así como eliminar las tensiones en la cadena de suministro.
- *Mantener un sistema de control de inventarios:*
Su función radica en controlar el movimiento (entrada y salida) de productos para mantener un registro en los flujos de ventas o producción.
- *Establecer procedimientos para tramitar los pedidos:*
Además del flujo de materiales existe un segundo flujo de información que circula en sentido contrario. Es por ello que a través de estos procedimientos, se lleva la

información del consumidor a la empresa que suministra los productos, con el fin de satisfacer las necesidades del cliente. Por lo tanto de la agilidad, exactitud y gestión del flujo de información depende en gran medida la rapidez y eficiencia de la logística de materiales.

- *Establecer el sistema de manejo de materiales:*

Es donde se le da un tratamiento específico a los productos, como envasado, agrupación, etc. Entre las manipulaciones más complejas de mercancía encontramos las siguientes:

Recogida de pedidos: Según la cantidad y complejidad de los pedidos que recibe la empresa, se deberá hacer un mayor esfuerzo de diseño que busque el equilibrio entre la inversión en equipos y almacén y el coste de la mano de obra. Entre las soluciones con mayor esfuerzo inversor está el uso de almacenes automáticos con gestión informática de los pedidos que requieren el menor uso de mano de obra y el mejor aprovechamiento del metro cubico de almacén.

Empaquetado: El empaquetado de las mercancías tiene varias funciones como protección contra pequeños golpes, contra inclemencias del tiempo o contra la suciedad. También sirve como precinto que garantice la integridad del envío hasta el cliente o como apoyo de la imagen del proveedor.

- *Sistema de transporte:*

En los negocios con gran complejidad logística, el costo de transporte está directamente relacionado con los costos finales de venta del bien, por lo cual, su gestión será sumamente importante para la rentabilidad de la empresa. Claramente en una empresa de distribución como Cencocal, se les debe prestar una mayor importancia al sistema de transporte con el fin de mantener controlados sus costos de operación, de tal forma de satisfacer las necesidades del cliente.

Dentro de la gestión del transporte se deben considerar los siguientes aspectos:

- Selección de rutas.
- Búsqueda y selección de las mejores ofertas.
- Trazado de las rutas.
- Ordenar y dirigir las expediciones.
- Negociación de las reclamaciones por pérdidas o daños.
- Comprobación de las facturas de los transportes.

Como hemos visto en la distribución de productos, la administración trata con un gran número de variables que son mensurables con facilidad. Tales problemas conducen por sí mismos a soluciones a través de técnicas estadísticas y matemáticas, las cuales serán explicadas en algunos puntos posteriores.

3.4 Modelos de investigación de operaciones para la optimización de rutas distribución

El problema de la optimización de rutas de distribución es uno de los problemas más comunes en la optimización de operaciones logísticas y por ende uno de los más estudiados. El planteamiento inicial del problema consiste en buscar la solución más óptima con diversos parámetros proporcionados por el usuario como por ejemplo el número de vehículos, la capacidad de los vehículos, lugares a visitar (clientes) y su demanda. El desarrollo de soluciones al problema de planeación de rutas en el área de operaciones logísticas ha sido de gran ayuda a la hora de hacer planeaciones de tiempo, distancias e inversión.

Los problemas más conocidos en el ámbito de la planeación de rutas son: El Problema del agente viajero –*Travel Salesman Problem* (TSP) y El Problema de ruteo de vehículos – *Vehicle Routing Problem* (VRP), para los cuales se han desarrollado diversos algoritmos que buscan una solución óptima con el menor costo computacional asociado.

Estos modelos se deben utilizar según el tipo de ruta que se desea seguir para un determinado proceso. Existen aplicaciones que mezclan estos 2 modelos, agregando otros indicadores a la operación, tales como: capacidad de carga, ubicación por GPS y consumo de combustible entre otros.

3.4.1 El Problema del agente viajero (Travelling Salesman Problem –TSP) [Viena & Harvard, 30]

El Problema del agente viajero es sin duda alguna, el problema de optimización combinatoria más estudiado y del cual más se conoce. En el TSP se dispone de un solo vehículo que debe visitar a todos los clientes en una sola ruta y a costo mínimo. No suele haber un depósito (y si lo hubiera no se distingue de los clientes), no hay demanda asociada a los clientes y tampoco hay restricciones temporales. En la figura 3.4 se presenta el aspecto de una solución a un problema TSP.

De manera informal, una buena forma de describir el TSP sería:

“Búsqueda de la ruta más corta de un viajero que comienza su viaje en una ciudad de origen, visita un conjunto prescrito de ciudades y vuelve a la ciudad de partida”⁴

De lo anterior se puede deducir que la distancia recorrida en el viaje va depender del orden en que se visiten las ciudades, por lo tanto lo que se debe hacer es buscar el orden óptimo de visita a las ciudades, considerando que cada ciudad obviamente sea visitada solo una vez.

La formulación matemática de este problema es la siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i,j} X_{i,j} * C_{i,j} \quad \text{Funcion objetivo}$$

$$\sum_i X_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1 \dots n \quad \text{Restrición 1.1}$$

$$\sum_j X_{i,j} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad \text{Restrición 1.2}$$

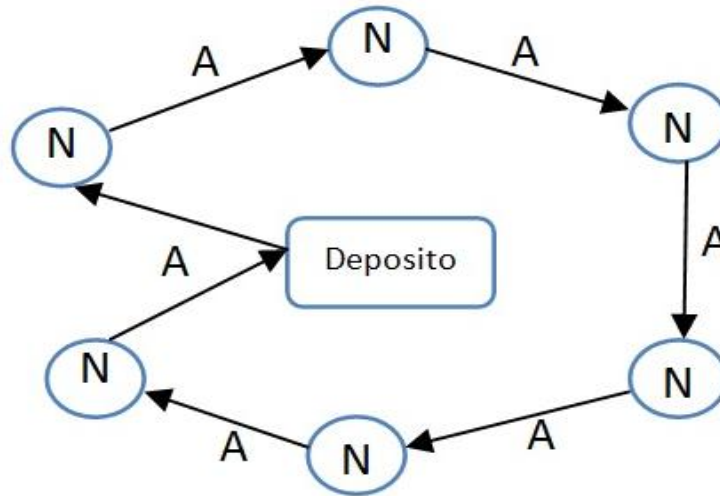
$$\sum_{i \in S, j \in S: i \neq j} X_{i,j} \leq |S| - 1; \quad \forall S \subset N: 2 \leq |S| \leq |N| - 1 \quad \text{Restricción 1.3}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N: i \neq j$$

Las variables X_{ij} indican si el arco (i,j) es utilizado en la solución. La función objetivo (1) indica que el costo total de la solución es la suma de los arcos utilizados. Las restricciones (1.1) y (1.2) indican que la ruta debe llegar y abandonar cada nodo exactamente una vez. Y la restricción (1.3) indica que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez.

⁴ Duarte Muñoz A. (2007) Libro “Metaheurísticas”. Librería-Editorial Dykinson,

Figura 3.4: Aspecto de una solución al problema del TSP



N= Nodos A=Arcos

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.1 TSP, en Teoría de Grafos

Para las matemáticas y las ciencias de la computación, un grafo es el principal objeto de estudio de “La Teoría de Grafos”. Un grafo se representa gráficamente como un conjunto de puntos (llamados nodos), unidos por líneas (aristas). Los grafos permiten estudiar las interrelaciones entre unidades que se encuentran en interacción.

Dentro de la “Teoría de Grafos”, existe un término importante, que es necesario definir para la correcta comprensión de la teoría, y para entender la relación de esta con los modelos de investigación de operaciones. Este término es “ciclo hamiltoniano”, el cual corresponde a una sucesión de aristas adyacentes, donde no se recorre dos veces la misma arista y se debe regresar al punto inicial y además, se tiene que recorrer todos los vértices exactamente una vez (excepto el vértice del que parte y al cual llega). Por ejemplo, en un museo grande, lo idóneo sería recorrer todas las salas una sola vez, esto es buscar un ciclo hamiltoniano en el grafo que representa el museo (los vértices son las salas, y las aristas los corredores o puertas entre ellas).

El problema del TSP, puede ser descrito según la teoría de grafos como un ciclo hamiltoniano de la siguiente manera: Sea $G = \{V, A\}$, un grafo completo, donde $V = 1, \dots, n$ es el conjunto de vértices y A es el conjunto de arcos. Los vértices $i=2, \dots, n$ se corresponden con los clientes a visitar y el vértice 1 es la ciudad de origen y destino. A cada arco (i, j) se le asocia un valor no negativo C_{ij} , que representa el coste de viajar del vértice “ i ” al “ j ”. El uso de los arcos (i, i) , no está permitido, por lo que impone $C_{ij}=\infty$ para todo $i \in V$. El TSP consiste

en determinar el ordenamiento de la ruta con costo total mínimo, comenzando y terminado en el vértice I , tal que cada vértice $V_{ij} \in V'$ se visite exactamente una vez por el vehículo.

3.4.1.2 Variaciones del TSP

Existe una gran cantidad de versiones diferentes del TSP, dentro de las cuales podemos mencionar algunas, como las siguientes:

- TSP simétrico (Symmetric TSP)
- TSP Máximo (Max TSP)
- TSP con cuello de botella (Bottleneck TSP)
- TSP con Múltiples Visitas (TSP with Multiple Visits)
- TSP Agrupado (Clustered TSP)
- TSP dinámico (Dynamic TSP)

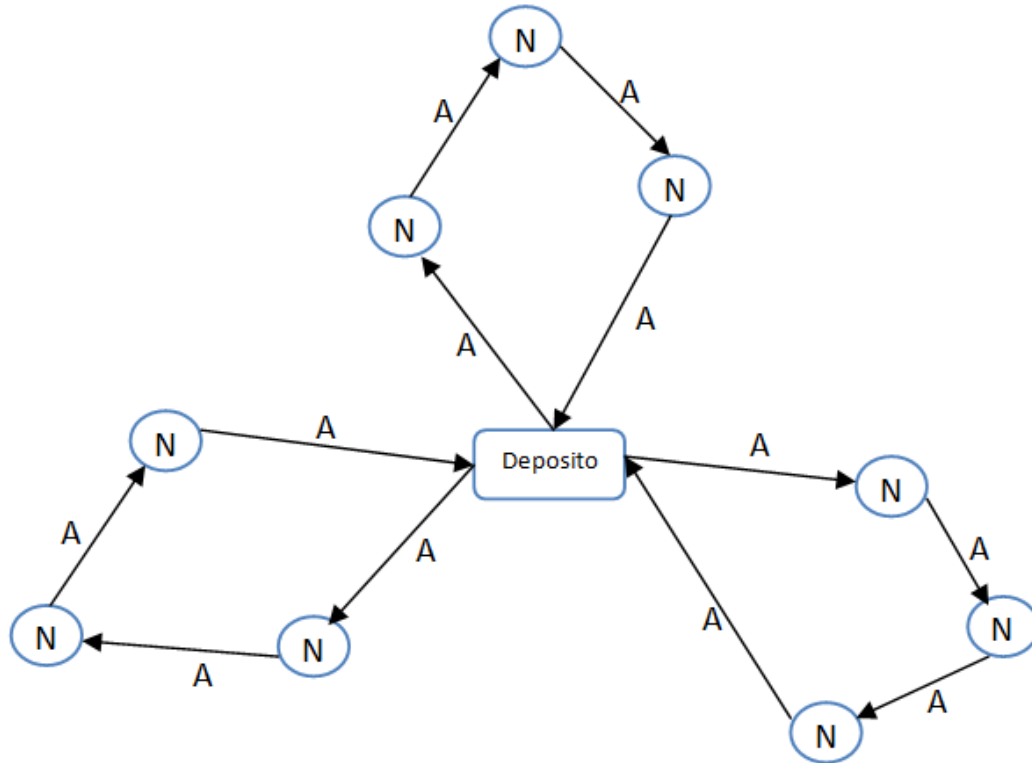
3.4.2 VRP (Vehicule Routing Problem) o Problema de ruteo de vehículos [Dantzig & Ramser, 59]

El origen del Problema de ruteo de vehículos nace como una generalización del Problema del Agente Viajero (visto en el punto anterior). En el caso del TSP se tiene un solo agente el cual debe visitar un cierto número de clientes y debe regresar al lugar de partida, ahora bien para el caso del VRP se debe considerar que se tiene una cantidad m de agentes, y que los clientes pueden ser repartidos entre varios visitantes, los cuales tienen que visitar un número finito de lugares y cada lugar debe ser visitado exactamente por un agente. Es por esto que el VRP vendría a ser el equivalente a un m-TSP (problema Multi-agente Viajero).

3.4.2.1 Definición

El VRP consiste en obtener el conjunto de rutas más cortas posibles utilizando una flota de vehículos lo más reducida posible, tal que, partiendo de un depósito y regresando sucesivamente a él, abastecen a una serie de clientes distribuidos geográficamente, teniendo en consideración que cada vehículo tiene una capacidad máxima propia y la cantidad de producto demandada por cada cliente es diferente. La representación gráfica del VRP, es como se ilustra en la figura 3.5 que se presenta a continuación.

Figura 3.5: Representación grafica del VRP



N= Nodos

A=Arcos

Fuente: Elaboración Propia

La función objetivo del VRP en general es minimizar el costo total de operación, aunque no necesariamente siempre es así. La función que se tenga dependerá de la tipología y características del problema. Otras funciones objetivo comunes son, minimizar el tiempo total de transporte, minimizar la suma de las distancias recorridas a lo largo de todas las rutas, minimizar el tiempo de espera, maximizar el beneficio, maximizar el servicio al cliente, minimizar la utilización de vehículos, equilibrar la utilización de los recursos, etc.

Los parámetros en este problema son:

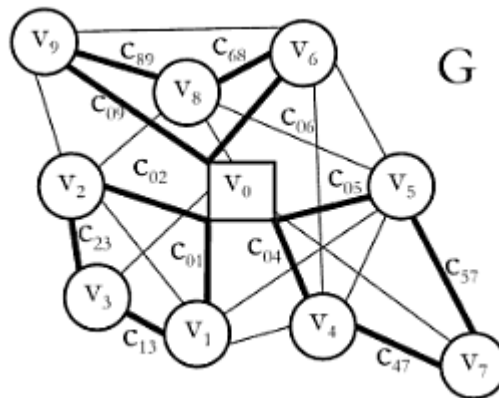
- Visitas: Entregas o Recolección de paquetes
- Depósitos: Donde comienzan todas las rutas y terminan
- Localizaciones geográficas: Involucran tiempo, distancia, origen y destino
- Vehículos: Los vehículos que realizan los viajes (la cual puede estar compuesta por una Flota Homogénea, es decir, todos los vehículos son iguales; o por una flota heterogénea, cuando todos los vehículos son diferentes).

- Capacidades: Las que se observan en el vehículo, como la carga total, volumen total, numero de plataformas, entre otras.
- Pesos: Son el costo de recorrido entre las localizaciones

3.4.2.2 VRP, en Teoría de Grafos

El VRP clásico se puede representar como la “Determinación de un ciclo hamiltoniano de G , de longitud mínima”, lo cual en termino de Teoría de Grafos se puede definir de la siguiente manera: “Sea G un grafo, donde $V = \{V_1, \dots, V_N\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(V_i, V_j) [V_i, V_j \in V, i \neq j]\}$ es el conjunto de arcos. El vértice V_0 representa el depósito, donde tiene su base una flota de m vehículos idénticos de capacidad Q , y los vértices restantes $V' = V \setminus \{V_0\}$ representan la localización de los clientes. Se define una matriz de costos $C = \{C_{ij}\}$ no negativa que satisface que $C_{ij} \leq C_{ik} + C_{kj}$. Se dice que el problema es simétrico cuando $C_{ij} = C_{ji} \forall (V_i, V_j) \in A$. En este caso, se suele sustituir A por el vector de aristas $E = \{(V_i, V_j) [V_i, V_j \in V, i \neq j]\}$. El valor de m puede ser una variable o una constante dependiendo de la aplicación. A cada vértice se le asocia una cantidad q_i que representa la cantidad de producto que demanda. El VRP consiste en determinar un conjunto m de rutas con costo total mínimo, comenzando y terminado en el depósito V_0 , tal que cada vértice $V_{ij} \in V'$ se visite exactamente una vez por un vehículo y la cantidad total de producto repartido en cada ruta no exceda la capacidad Q del vehículo que sirve la ruta” (Duarte Muñoz, 2007)

Figura 3.6: Representación grafica de un VRP en un grafo G .



Fuente: Libro “Metaheurísticas”, por Abraham Duarte Muñoz

3.4.2.3 Variantes del VRP

De acuerdo a las diferentes restricciones particulares que tiene cada problema surgen una serie de variantes del Problema de ruteo de vehículos original. A continuación se presentan las más conocidas:

- VRP con múltiples depósitos (Multiple Depot VRP- MDVRP).
- VRP con ventanas temporales (VRP with Time Windows - VRPTW) en el que se asocia una ventana temporal a cada cliente (con instante de inicio y de fin de servicio).
- VRP con vehículos con capacidades limitadas (Capacitated VRP-CVRP).
- VRP con Entregas y Devoluciones (VRP with Pickup and Delivery-VRPPD).
- VRP estocástico (Stochastic VRP - SVRP), con valores que tienen comportamiento aleatorio como el número de clientes, tiempo de servicio, tiempo de recorrido, etc.
- VRP periódico (Periodic VRP- PVRP), que las entregas se deban realizar en determinado días.
- VRP con atención dividida (Split Delivery VRP - SDVRP), cuando varios vehículos sirven a un mismo cliente.

3.5 Elección del modelo de ruteo aplicable al caso de estudio

Luego de presentar los modelos de ruteo de ruteo más utilizados y sus respectivas variantes, se decidió que el que mejor se ajusta al caso de estudio es El Problema del Agente Viajero. Los motivos para la elección del modelo son:

- Existe un único vehículo por ciudad, encargado de realizar las rutas.
- Los vehículos tienen similares características.
- La cantidad de nodos se conoce antes de comenzar el ruteo, es decir, este modelo ordena la ruta para que visite a todos sus nodos, minimizando la distancia de recorrido de la ruta.
- Existe una sectorización predeterminada, disminuyendo la malla de nodos de la red.

El VRP no puede ser aplicado debido a la existencia de un camión por sector realizando la ruta, además de tener predeterminados los sectores, esta última situación restringe este modelo, el cual busca con una cantidad m de vehículos que pase por los nodos, determinando sectores que ayuden a la resolución de la obtención de la ruta óptima.

3.6 Métodos de solución.

El paso a seguir luego de haber hecho la elección del modelo de ruteo aplicable al caso de estudio, es escoger el método de solución que mejor se adapte al problema.

Hace algunas décadas atrás, los métodos de solución para los problemas de optimización de rutas de vehículos más conocidos y utilizados eran los denominados “métodos exactos”, estos algoritmos consisten en encontrar la solución exacta a un problema perfectamente definido. En problemas de optimización combinatoria esto implica encontrar la solución óptima. Debido a la complejidad de lo anterior estos problemas pueden ser resueltos considerablemente cuando hay pocos clientes, ya que no tienen un buen desempeño en redes de más de 50 clientes. Por otro lado también existen los métodos aproximados que son los que más se utilizan en la actualidad, los cuales consisten en aproximarse a través de un proceso iterativo a la solución final, sin tener que ser la solución encontrada la solución óptima. Lógicamente, la solución encontrada mediante el algoritmo exacto es la más adecuada, pero el excesivo tiempo computacional necesario para llegar a encontrar una solución es inaceptable en la mayoría de los casos.

Dentro de los métodos aproximados tenemos tanto las denominadas heurísticas, como las metaheurísticas, las cuales serán explicadas en profundidad en los siguientes puntos.

3.6.1 Heurísticas

A principios de la década de los 70's surgen los métodos conocidos como heurísticas, las cuales son procedimientos simples que realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y dan soluciones de calidad aceptable en tiempos de cálculo generalmente moderados.

Desde un punto de vista científico, el término heurística se debe al matemático George Polya quien lo empleo en su libro *How to solve it*. Con este término Polya engloba las reglas con que los humanos gestionan el conocimiento común y que, a grandes rasgos, se podían simplificar en: (i) buscar un problema parecido que ya haya sido resuelto, (ii) determinar la técnica empleada para su resolución así como la solución obtenida y (iii) en el caso de que sea posible, utilizar la técnica y solución descrita en el punto anterior para resolver el problema planteado.

A través de los años han proliferado los métodos heurísticos, los que no garantizan el óptimo global, encontrando un óptimo local, de acuerdo a la instancia del problema. Estos métodos logran aproximaciones del problema en tiempos de cómputo razonables en comparación con las técnicas completas.

Otro factor que ha impulsado la búsqueda de soluciones en tiempos razonables, es que la aplicación práctica del problema, muchas veces, no requiere de resultados óptimos en el largo plazo, sino más bien, una solución aproximada, la que se aplica en las actividades operativas diarias de muchas organizaciones dedicadas al rubro de la logística y transporte.

Existen muchos métodos heurísticos de naturaleza muy diferente, por lo que es complicado dar una clasificación completa. Además, muchos de ellos han sido diseñados para un problema específico sin posibilidad de generalización o aplicación a otros problemas similares. A continuación se trata de dar unas categorías amplias, no excluyentes, en donde ubicar a los métodos heurísticos más conocidos. [Farías, 11]

- a) **Métodos de Descomposición:** El problema original se descompone en sub problemas más sencillos de resolver, teniendo en cuenta, aunque sea de manera general, que ambos pertenecen al mismo problema.
- b) **Métodos Inductivos:** La idea de estos métodos es generalizar de versiones pequeñas o sencillas al caso más completo. Propiedades o técnicas identificadas en estos casos más fáciles de analizar pueden ser aplicadas al problema completo.
- c) **Métodos de Reducción:** Consiste en identificar propiedades que se cumplen mayoritariamente por las buenas soluciones e introducirlas como restricciones del problema. El objeto es restringir el espacio de soluciones simplificando el problema. El riesgo obvio es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original.
- d) **Métodos Constructivos:** Consisten en construir literalmente paso a paso una solución del problema. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración. Estos métodos han sido muy utilizados en problemas clásicos como el del TSP.
- e) **Métodos de Búsqueda Local:** A diferencia de los métodos anteriores, los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza en cada paso un movimiento de una solución a otra con mejor valor. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore.

A continuación se presentan algunas de las heurísticas clásicas utilizadas para resolver problemas de ruteo de vehículos. Las soluciones obtenidas con esta clase de procedimientos, pueden, en general ser modificadas utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero incurriendo en elevados tiempos de ejecución. Muchas de estas heurísticas pueden ser extendidas para manejar restricciones adicionales.

3.6.1.1 Algoritmo de Dijkstra [Prawda, 04]

También llamado algoritmo caminos mínimos, es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un vértice origen al resto de vértices en un grafo con pesos en cada arista. La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con aristas de costo negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por una arista con costo negativo).

3.6.1.2 El algoritmo de ahorros [Clarke Wright, 64]

El Algoritmo de Ahorros es uno de los algoritmos más utilizados, el cual consiste en lo siguiente:

Si en una solución dos rutas diferentes $(0, \dots, i, 0)$ y $(0, j, \dots, 0)$, pueden ser combinadas formando una nueva ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ como se observa en la siguiente fórmula. El ahorro que se obtiene por las rutas es:

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

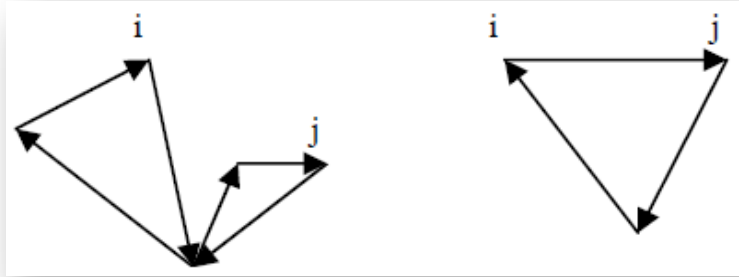
Donde: C_{i0} Es la distancia que existe entre el nodo i y 0

C_{0j} Es la distancia que existe entre el nodo 0 y j

C_{ij} Es la distancia que existe entre el nodo i y j

Lo que quiere decir el ahorro es que al realizar la unión de las rutas no serán utilizados los arcos $(i, 0)$ y $(0, j)$ y se agregará el arco (i, j) . Ver figura 3.7.

Figura 3.7: Representación grafica del algoritmo de ahorro (dos rutas, antes y después de ser unidas)



Fuente: Elaboración Propia

3.6.1.3 Heurísticas de inserción [Bodin, Golden, Assad & Ball, 83]

Las heurísticas de inserción son métodos constructivos en los cuales se crea una solución mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas. En cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas solo visitan un subconjunto de los clientes y se selecciona un cliente no visitado para insertar en dicha solución. En las heurísticas de inserción secuencial solo se considera insertar clientes en la última ruta creada. La principal desventaja de este enfoque es que los últimos clientes no visitados tienden a estar dispersos y por lo tanto las últimas rutas construidas son de costo muy elevado. Las heurísticas de inserción en paralelo surgen para remediar esta deficiencia, permitiendo insertar un cliente en cualquiera de las rutas de la solución. Cualquier heurística de inserción para el TSP puede ser utilizada para el VRP siempre que se verifique la factibilidad antes de realizar las inserciones.

3.6.1.4 Métodos Asignar Primero-Rutear Después [Beasley, 83]

Los métodos Asignar primero y Rutear después (cluster first - route second) proceden en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarían en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo. Por lo tanto, construir las rutas para cada cluster es un TSP que, dependiendo de la cantidad de clientes en el cluster, se puede resolver de forma exacta o aproximada.

3.6.1.5 Métodos Rutear Primero-Asignar Después [Beasley, 83]

En los métodos Rutear primero - asignar Después también se procede en dos fases. Primero se calcula una ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP. En general esta ruta no respeta las restricciones del problema, por lo cual en la segunda fase la gran ruta se particiona en varias rutas, cada una de las cuales si es factible.

3.6.2 Limitaciones de los algoritmos heurísticos

En optimización, espacio de búsqueda se refiere al dominio⁵ de la función a ser optimizada. En el caso de los algoritmos de búsqueda, se refiere al conjunto de todas las posibles soluciones candidatas a un problema.

En dominios discretos⁶, cuando existen muchas variables o bien muchos valores posibles a asignarles, se produce explosión combinatoria, es decir, el crecimiento exponencial del tamaño del espacio de búsqueda en relación a las variables y sus dominios. Cuando los *espacios de búsqueda*⁷ son muy extensos, los métodos completos son incapaces de encontrar una solución en un tiempo aceptable, por lo que se opta por utilizar las famosas heurísticas definidas y explicadas en los puntos anteriores.

Las heurísticas por su parte presentan un problema, que es su incapacidad para escapar de los óptimos locales⁸, ya que no poseen ningún mecanismo que les permita escapar de estos óptimos. Para solventar este problema se introducen otros algoritmos de búsqueda más inteligentes que eviten en la medida de lo posible quedar atrapados en óptimos locales. Estos algoritmos de búsqueda más inteligentes, denominados *Metaheurísticas*, son procedimientos de alto nivel que guían a algoritmos heurísticos conocidos evitando que éstos caigan en óptimos locales. A continuación se procederá a describir este tipo de algoritmos.

3.6.3 Metaheurísticas

El término *metaheurísticas* o *meta-heurística* fue acuñado por F.Glover en el año 1986. Con este término pretendía definir un “*procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimidad local*”.

La evolución de las metaheurísticas durante las últimas dos décadas ha tenido un comportamiento prácticamente exponencial. En el tiempo que transcurre desde las primeras reticencias hasta la actualidad, se han encontrado soluciones de muy alta calidad a problemas que hace tiempo parecían inabordables.

⁵ Dominio: Conjunto de valores de la variable independiente para los que se puede calcular el valor de la variable Y.

⁶ Dominio Discreto: Es una función matemática cuyo dominio de definición es un conjunto numerable.

⁷ Espacio de búsqueda: Se refiere al dominio de la función a ser optimizada. En el caso de los algoritmos de búsqueda, que manejan espacios discretos, se refiere al conjunto de todas las posibles soluciones candidatas a un problema.

⁸ Optimo local: Un estado óptimo fácil de encontrar en el espacio de estados, pero no garantizado que sea el óptimo global.

De modo general, se puede decir que las metaheurísticas combinan ideas que provienen de cuatro campos de investigación bien distintos: las técnicas de diseño de algoritmo (resuelven una colección de problemas), *algoritmos específicos* (dependientes del problema que se quiere resolver), *fuentes de inspiración* (mundo real) y *métodos estadísticos*.

En Síntesis se puede decir que las Metaheurísticas son procedimientos genéricos de exploración del espacio de soluciones para problemas de optimización y búsqueda. Proporcionan una línea de diseño que, adaptada en cada contexto, permite generar algoritmos de solución.

En general se puede decir que las metaheurísticas obtienen mejores resultados que las heurísticas clásicas, pero incurriendo en mayores tiempos de ejecución (que de todos modos, son inferiores a los de los algoritmos exactos). A continuación se describen dos de los algoritmos metaheurísticos más destacables que son: Búsqueda Tabú y Algoritmo colonia de hormigas

3.6.3.1 Búsqueda Tabú [Glover, 86]

La búsqueda Tabú "*tabú search, TS*" es una estrategia que guía al sistema hacia zonas del espacio de soluciones que aun no han sido exploradas. TS selecciona vorazmente el mejor de los movimientos en cada paso. Para evitar que el proceso vuelva a un óptimo local anterior, TS clasifica como "tabú" un determinado número de los movimientos más recientes, los cuales no pueden repetirse durante un horizonte temporal estipulado.

El TS toma los principios generales de la Inteligencia Artificial⁹, el concepto de memoria con el objetivo de dirigir la exploración atendiendo a las consecuencias de la historia más recientes. Es decir, el método trata de extraer información de lo que sucedió y actuar en consecuencia. En este sentido puede apuntarse que hay un cierto aprendizaje y la búsqueda es inteligente. De alguna forma el principio básico consiste en suponer que una mala elección basada en cierta estrategia es preferible a una buena solución fruto del azar, ya que esta última no proporciona información para acciones posteriores.

El procedimiento sigue una estrategia de búsqueda local, sin embargo el entorno de una solución disminuye al tomar en consideración la memoria de la exploración. La forma más sencilla de definir el entorno reducido es listar como tabú aquellas soluciones visitadas en un pasado cercano. Esta memoria a corto plazo evita que la búsqueda se cicle. Una vez transcurrido un número determinado de iteraciones, se supone que nos encontramos en otra

⁹ Inteligencia Artificial: En ciencias de la computación se denomina IA a la capacidad de razonar de un agente no vivo.

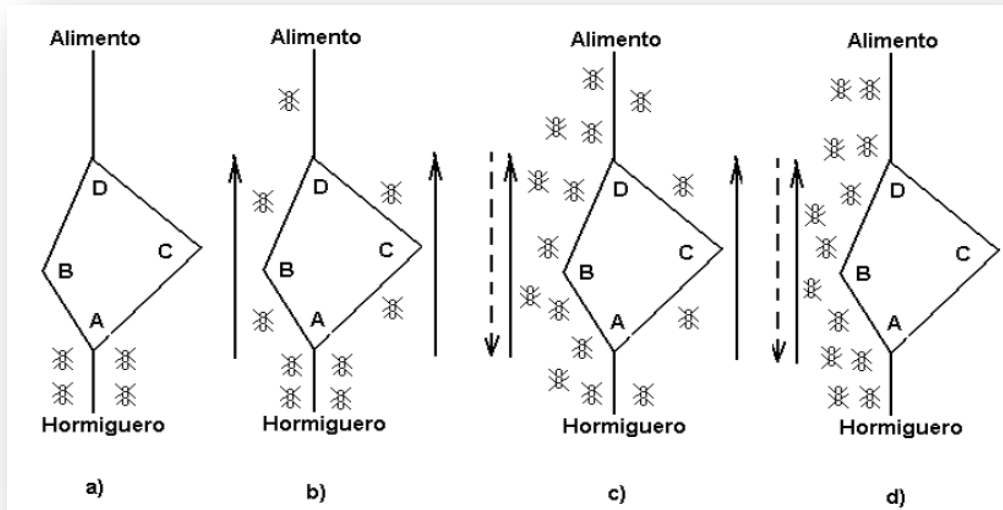
zona del espacio, y por tanto se liberan soluciones visitadas de su inclusión en la lista. Asimismo es posible definir un *nivel de aspiración* como aquellas condiciones que de satisfacerse, permitirían alcanzar una solución aunque esté incluida en la lista tabú. Por ejemplo se puede permitir alcanzar una solución que aunque este prohibida sea preferible a la mejor almacenada. Otras veces, en lugar de almacenar soluciones, se guardan ciertos atributos que identifican a un grupo de ellas. Así, una característica etiquetada como tabú por pertenecer a una solución visitada n iteraciones, puede impedir en la iteración actual, alcanzar una solución para contenerla, aunque esta sea muy diferente a la que provoco el etiquetado del atributo. Esto provoca, a largo plazo, el que se identifiquen y mantengan aquellas propiedades que inducen una cierta estructura beneficiosa en las opciones visitadas.

3.6.3.2 Algoritmo colonia de hormigas [Colorni, Dorigo & Maniezzo, 91]

Colorni, Dorigo y Maniezzo (1991) sugirieron la idea de imitar el comportamiento de los insectos para encontrar soluciones a los problemas de optimización combinatoria. El principio de la metaheurísticas denominado como “*Ant System Optimizacion, ACO*”, se basa en el comportamiento colectivo de las hormigas en la búsqueda de alimentos para su subsistencia, que son capaces de encontrar el camino más corto entre una fuente de comida y su hormiguero. Primero las hormigas exploran el entorno de su hormiguero de forma aleatoria. Tan pronto como un individuo encuentra una fuente de comida, evalúa su cantidad y calidad y transporta un poco al hormiguero. Durante el regreso, la hormiga deja por el camino una señal odorífera, depositando una sustancia denominada feromona, para que las demás puedan seguirla. Después de un tiempo, el camino hacia el alimento se indicara por un rastro oloroso que crece con el número de hormigas que pasen por él, y que va desapareciendo en caso contrario. El resultado final es la optimización del trabajo de todo el hormiguero en su búsqueda de comida.

En la figura 3.8 se muestra como las hormigas encuentran el camino más corto. En a) las hormigas deben decidir un camino; en b) se toma uno al azar; en c), dado que la velocidad de una hormiga se considera aproximadamente constante, las que llegan antes vuelven eligiendo el camino con más acumulación de feromona. En d), se circula por el camino más corto, desapareciendo por evaporación el rastro en el camino más largo.

Figura 3.8: Las hormigas y el camino más corto.



Fuente: Tesis doctoral “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW” por Víctor Yepes Piqueras, mayo 2002.

La analogía de una metaheurística de optimización puede establecerse de la siguiente forma:

- La búsqueda de alimento por las hormigas es equivalente a la exploración de soluciones factibles de un problema combinatorio.
- La cantidad de alimento hallado en un lugar es similar al valor de la función objetivo.
- El rastro de feromona es la memoria adaptativa del método

Un esquema básico de la metaheurística sería el siguiente:

- Iniciar un rastro de feromona.
- Mientras no se encuentre un criterio de parada:
 - a. Para cada hormiga artificial, construir una nueva solución usando el rastro actual y evaluar la solución que está siendo construida.
 - b. Actualizar el rastro de la feromona.

El componente más importante de un Sistema de Hormigas es la gestión de las huellas odoríferas. En su versión estándar, los rastros se usan en relación con la función objetivo para construir nuevas soluciones. Una vez se ha construido, estos se actualizan de la siguiente forma: primero todos los rastros se debilitan para simular la evaporación del feromona; después aquellos que corresponden a los elementos que se han empleado para la construcción, se refuerzan teniendo en cuenta la solución.

3.7 Proceso de resolución del modelo mediante computadora

En general el proceso de resolución de los Modelos de investigación de operaciones para la optimización de rutas distribución mediante computadora, se resume en los siguientes dos pasos:

- Teniendo identificado ya el problema, hay que hallar un algoritmo que se adapte a este (el cual puede ser una heurística o una metaheurística como se menciono el punto anterior)
- Luego se debe codificar la heurística elegida en algún lenguaje de programación.

En el presente caso de estudio para resolver el TSP se opto por una solución alternativa más sencilla, la cual consiste que en vez de elegir algún algoritmo (heurística o metaheurística), para luego programarlo, se utilizara algunas de las herramientas disponibles en la actualidad de apoyo a la toma de decisiones para este tipo de problemas, las que presentan una innumerable gama de posibilidades que facilitan este proceso, como por ejemplo: Un *software* que da la posibilidad de no tener que programar el algoritmo de solución, ya que ya viene incorporado, o otra herramienta que actúa en forma de pagina web, que solamente requiere que se le ingresen las direcciones de los clientes, entregando la solución de la ruta adecuada a los pocos minutos, sin tener necesidad de hacer algún otro procedimiento.

3.7.1 Tipos de herramientas para resolver problemas de ruteo de vehículos

A continuación se presentan las herramientas que permiten resolver modelos matemáticos y dentro de las cuales se elegirá la que más se adapte al presente caso de estudio. Se debe mencionar que la cantidad de opciones disponibles es bastante extensa, pero estas herramientas que se mencionaran son las que en general más se utilizan y de las cuales se dispone de mayor información.

- **IBM ILOG CPLEX 12.5**

La primera alternativa, es la herramienta computacional IBM ILOG CPLEX Optimización Studio, la cual corresponde a un conjunto de herramientas de soporte de decisiones analíticas para el rápido desarrollo y despliegue de modelos de optimización mediante programación matemática, programación con restricciones y otros problemas combinatorios difíciles.

IBM ILOG CPLEX combina un entorno de desarrollo integrado (IDE), con la optimización del lenguaje de programación (OPL) y el alto rendimiento del optimizador ILOG CPLEX el cual es capaz de resolver grandes problemas de programación lineal, programación lineal entera mixta, programación cuadrática y modelos de programación cuadrática entera mixta.

El primer obstáculo que surge al considerar utilizar esta herramienta es la poca información que se tiene del programa en la universidad. En segundo lugar y la razón más importante por la cual se hace prácticamente inviable la utilización de este *software* es la dificultad de su programación, debido a que el lenguaje que utiliza OPL, es muy complejo de programar, debido a la abstracción de su sintaxis, la cual es muy diferente a la de otros lenguajes de programación comunes, tales como JAVA, o AMPL, por lo que la única manera de modelar el TSP, con IBM ILOG CPLEX, sería recurriendo a algún programador especializado. Por último, otro punto en contra es que el programa no se encuentra instalado en los computadores de la facultad y IBM ILOG CPLEX, no ofrece versiones extendidas para estudiantes, entonces para tener acceso a la versión extendida del software habría que comprar la licencia de éste, la cual mínimo tiene un valor de \$US 125 (versión válida para solo un computador, la cual no puede ser utilizada para fines comerciales).

- **OptiMap**

La segunda alternativa es OptiMap, esta herramienta corresponde a una aplicación web que hace el cálculo de rutas de manera gratuita, esta se encuentra disponible en la URL <http://gebweb.net/optimap>. Consiste en un algoritmo que calcula la ruta más corta para un camión de capacidad ilimitada que visite exactamente una vez cada dirección ingresada, es decir, resuelve un problema TSP con las direcciones dadas. En el Anexo 10.2 se muestra una imagen que corresponde a la representación visual de la página web.

*“OptiMap tiene disponible su código fuente en forma gratuita previa autorización del autor, pero está limitado hasta 100 direcciones y utiliza además una cartografía antigua, provocando que ciertas direcciones no sean posibles de hallar”.*¹⁰

El problema de utilizar esta aplicación, es que al ser una plataforma que trabaja con internet puede caerse en cualquier instante de manera repentina, lo que hace arriesgada su utilización, ya que, la empresa requiere una herramienta que esté disponible todo el día, todos los días de la semana. Otro problema que se genera al considerar la utilización de esta

¹⁰ Thompson A. (2013) Propuesta de mejora al sistema de distribución operacional de Melon Supercentro para el reparto de cemento envasado en la Región Metropolitana. (Trabajo de título de Ingeniería Civil Industrial, Universidad de Valparaíso).

aplicación en la empresa, es el hecho de que OptiMap necesita como datos de entrada, la dirección exacta de cada cliente, tal como Google la reconoce, si la dirección no está escrita de esa manera marca un punto erróneo dentro del mapa, es decir, considera la dirección del nodo en un lugar equivocado, lo que finalmente provoca que la ruta que se genere sea inconsistente con los datos reales. El problema de las direcciones quizás no sería tan grande, si la empresa tuviera bien escritas las direcciones en su base de datos, pero esto no ocurre, la mayoría de las direcciones están mal escritas, ya sea en redacción o en ortografía.

- **What's Best 12.0**

La tercera alternativa corresponde a What's Best, *software* que pertenece a LINDO System, empresa que tiene una larga historia siendo pionera en poderosas herramientas de optimización de *software* para la investigación de operaciones.

What's Best funciona como un complemento de Excel, el que permite construir modelos de optimización a gran escala. La gran desventaja de este *software* es que requiere de un formato estático en las planillas de cálculo para la programación del modelo, lo cual finalmente termina en una representación del modelo muy alejada de la realidad, ya que, en la práctica los clientes (nodos) que atiende la empresa diariamente por ruta, van cambiando constantemente, por lo que ocupar What's Best implicaría cambiar la programación del modelo (función objetivo, variables, restricciones), ante cada modificación en los pedidos.

Un ejemplo de cómo modelar un TSP en el software What's Best, se presenta en el anexo 10.3. La versión que se utiliza en la demostración es la versión gratuita, la cual tiene todas las funciones y características de la versión regular, pero con capacidad limitada.

- **Software LINGO 14**

La cuarta alternativa es LINGO, un *software* de optimización matemática, que pertenece a los mismos fabricantes del complemento What's Best, LINDO Systems.

El *software* está diseñado para programar y resolver modelos de programación lineal, no lineal (convexos y no convexos), cuadrática, estocástica y entera. Trae incorporado un lenguaje de programación para expresar los modelos de optimización, un entorno gráfico para insertar y editar los modelos, y un conjunto incorporado de distintos solvers.

El lenguaje de modelado matemático que ocupa LINGO, permite expresar el problema de manera bastante simple y natural muy similar a la notación matemática estándar, lo que

hace fácil e intuitiva la formulación directamente en la aplicación. Además este *software* posee la característica de poder importar datos desde planillas Microsoft Excel, mediante vínculos (Microsoft) OLE tanto en sus formatos XLS como XLSX. Entonces, la programación del modelo en LINGO puede ser independiente de los parámetros de entrada si así se requiere, lo que permite la innegable ventaja de calcular e iterar distintas instancias del modelo sin necesidad de una nueva programación de este.

Existen distintas versiones del software de acuerdo a la licencia adquirida. El número máximo de restricciones y variables que LINGO puede manejar depende de la versión. Los límites de las distintas versiones son:

Tabla 3.2: Dimensiones máximas de cada versión

Versión	Restricciones	Variables	Variables Enteras	Variables No Lineales
Demo/Web	150	300	30	30
Solver Suite	250	500	50	50
Super	1.000	2.000	200	200
Hyper	4.000	8.000	800	800
Industrial	16.000	32.000	3.200	3.200
Extended	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado

Fuente: Elaboración Propia en base a la información proporcionada por manual LINGO

Como se puede apreciar en la tabla 3.2 la versión más completa es la “Extended” cuya capacidad de resolución de problemas no tiene límites, tanto para las restricciones, como las variables. Cabe señalar que existe la posibilidad de conseguir una licencia Extended educacional de evaluación por seis meses de manera gratuita para usos no comerciales, vía registro en el sitio web de LINDO.

3.7.2 Elección de la herramienta de ruteo

La elección de la herramienta adecuada se realizó bajo ciertos criterios los cuales son los siguientes:

- **Dificultad en la programación:** Es imprescindible que la herramienta que se escoja permita desarrollar la programación de una manera relativamente fácil, ya que de lo contrario el uso de la herramienta sería inabordable.

- **Acceso:** El acceso a la herramienta es fundamental, y podrán ser consideradas para la elección solo herramientas gratuitas o que permitan el acceso a licencias para estudiantes por cierto periodo de tiempo.
- **Requerimientos para el funcionamiento:** Es necesario que la herramienta que se escoja no requiera para su funcionamiento, elementos tales como el “internet”, ya que este puede dejar de funcionar en algún momento de manera repentina, y es necesario que la herramienta este 100% disponible siempre.
- **Capacidad de importar datos:** Es de suma importancia que la herramienta que se escoja tenga la capacidad de importar datos de entrada pues esto permite realizar una implementación de los modelos de forma independiente de los datos, brindando de esta manera una mayor flexibilidad, de manera que es más fácil realizar cualquier modificación al problema, con una menor oportunidad de error.

Tabla 3.3: “Resumen comparativo entre las herramientas alternativas”

Herramienta/ Característica	Dificultad en la programación	Acceso	Requerimientos para el funcionamiento	Capacidad de importar los datos
IBM ILOG CPLEX 12.5	Muy compleja	Pagado	Acceso a un ordenador	Si
OptiMap	No hay necesidad de programar	Gratuito	Sujeto a la disponibilidad de internet y del funcionamiento de la página web.	No
What’s Best 12.0	Fácil e intuitiva	Gratuito para estudiantes	Acceso a un ordenador	No
LINGO 14	Fácil e intuitiva	Gratuito para estudiantes	Acceso a un ordenador	Si

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar la herramienta que mejor responde a los criterios de elección, es LINGO 14, por lo tanto esta será la que se utilizara para resolver el problema y será con la cual se trabajara durante los siguientes capítulos de este trabajo.

Capítulo IV: Metodología de Trabajo

En este capítulo se presentan los pasos a seguir para la resolución del problema presentado anteriormente.

4. Metodología de trabajo

La metodología del presente proyecto consta de distintas etapas y actividades las cuales se detallan a continuación:

4.1 Descripción de la empresa:

El primer punto de este trabajo corresponde a la descripción de la empresa, la cual se presentó en el Capítulo I y ha sido realizada en base a la información proporcionada desde diferentes fuentes (Gerente de Logística, Gerente de Ventas, Ruter, entre otros). De esto se obtiene la siguiente información que será fundamental para el desarrollo de este trabajo y además será posible definir la situación actual que servirá para la comparación del método actual de trabajo versus el método propuesto.

- Información general de la empresa, que servirá para tener una visión global del rubro en el cual se encuentra inserta la empresa como también conocer las actividades que realiza.
- Información respecto al centro de distribución y clientes.
- Información de la flota actual de la empresa, respecto a vehículos disponibles y capacidad.

4.2 Definir el problema:

El segundo punto de este trabajo y uno de los más importantes, es definir correctamente el problema que se desea resolver y mostrar de manera clara las causas que lo están generando. Esta etapa ya fue desarrollada en el Capítulo II de este trabajo, en donde quedó claro que el problema era referente a la “Optimización de las Rutas de Distribución”.

4.3 Zona geográfica de estudio:

Para la resolución del modelo, se estableció acotar la zona geográfica a las ciudades de Villa Alemana y Quilpué. Esto se hizo por petición del Gerente de Operaciones de la empresa, el cual considera que es en esas ciudades donde existen mayores problemas con respecto al ruteo de vehículos. Esta información se encuentra disponible en el Capítulo II de este trabajo.

4.4 Evaluar Diversos Modelos Teóricos de Solución:

Luego de la identificación y descripción completa del problema a resolver, se procedió a un estudio de los trabajos y literatura existente relacionada con el tema, con la finalidad de

revisar que es lo que se ha hecho y analizar cómo es posible utilizar los desarrollos realizados en forma previa para potenciar este estudio. Luego de esto se llegó a la conclusión que debido a las condiciones de la empresa y del problema planteado es necesario la creación de un modelo de optimización de rutas de distribución, basado en El Problema del Agente Viajero, a través del *software* Lingo. Lo anterior se desarrollo en el Capítulo III del presente trabajo.

4.5 Medir o calcular los parámetros de entrada al modelo:

Se deben crear las 10 matrices de distancias correspondientes a todas las rutas, estas matrices contienen todas las distancias entre los nodos que deben ser visitados. Cabe mencionar que los nodos, corresponden a agrupaciones de clientes. Se considerara un nodo cada vez que el camión se detiene para dejar mercadería, lo cual puede hacerlo una vez para varios clientes ubicados cerca. Estas matrices de distancias son fundamentales para la resolución del problema y los datos para elaborarlas serán extraídos por medio del software Google Maps.

A través de la recopilación de información de los clientes (dirección) que atiende la empresa, se deben construir diez grafos, cada uno de los cuales representa una ruta, de las dos rutas que se atienden diariamente (Quilpué-Villa Alemana). Para la creación de los grafos se utilizara la herramienta Google Earth.

Lo anterior se desarrollará en el Capítulo V del presente trabajo.

4.6 Descripción del modelo matemático que se aplicara:

- Definir las variables pertinentes al problema.
- Construir la función objetivo que minimice la distancia total de cada ruta.
- Determinar las restricciones a las que estará sujeta el modelo.

La descripción del modelo matemático se presentara en detalle en el Capítulo V.

4.7 Resolución del modelo: Las etapas en la resolución del modelo son:

- Programar el modelo de solución en Lingo.
- Cargar los datos.
- Ejecutar el programa con el modelo.

La resolución del modelo y sus etapas se desarrollara en el Capítulo V del trabajo.

4.8 Verificación y Validación de los Resultados:

Esta etapa es una de las más importantes, ya que en esta se comprueba que el modelo propuesto realice lo que se solicita. El modelo solo es válido si, bajo condiciones de datos semejantes, reproduce el funcionamiento en el pasado. Lo que tradicionalmente se hace, es la comparación de los resultados de la estrategia de ruteo que utiliza actualmente la empresa versus los resultados planteados por la metodología propuesta. Por otra parte existen datos de prueba validados para un problema genérico, lo que permite validar el uso de la herramienta.

La Verificación y Validación de los resultados se desarrollara en el Capítulo VI del trabajo.

4.9 Justificación de la inversión:

Se evalúa económicamente los costos e inversiones de la metodología propuesta. De tal forma que se verifique a través de algún indicador económico que lo propuesto cumple el objetivo de disminuir los costos de distribución.

Lo anterior se presenta en el Capítulo VII del presente trabajo.

4.10 Conclusiones y Recomendaciones:

Se controla si la función objetivo ofrece las ventajas esperadas, se verifica la representatividad del modelo y se efectúan análisis de los resultados de la solución obtenida que generarán las conclusiones y recomendaciones.

Las conclusiones y recomendaciones se presentan en el capítulo VIII del trabajo.

4.11 Bibliografía

Se presentan las diferentes fuentes de donde se obtuvo la información. Esta se presenta en el capítulo IX.

4.12 Anexos

Capítulo V: Descripción y Metodología para la Modelación y Resolución del Problema

En este capítulo se describirá en detalle la metodología para la modelación y resolución del problema del agente viajero (TSP), utilizando el software Lingo.

5. Descripción y metodología para la modelación y resolución del problema

Metodología y resolución de problema

La metodología para la modelación del problema considera varias etapas, las que parten por “medir y calcular los parámetros de entradas al modelo”, y que terminan con la “descripción del modelo matemático”, todas las etapas de la metodología se presentan en este capítulo. También se presentan las características del programa que se utilizara para resolver el problema, con las diferentes etapas necesarias para su resolución.

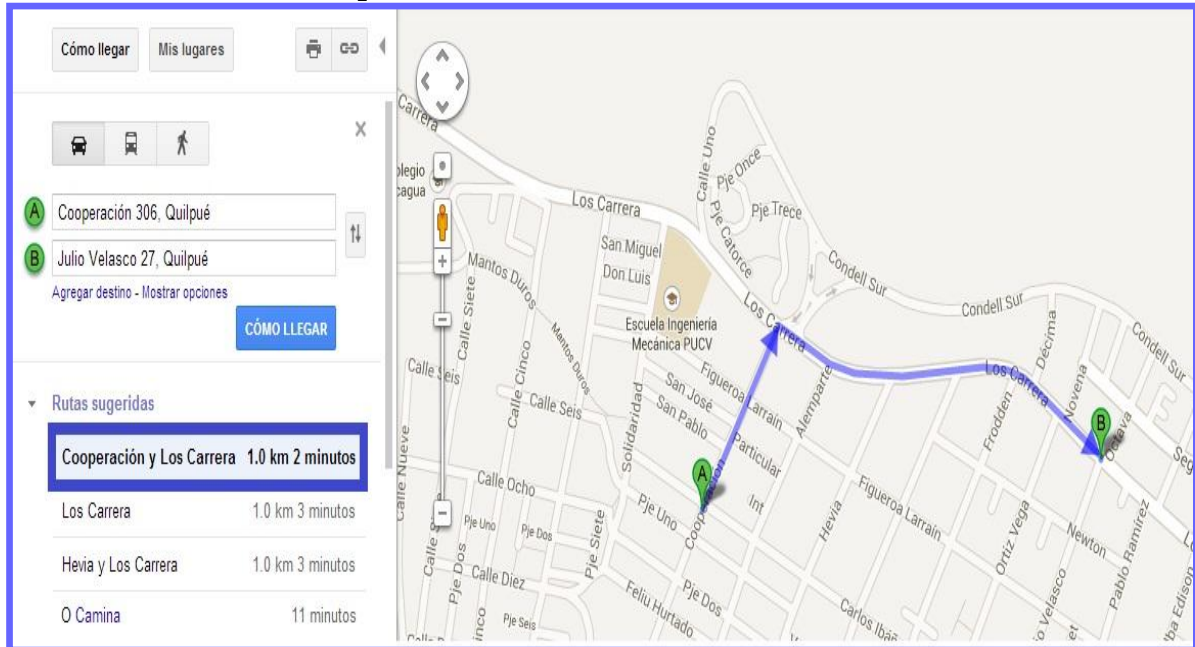
5.1 Medir o calcular los parámetros de entrada al modelo

Para poder determinar correctamente cuales son los requerimientos de información necesarios para poder construir el modelo, es necesario en primer lugar identificar los parámetros del problema. En el presente caso de estudio los parámetros se pueden clasificar de dos maneras, en primer lugar están los parámetros definidos como parámetros explícitos, dado que no se necesita algún tipo de cálculo para ser determinados, como lo es la “ubicación geográfica de los clientes” y en segundo lugar están los parámetros definidos como implícitos los cuales se pueden comenzar a definir con la información obtenida de los parámetros explícitos, para los cuales es necesario definir una forma de cálculo para su obtención. Entre los parámetros implícitos se encuentra la distancia entre los nodos (con nodo nos referimos a cada vez que el camión se detiene para dejar mercadería, lo cual puede hacerlo una vez para varios clientes ubicados cerca, por lo tanto un nodo a veces puede considerar a varios clientes). La información sobre los nodos existentes se obtuvo de manera directa a través del rutero y los camioneros destinados a las ciudades de Quilpué y Villa Alemana. Cabe mencionar que de este punto en adelante hablaremos de nodos en vez de clientes.

Para el parámetro “distancia entre nodos”, se opto por utilizar el *software* Google Maps, con la opción de menor cantidad de kilómetros recorridos para llegar de un punto a otro, pero sin evitar autopistas, ni peajes (esto último se hace debido a que el Centro de distribución queda en Nogales, por lo tanto es necesario pasar por la autopista y pagar peajes para acortar las distancias).

En la siguiente figura se presenta un ejemplo de la obtención de datos realizados con Google Maps.

Figura 5.1: Obtención de datos de las distancias entre los nodos, para la creación posterior de la matriz de distancias.



Fuente: Elaboración Propia, en base a Google Maps.

Para esto lo que se realiza es buscar las coordenadas geográficas en base a las direcciones de los nodos. La idea principal es obtener las distancias existentes entre los nodos, para lograr determinar una matriz de distancia de viaje entre estos, lo que a su vez permite encontrar los costos asociados a las rutas generadas.

5.1.1 Matriz de distancias

La matriz de distancias que se requiere determinar, es una matriz cuyos elementos representan las distancias entre los nodos tomados por pares de cierta ruta, por lo tanto está conformada por la medición de distancias entre todos los nodos dentro de una misma ruta, incluyendo el centro de distribución. Las 10 matrices correspondientes a las 10 rutas del problema bajo estudio, se presentan en el anexo 10.4.

A continuación a modo de ejemplo se presenta un extracto de la matriz de distancias de la ruta del día jueves de Villa Alemana.

Figura 5.2: Matriz de distancia entre nodos de Ruta 4- Villa-Alemana

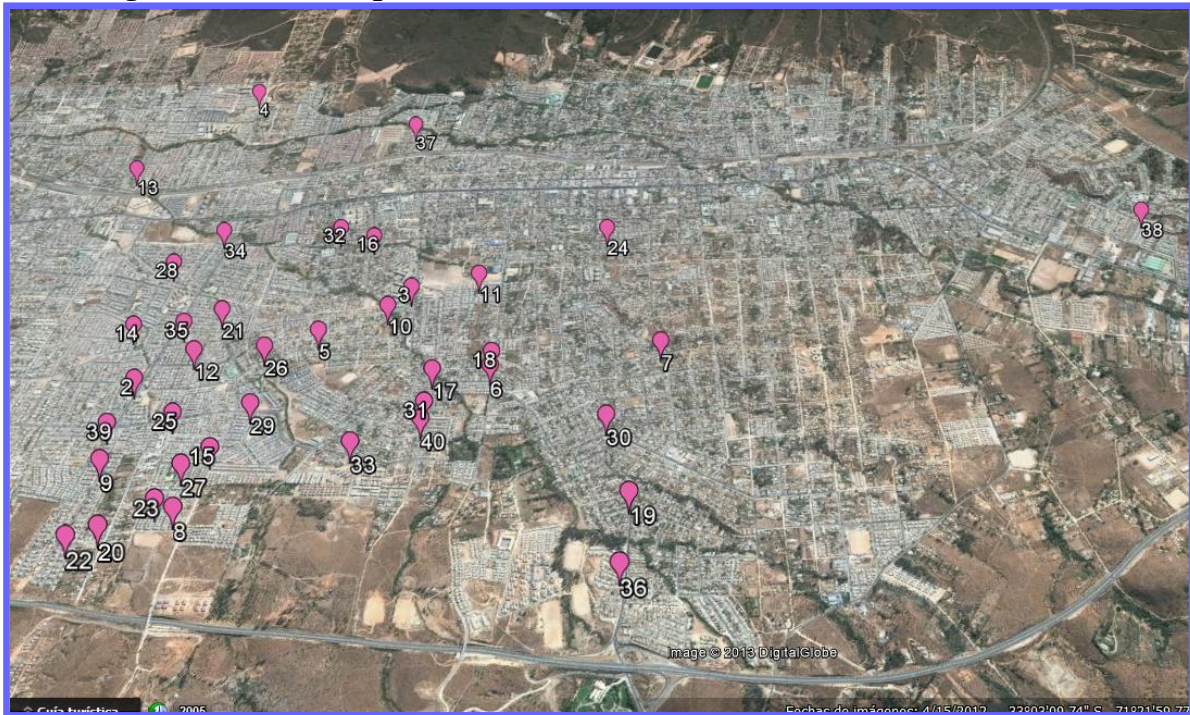
Matriz Distancia ruta 4 Villa Alemana																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1000	58	55,7	57,6	56,3	56,6	54,9	56,8	57,5	55,9	55,3	57,9	57,9	57,6	57,1	56,7	55,7	55,1	55,1	57	57,8	57,2	57
2	55,3	1000	1,5	2,9	0,85	2,1	3	1,3	0,45	1,3	2	0,35	2	0,55	0,9	1,9	1,8	2,1	3,3	1	0,65	0,85	1
3	53	1,5	1000	2,9	0,6	0,8	1,6	1,7	1,9	0,2	0,45	1,1	2,3	1,5	1,4	0,6	0,65	0,75	2,2	2,2	1,1	2,3	1,8
4	54,9	2,9	3	1000	3	3,8	4,5	3,5	3,4	3,1	3,4	2,7	1,2	2,6	3,2	2,7	3,6	3,8	5,1	3,8	2,6	4	3,6
5	54,6	0,85	0,6	3	1000	1	1,9	1,2	1,2	0,4	1,1	0,65	2,1	1,1	1	1,1	0,7	0,85	2,2	1,6	0,8	1,8	1,4
6	53,9	1,8	0,8	3,8	1	1000	0,95	1,8	2	0,75	0,7	1,7	2,9	2	1,5	1,4	0,27	0,082	1	2,2	1,7	2,4	1,9
7	52,3	2,6	1,6	4,5	1,8	0,95	1000	2,7	2,9	1,6	1,2	2,5	4,2	2,8	2,4	2	1,2	0,85	1,2	3,1	2,5	3,3	2,8
8	54,1	1,2	1,7	3,8	1,2	2,3	3,1	1000	0,85	1,7	2,2	1,1	3	1,7	0,3	2,3	1,5	1,9	2,9	0,45	1,2	0,6	0,35
9	54,8	0,45	1,9	3,4	1,2	1,9	4,6	0,85	1000	1,7	2,4	0,8	2,4	1	0,55	2,4	1,7	2,1	3,7	0,5	1,1	0,4	0,6
10	53,2	1,3	0,2	3,1	0,4	0,75	1,7	1,7	57,5	1000	0,65	0,9	2,2	1,3	1,4	0,8	0,6	0,75	2,1	2,1	0,9	2,1	1,8
11	52,6	2	0,45	3,4	1,1	0,7	1,2	2,2	2,4	0,65	1000	1,6	2,5	1,9	1,8	0,8	1	0,6	1,7	2,6	1,5	2,7	2,3
12	55,2	0,35	1,1	3	0,65	1,7	2,6	1,2	0,8	0,9	1,6	1000	2,2	0,55	0,75	1,6	1,5	1,6	3	1,1	0,4	1,2	0,9
13	54,5	2	2,2	1,1	2	3,3	4,1	2,8	2,4	2,1	2,3	2	1000	1,4	2,5	1,7	2,6	3,3	4,1	3,1	1,6	2,8	2,9
14	55,8	0,55	1,5	2,6	1,1	2	3	1,8	1	1,3	1,9	0,55	1,4	1000	1,4	1,9	1,9	2	3,4	1,5	0,55	1,4	1,5
15	54,4	0,9	1,5	3,5	0,9	2	2,8	0,3	0,55	1,5	1,9	0,75	2,7	1,4	1000	2,1	1,3	1,7	2,4	0,8	0,9	0,9	0,4
16	52,9	1,9	0,6	2,7	1,2	1,4	2	2,3	2,4	0,8	0,8	1,6	1,8	1,9	2	1000	1,2	1,4	2,8	2,7	1,5	2,9	2,4
17	54	1,8	0,65	3,6	0,8	0,27	1,2	1,5	1,7	0,6	1	1,6	2,7	1,9	1,2	1,2	1000	0,35	1,3	1,9	1,5	2	1,6
18	54	1,8	0,75	3,8	0,95	0,082	0,85	1,9	2,1	0,75	0,6	1,6	2,9	2	1,6	1,4	0,35	1000	1,1	2,3	1,6	2,4	2
19	52,4	3,3	2,2	5,1	2,3	1	1,2	2,6	2,9	2,1	1,7	3	4,3	3,4	2,4	2,8	1,3	1,1	1000	3	3	3,2	2,7
20	54,3	1,2	2,2	4,1	1,5	3,3	4,1	0,45	0,5	2	2,6	1,1	3,3	1,7	0,75	2,7	1,9	3,4	3,2	1000	1,5	0,15	0,3
21	55,2	0,65	1,1	2,6	0,75	1,7	2,6	1,2	1,1	0,9	1,5	0,35	1,6	0,55	0,9	1,5	1,5	1,6	3	1,5	1000	1,6	1,3
22	54,5	0,85	2,3	4,3	1,7	3,4	4,3	0,6	0,4	2,1	2,7	1,2	2,8	1,4	0,9	2,9	2	3,5	3,3	0,15	1,6	1000	0,5
23	54,3	1	1,8	3,9	1,3	1,8	2,8	0,35	0,6	1,8	2,2	0,9	3,1	1,5	0,4	2,4	1,6	2	3,1	0,3	1,3	0,5	1000
24	51,9	3,5	1,3	3,5	1,9	1,4	0,95	3	3,2	1,5	0,9	2,4	3,2	3,5	2,7	1,5	1,7	1,3	1,8	3,4	2,4	3,6	3,1

Fuente: Elaboración Propia

5.1.2 Construcción del Grafo

El siguiente grafo que se presenta en la figura 5.3 contiene las posiciones geográficas de los nodos de una ruta elegida de forma aleatoria, en este caso la Ruta 4-Villa Alemana. El grafo se construyó con la herramienta “Google Earth”¹¹ (versión gratuita). Cabe mencionar que el grafo que se presentara a continuación no contiene el nodo que representa el Centro de distribución, ya que, éste quedaba muy lejos del resto de los nodos y no era viable colocarlo en el mapa, pero si contiene los 39 nodos que representan al total de clientes de la ruta correspondiente.

Figura 5.3: Grafo representativo de los nodos de la Ruta 4-Villa Alemana



Fuente: Elaboración Propia

5.1.3 Filtro de la información (clientes)

En cada una de las rutas se hizo un filtro con respecto a los clientes, debido a que la información que contiene la base de datos de la empresa no se encuentra actualizada, en donde varios clientes que se encuentran en la base, ya no son clientes de la empresa. Algunos clientes fueron agrupados en nodos porque las direcciones de algunos coincidían en la

¹¹ Google Earth: Corresponde a un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital

ubicación geográfica que entrega Google Maps, lo que provoca que la distancia entre estos punto sea cero, lo que conlleva a errores en la ejecución del modelo ya que en la matriz de distancias no deben haber distancias entre dos nodos igual a cero.

5.2 Descripción del Modelo Matemático que se aplicara

El modelo se plantea como una herramienta que optimice las rutas y sus distancias. Se busca que este modelo determine el orden en que se va a los nodos en función de su localización geográfica y la distancia entre ellos. Como Cencocal abarca cada día un área concreta, esta herramienta se diseña para determinar las rutas a seguir por cada uno de los dos vehículos un día concreto, a partir de los clientes que han solicitado algún pedido.

El modelo matemático, se basa en el Problema del Agente Viajero (TSP), que consiste en hacer un recorrido que pase por n nodos, sin repetir ninguno y volviendo al nodo de partida de manera que la distancia total sea mínima. La formulación clásica de este problema es:

Figura 5.4: Formulación matemática del TSP

- Índices

$i =$ nodo de partida $i (1,2,\dots,n)$

$j =$ nodo de llegada $j (1,2,\dots,n)$

- Parámetros:

$D_{ij} =$ Distancia entre el nodo i y el nodo j

- Variables de decisión:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el vehiculo va del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0 & \text{En otros casos} \end{cases}$$

- Función objetivo:

$$\text{Min } \sum_{i,j} X_{i,j} * D_{i,j} \quad (1)$$

- Restricciones:

Ir a cada nodo una vez:

$$\sum_i X_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1 \dots n \quad (2)$$

Salir de cada nodo una vez:

$$\sum_j X_{i,j} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (3)$$

- Eliminación de sub-rutas de orden n

$$\sum_{i \in S, j \in S: i \neq j} X_{i,j} \leq |S| - 1; \quad \forall S \subset N: 2 \leq |S| \leq |N| - 1 \quad (4)$$

La variable de decisión solo puede tomar los valores de 0 o 1:

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.1 Observaciones del modelo matemático

La función objetivo (1) nos indica el mejor resultado que se puede obtener con respecto a minimizar las distancias de recorrido de los camiones dadas las condiciones del problema.

Analizando las restricciones, se puede distinguir que se indica que sólo debe haber una ruta de llegada a cada nodo (2) y que igualmente debe haber solo una ruta de salida de cada nodo (3); con esto se garantiza que cada nodo es visitado sólo una vez. Sin embargo, estas restricciones no son suficientes para garantizar que la solución entregada sea la ruta que se está buscando. Es posible por tanto, que aparezca una solución formada por sub-rutas conectadas entre sí y que cumplan las restricciones anteriormente comentadas, pero que no atiende a todos los nodos que se le está solicitando. Es por ello que es necesario añadir otra restricción que elimine la formación de sub-rutas (4). Por último se puede observar en la restricción (5), que la variable X_{ij} solo puede tomar números binarios, es decir, va a tomar un valor de “1” si el camión viaja de un nodo a otro, y tomara el valor de “0” cuando el camión no viaje de un nodo a otro.

5.3 Lingo: herramienta de resolución del problema

El modelo TSP propuesto debe ser programado en la herramienta Lingo. Esta programación tiene como resultado un código fuente, que es simplemente una secuencia de instrucciones que serán utilizadas por la aplicación cada vez que el programa se corra. Dependiendo del tamaño del problema y de la complejidad de la estructura de datos cargada, el tiempo que tarda la aplicación hasta encontrar una solución óptima puede ir desde segundos hasta días, esto considerando que el modelo TSP pertenece a la clase de problemas NP-Hards¹², lo que puede entenderse como muy complejos y de excesivo tiempo de cálculo para ser resueltos hasta conseguir la solución óptima.

En el Anexo 10.5 se presenta una imagen que representa la Licencia obtenida de manera gratuita por parte de LINGO por el periodo de 6 meses, esta versión corresponde a la “Extended”, la cual no tiene límites ni el numero de restricciones, ni de variables.

5.3.1 Estructura de un Modelo Lingo

“Un modelo programado en Lingo es una secuencia de instrucciones en un lenguaje de programación dado por la aplicación que será interpretado por sus solvers hasta llegar a un resultado. Como LINGO está diseñado para su uso con modelos de optimización, la

¹² NP-Hards: Por cada nodo agregado, los tiempos de iteración aumentan exponencialmente.

estructura de un programa típico se asemeja a la formulación matemática de estos. Luego este consiste en conjuntos de datos y variables junto con funciones que crean las ecuaciones con la función objetivo y restricciones a las cuales están sujetas estos modelos”.¹³

Dentro de la programación del modelo, existen diversas secciones, algunas son obligatorias como SET y DATA, existen también otras opcionales como INT y CALC, aparte de los comentarios a la programación.

La representación de las secciones se describe a continuación:

- La sección SETS: ENDSETS representa los conjuntos de datos que utilizara posteriormente el modelo. En general una sección de datos comienza con la sentencia SETS: y finaliza con ENDSETS. Conjuntos de datos son por ejemplo, clientes a visitar, ciudades a visitar, nodos, las demandas de estos, listas de productos, inventarios, entre otros. Cada conjunto de datos en particular permite definir variables de decisión, variables auxiliares e índices. La ventaja de definir conjuntos de esta forma es que si el modelo tiene varias ecuaciones que siguen un mismo esquema, se pueden introducir todas ellas como una única fórmula general.
- La sección DATA-ENDDATA permite definir conjuntos de objetos relacionados. Además esta sección es muy importante, ya que proporciona la posibilidad de aislar los datos de entrada (que se utilizaran para crear la instancia del modelo una vez que el código fuente sea interpretado por el solver¹⁴) en una sección separada de modelo. Con los datos independientes de modelo, es mucho más fácil hacer cambios. La sección de datos comienza con la sentencia DATA: y finaliza con ENDDATA.

Aparte de estas secciones, para poder estructurar el modelo es necesaria la utilización de diversas funciones y operadores que son las instrucciones para crear la instancia del modelo.

- Función objetivo: Se introduce precedida de $MAX =$, en el caso que se desee maximizar la función, o $MIN=$, en caso que se desee minimizar.
- Restricciones: Se incorporan utilizando las funciones $@SUM$ para crear las sumatorias, $@FOR$ para fijar un índice dentro de las ecuaciones, junto con un conjunto de operadores lógicos los cuales se presentan en la siguiente tabla:

¹³ Thompson A. (2013) Propuesta de mejora al sistema de distribución operacional de Melon Supercentro para el reparto de cemento envasado en la Región Metropolitana. (Trabajo de título de Ingeniería Civil Industrial, Universidad de Valparaíso).

¹⁴ Solver: Conjunto de solucionadores que trae incorporado lingo, para resolver diferentes tipos ecuaciones.

Tabla 5.1: Operadores lógicos utilizados en las restricciones

#EQ#	Igual
#NE#	Para distinto
#GE#	Para mayor o igual
#GT#	Para mayor estricto que
#LT#	Para menor estricto que
#LE#	Para menor o igual que

Fuente: Elaboración Propia, en base al Manual de Lingo

- Variables: A menos que se especifique lo contrario, las variables en un modelo LINGO son continuas y no negativas, más específicamente las variables pueden asumir cualquier valor real desde cero hasta el más infinito. En muchos casos este dominio para una función puede ser inapropiado. Por ejemplo puede necesitarse que una variable asuma valores negativos, o solamente valores enteros. Lingo está provisto de cuatro funciones de dominio de variables que permiten sobrepasar el dominio por omisión de una variable.

Tabla 5.2: Funciones de dominio de variable

@GIN	Limita la variable solo a valores enteros
@BIN	Hace una variable binaria (0 o 1)
@FREE	Permite que la variable tome cualquier valor real (positivo o negativo)
@BND	Limita la variable para que se ajuste a un rango finito

Fuente: Elaboración Propia, en base al Manual de Lingo

5.3.2 Sintaxis de un modelo en LINGO

La sintaxis para escribir los modelos en LINGO es muy sencilla y sus principales características se describen a continuación:

- Los nombres de las variables deben comenzar con un carácter alfabético (A-Z), los siguientes caracteres pueden ser alfabéticos, numéricos o subrayados. Los nombres pueden ser de hasta 32 caracteres de longitud.

- Cada línea en Lingo finaliza con un punto y coma (;). El punto y la coma son requeridos, el modelo no se resolverá si estos faltan.
- Se pueden introducir comentarios, que serán ignorados por LINGO, comenzando con un signo de exclamación (!) y terminando con un punto y coma. Los comentarios pueden ocupar varias líneas.
- Dado que la mayor parte de los computadores no tienen una tecla de menor o igual, Lingo ha adoptado como convención utilizar el símbolo \leq ó $<$ para representar esta restricción. Lo mismo se usa \geq ó $>$ para expresar mayor o igual.

5.3.3 Implementación del Modelo

La resolución del modelo cuenta de tres etapas, la programación del modelo, la carga de datos y finalmente la ejecución del modelo a través del programa.

Cabe mencionar en este punto que Lingo para hacer la resolución de los modelos, incorpora varios métodos de solución a través de los solvers que éste tiene incorporados. Los modelos TSP son clasificados por el *software* como problemas de programación lineal entera mixta (MILP), y para resolverlos utiliza el solver “Branch and Bound” (B and B), técnica que se suele interpretar como un árbol de soluciones, en donde cada rama nos lleva a una posible solución posterior a la actual. La característica de esta técnica con respecto a otras, es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para «podar» esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima.

5.3.3.1 Programación del modelo en Lingo

La programación del modelo se basa en el código fuente del TSP que viene incorporado en la librería de Lingo. En el anexo 10.6 se presenta de qué manera fue obtenido este código.

Con el propósito de explicar mejor como se realiza la programación del modelo en Lingo y también las siguientes etapas de la Resolución de modelo, se utilizara un ejemplo descriptivo que se presenta en la tabla 5.3, en donde se considerara un TSP con una matriz de dimensiones pequeñas (4 nodos).

Datos:

Tabla 5.3: Matriz de distancia de nodos (Km)

	N°1	N°2	N°3	N°4
N°1	0	702	454	842
N°2	702	0	324	1093
N°3	454	324	0	1137
N°4	842	1093	1137	0

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presenta el código fuente para resolver este problema:

MODEL:

! Problema del Agente viajero (TSP);

SETS:

NODO / 1.. 4/: U;

ARCO(NODO, NODO):

DISTANCIA, !Matriz de distancias Dij;

X; !X(i, j) = 1 si se usa el arco i,j;

ENDSETS

DATA:

DISTANCIA =

0	702	454	842
702	0	324	1093
454	324	0	1137
842	1093	1137	0

;

ENDDATA

N = @SIZE(NODO);

! Función objetivo = suma producto de la matriz de distancia por matriz X (variables);
[FUNCION_OBJETIVO]MIN = @SUM(ARCO: DISTANCIA * X); ! [1];

@FOR(NODO(K): !para una ciudad K;

```

!Se debe ingresar a cada nodo;
@SUM( NODO( I)| I #NE# K: X( I, K)) = 1;           ![2];

!Se debe salir de cada nodo;
@SUM( NODO( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;           ![3];

!Eliminación de los sub rutas;
@FOR( NODO( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:           ![4];
    U( J) >= U( K) + X ( K, J) -
    ( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
    ( N - 3) * X( J, K)
);
);
!X es una variable binaria;
@FOR( ARCO: @BIN( X));                             ![5];

! Por primera y última parada sabemos;
@FOR( NODO( K)| K #GT# 1:
    U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
    U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```

Cabe mencionar que el código fuente anteriormente expuesto no presenta ninguna variación con respecto al obtenido en la librería de LINGO.

Se puede ver que dentro del código se encuentran escritos números al lado de cada función, esto se hizo para asociar la codificación del TSP, con su formulación matemática que se encuentra en la Figura 5.4.

5.3.3.2 Carga de datos

En el ejemplo anterior se pudo ver que los datos de entrada fueron cargados directamente introduciendo la matriz dentro del código fuente, sin embargo, Lingo ofrece más opciones con respecto a la carga de datos que son más convenientes en el caso de utilizar matrices más grandes, con muchos nodos.

Con el objetivo de disminuir el tiempo de desarrollo de un modelo, el *software* Lingo brinda la comodidad de importar la distinta información y recopilar los datos del modelo, desde una amplia variedad de formatos. En esta medida Lingo guarda compatibilidad con:

Tabla 5.4: Formatos compatibilidad Lingo

Hojas de calculo	Excel Lotus
Bases de datos	Access Oracle DB/2 Paradox SQL Server
Archivos de texto separados en forma de lista o tabla	Word

Fuente: Elaboración Propia, en base al Manual de Lingo

La compatibilidad de Lingo con estos formatos permite separar la expresión del problema desde los datos, brindando una mayor flexibilidad al modelo de manera que hace fácil realizar cualquier modificación al problema, con una menor oportunidad de error.

En el presente trabajo, se utilizara la hoja de cálculo de Excel, ya que ahí están contenidas las matrices de distancias del modelo. Para ver como se enlazan los datos a un modelo en LINGO, se presenta el siguiente ejemplo:

`DISTANCIA = @OLE('\Users\Luciano\Desktop\Jueves Villa alemana Ruta 4.xlsx');`

El link OLE (Object Linking and Embedding), traducido (Objetos ligados y encajados) proporciona acceso al archivo xlsx llamado “Jueves Villa alemana Ruta 4” vinculándose con las celdas denominadas “DISTANCIA”. De esta manera en la ejecución de un modelo Lingo leerá los datos contenidos en este archivo.

Además de leer la información de una hoja de cálculo, Lingo permite escribir y así visualizar la información de la solución en una hoja de cálculo. De esta manera se pueden crear informes en Excel y se puede analizar la información de manera mucho más sencilla. El proceso se puede hacer automáticamente cuando se soluciona el modelo, o manualmente después de solucionarlo. Para exportar los resultados a una hoja de cálculo, se utiliza el mismo comando pero en distinto orden, de la siguiente manera:

`@OLE('\Users\Luciano\Desktop\Jueves Villa alemanaRta4.xlsx')=U,FUNCION_OBJETIVO;`

Esta función introduce automáticamente la información de la solución dada por el programa desde los data sets U y FUNCION_OBJETIVO dentro de los rangos del mismo nombre en el archivo de Excel llamado Jueves Villa alemana Rta4.xlsx.

En el anexo 10.7 se incluye el código fuente que finalmente se utilizara para el modelo TSP propuesto. Este código incluye las modificaciones con respecto al código utilizado como base. Estas modificaciones corresponden a que el código sea capaz de leer valores provenientes de hojas de cálculo, así como también sea capaz de escribir la solución en una hoja de cálculo.

5.3.3.3 Ejecución del Programa con el Modelo

Para ordenar a LINGO que resuelva el problema, se debe seleccionar el comando “Solve” del menú LINGO, o presionar el botón Solve de la barra de herramientas. Si no hay errores en la formulación del problema durante la etapa de compilación, LINGO invocara al modulo de resolución adecuado para buscar la solución optima.

En el anexo 10.8 se presenta la ventana de solución del ejemplo y un informe que presenta el orden de la ruta, los kilómetros existentes entre cada nodo y la reducción de costos.

Los resultados del ejemplo que se presento anteriormente se resumen a continuación:

La ventana que se abre, luego de que LINGO calcule el resultado, indica que la función objetivo es de 2713 Km, que hace un total de 10 iteraciones y que el tiempo total que se demora en obtener el resultado, no alcanza ni siquiera a ser 1 segundo.

Los que aparece debajo de la ventana, indica que la ruta que se debe se debe seguir es la siguiente:

Ruta → 1- 3-2-4-1 (1 equivale al nodo inicio y de termino de la ruta).

Capítulo VI: Validación y Análisis de Resultado

En este capítulo se realiza la verificación y validación del modelo matemático descrito en el capítulo anterior. También se exponen los resultados obtenidos por el software Lingo, los cuales son comparados con la actual metodología de ruteo de la empresa.

6. Validación y Análisis de resultados.

6.1 Verificación y Validación del modelo matemático.

Una vez realizados los ajustes correspondientes al código TSP de LINGO, se debe chequear que éste se esté interpretando correctamente, de tal forma que la función objetivo, variables y restricciones se apliquen de forma adecuada.

Para realizar la verificación debemos someter al modelo a diferentes pruebas, de tal forma de analizar el comportamiento de éste en determinadas circunstancias al cual está sujeto. Este chequeo puede ser realizado de diferentes formas como se presenta a continuación:

- Verificar los resultados del modelo, comparándolo con casos conocidos de la literatura (ejemplos de libros).
- Verificar los resultados del modelo, ante cambios de los parámetros de entrada (aumento o disminución en el número de nodos).

En este trabajo para la verificación del modelo se ha decidido en primer lugar, efectuar una carga de datos con un ejemplo del cual la solución es conocida. El objetivo de este paso es comprobar que la función objetivo como la ruta generada por el modelo, coincidan con la función objetivo y ruta entregada por la literatura.

En segundo lugar se ha decidido probar el modelo con una de las matrices del problema bajo estudio, la cual corresponde a la matriz de la ruta del día jueves de Villa Alemana. Se ha escogido esta ruta debido a que es un caso extremo, es decir, es la que tiene mayor cantidad de nodos (40 nodos) de todas las matrices del presente trabajo. El objetivo de este paso es comprobar que el modelo entregue una solución en un tiempo que sea razonable, por que como se menciona en el capítulo 3, el TSP pertenece a la clase de problemas *NP-Hards*, por ende, los tiempos de cálculos para encontrar una solución optima pueden ir desde segundos hasta días iterando, en donde claramente seria poco factible el modelo si el tiempo de ejecución fuese excesivo.

6.1.1 Comparación con un caso conocido en la literatura.

El *Travel Salesman Problem* es uno de los problemas más estudiados y del cual se tiene mayor información en la literatura, por ello podemos encontrar diferentes ejemplos con soluciones conocidas. Para probar el modelo se utilizaron 2 matrices obtenidas de “TSPLIB”, que es una página mantenida por Gerhard Reinelt, donde se encuentra una colección de instancias para el problema del agente viajero. Primero se ejecuto el modelo con una matriz de 26 nodos, de la cual se presenta un extracto en la tabla 6.1 y en segundo lugar con una de 42 nodos cuyos resultados se presentan en el anexo 10.9 resultados de matriz de prueba 42 nodos.

Se debe mencionar que en la siguiente instancia las distancias están en kilómetros y que la matriz es simétrica.

Tabla 6.1: Extracto de la matriz de 26 nodos utilizada para la validación del modelo LINGO.

Función Objetivo	937 [Km]						
	Ciudad 1	Ciudad 2	Ciudad 3	Ciudad 4	Ciudad 5	Ciudad 6	Ciudad 7
Ciudad 1	0	83	93	129	133	139	151
Ciudad 2	83	0	40	53	62	64	91
Ciudad 3	93	40	0	42	42	49	59
Ciudad 4	129	53	42	0	11	11	46
Ciudad 5	133	62	42	11	0	9	35
Ciudad 6	139	64	49	11	9	0	39
Ciudad 7	151	91	59	46	35	39	0

Fuente: <http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/datasets/tsp/tsp.html>

Estos datos fueron ingresados a la planilla Excel que está vinculada con el modelo programado en LINGO. Luego se procedió a resolver esta instancia, en donde el modelo propuesto entregó la mínima distancia que debe recorrer el agente viajero para atender a todas las ciudades, que es de 937 [Km], con un orden de secuencia que se muestra en la tabla 6.2. Cabe destacar que la solución encontrada no es única, ya que el modelo podría también haber entregado la misma secuencia en sentido inverso, esto se debe a que la matriz es simétrica, es decir, las distancias de ida y vuelta desde una ciudad a la otra son iguales. La tabla 6.2 presenta los resultados conocidos en la literatura versus los obtenidos con el programa.

Tabla 6.2: Comparación solución LINGO versus solución teórica de literatura.

	Solución teórica.	Solución LINGO
Distancia a recorrer por el viajante.	937 [Km]	937 [Km]
Ruta Óptima.	1→25→24→23→26→22→21→17 →18→20→19→16→11→12→13 →15→14→10→9→8→7→ 5→6→4→3→2→1	1→2→3→4→6→5→7→8→10 14→15→13→12→1116→19→ 20→18→1721→22→26→23 →24→25→1

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 6.2 se puede apreciar que el modelo LINGO entrega como resultado la misma distancia total de recorrido que la solución teórica, pero la ruta entregada no coincide, esto se debe a la simetría de los datos explicada en el párrafo anterior. Por lo tanto la ruta entregada por el modelo es la óptima y por ende *se pudo corroborar que el modelo TSP programado se ajusta a la solución teórica.*

También con esta instancia se pudo verificar que los ajustes que se le hicieron al código fuente del modelo fueron interpretados correctamente por parte del programa, importando los datos de entrada (matriz) desde planillas Excel y exportando los resultados (orden de ruta y función objetivo), a la planilla Excel indicada (datos de salida). En la figura 6.1 se muestran los datos entregados por LINGO.

Figura 6.1: Datos de salida entregados por LINGO

N15						
	A	B	C	D	E	F
1						
2				Función Obje.	Factor Rendimiento	Costo Ruta
3				937	133	\$ 124.254
4	Secuencia Lingo	Ciudades				
5		0 Ciudad 1				
6		1 Ciudad 2				
7		2 Ciudad 3				
8		3 Ciudad 4				
9		4 Ciudad 6				
10		5 Ciudad 5				
11		6 Ciudad 7				
12		7 Ciudad 8				
13		8 Ciudad 9				
14		9 Ciudad 10				
15		10 Ciudad 14				

Fuente: Elaboración Propia.

Se puede apreciar que gracias al vínculo “@OLE”, Lingo exporta los resultados si uno le asigna el nombre a la celda correspondiente en el Excel. En este caso se le está indicando que exporte el orden de la ruta y la función objetivo.

- Para la secuencia de atención, se debe asignar el nombre al rango donde queremos que el programa entregue los resultados. En este caso las celdas fueron nombradas como “U” debido a que en la programación del modelo original están denominadas así. En la figura 6.1 se puede apreciar un extracto del orden de la ruta en el rectángulo inverso que encierra a las cinco ciudades.
- En el caso de la función objetivo se debe hacer un procedimiento igual al del punto anterior, en este caso el nombre asignado en la planilla Excel esta denominado como (Funcion_objetivo).

Cabe mencionar que en la figura hay una celda denominada “factor rendimiento”. Esta denominada así porque corresponde a un número por el cual se va a obtener el costo total de la ruta en pesos. En simples palabras corresponde al cuociente entre el precio del combustible y el rendimiento del camión, de tal forma que para obtener el costo total de la ruta se debe recurrir a la siguiente fórmula:

Figura 6.2: Formula de costos de ruta.

$$\text{Costo ruta} = \text{Distancia recorrida} * \left(\frac{\text{Precio Diesel}}{\text{Rendimiento Camión}} \right)$$

Fuente: Elaboración Propia.

Esta fórmula debe ser utilizada debido a que los datos de las matrices están expresados en términos de distancia, pero cuando se realice la comparación de la metodología propuesta por este trabajo versus la metodología actual de la empresa, se debe realizar en costos de ruta.

6.1.2 Análisis de los tiempos de ejecución del programa con una matriz real del problema.

Una vez que se ha verificado que el modelo funciona bien comparándolo con un caso conocido en la literatura, es necesario chequearlo con datos reales del problema presentado en este trabajo de título, de tal forma, que se pueda comprobar que los tiempos de iteración sean razonables. Esto lo haremos porque las matrices del caso de estudio son considerablemente grandes en comparación a la matriz de la tabla 6.1 presentada anteriormente, para ello

tomaremos como referencia la matriz de la ruta del día jueves de Villa Alemana la cual consta de 40 nodos, y como se explico anteriormente, fue elegida porque es un caso extremo debido a que es la que tiene una mayor dimensión entre todas las matrices del presente trabajo. En la figura 6.3 se presenta un extracto de la matriz a utilizar.

Lo que se busca verificar en este punto es que:

- Los tiempos de resolución del problema sean aceptables para los requerimientos de la empresa, según este criterio se ha definido 20 minutos como máximo.

Figura 6.3: Extracto de matriz día jueves Villa Alemana

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	58.000	55.700	57.600	56.300	56.600	54.900	56.800	57.500	55.900	55.300	57.900	57.900	57.600	57.100	52.900	56.700	55.700	55.100	57.000
2	55.300	0	1.500	2.900	850	2.100	3.000	1.300	450	1.300	2.000	350	2.000	550	900	1.900	1.800	2.100	3.300	1.000
3	53.000	1.500	0	2.900	600	800	1.600	1.700	1.900	200	450	1.100	2.300	1.500	1.400	600	650	750	2.200	2.200
4	54.900	2.900	3.000	0	3.000	3.800	4.500	3.500	3.400	3.100	3.400	2.700	1.200	2.600	3.200	2.700	3.600	3.800	5.100	3.800
5	54.600	850	600	3.000	0	1.000	1.900	1.200	1.200	400	1.100	650	2.100	1.100	1.000	1.100	700	850	2.200	1.600
6	53.900	1.800	800	3.800	1.000	0	950	1.800	2.000	750	700	1.700	2.900	2.000	1.500	1.400	270	82	1.000	2.200
7	52.300	2.600	1.600	4.500	1.800	950	0	2.700	2.900	1.600	1.200	2.500	4.200	2.800	2.400	2.000	1.200	850	1.200	3.100
8	54.100	1.200	1.700	3.800	1.200	2.300	3.100	0	850	1.700	2.200	1.100	3.000	1.700	300	2.300	1.500	1.900	2.900	450
9	54.800	450	1.900	3.400	1.200	1.900	4.600	850	0	1.700	2.400	800	2.400	1.000	550	2.400	1.700	2.100	3.700	500
10	53.200	1.300	200	3.100	400	750	1.700	1.700	57.500	0	650	900	2.200	1.300	1.400	800	600	750	2.100	2.100
11	52.600	2.000	450	3.400	1.100	700	1.200	2.200	2.400	650	0	1.600	2.500	1.900	1.800	800	1.000	600	1.700	2.600
12	55.200	350	1.100	3.000	650	1.700	2.600	1.200	800	900	1.600	0	2.200	550	750	1.600	1.500	1.600	3.000	1.100
13	54.500	2.000	2.200	1.100	2.000	3.300	4.100	2.800	2.400	2.100	2.300	2.000	0	1.400	2.500	1.700	2.600	3.300	4.100	3.100
14	55.800	550	1.500	2.600	1.100	2.000	3.000	1.800	1.000	1.300	1.900	550	1.400	0	1.400	1.900	1.900	2.000	3.400	1.500
15	54.400	900	1.500	3.500	900	2.000	2.800	300	550	1.500	1.900	750	2.700	1.400	0	2.100	1.300	1.700	2.400	800
16	52.900	1.900	600	2.700	1.200	1.400	2.000	2.300	2.400	800	800	1.600	1.800	1.900	2.000	0	1.200	1.400	2.800	2.700
17	54.000	1.800	650	3.600	800	270	1.200	1.500	1.700	600	1.000	1.600	2.700	1.900	1.200	1.200	0	350	1.300	1.900
18	54.000	1.800	750	3.800	950	82	850	1.900	2.100	750	600	1.600	2.900	2.000	1.600	1.400	350	0	1.100	2.300
19	52.400	3.300	2.200	5.100	2.300	1.000	1.200	2.600	2.900	2.100	1.700	3.000	4.300	3.400	2.400	2.800	1.300	1.100	0	3.000
20	54.300	1.200	2.200	4.100	1.500	3.300	4.100	450	500	2.000	2.600	1.100	3.300	1.700	750	2.700	1.900	3.400	3.200	0

Fuente: Elaboración propia

En la figura 6.3 se presenta un extracto de la matriz que será utilizada para la verificación. Es necesario mencionar que los datos están expresados en metros y no en kilómetros, debido a que hay distancias que son muy pequeñas como la destacada en el rectángulo rojo de la figura, que redondearían a “0” si la matriz estuviera expresada en kilómetros. Claramente LINGO entregara el resultado de la función objetivo en metros, pero como se explico anteriormente los resultados son exportados a una planilla Excel en donde automáticamente se transforman a kilómetros y luego en costo de la ruta.

Luego de haber hecho esta aclaración se procedió a resolver esta instancia. La figura 6.4 muestra la ventana final del *solver*, en ella se puede ver que a través de 43.879 iteraciones se logró encontrar un resultado para la función objetivo que es de 124,387 kilómetros, en un tiempo de ejecución de 37 segundos. En esta ventana también se presentan otros datos, tales como: que el problema tiene 1.600 variables binarias, 1680 restricciones y 10.920 valores constantes.

Figura 6.4: Ventana final del solver de LINGO

Solver Status Model Class: MILP State: Global Opt Objective: 124387 Infeasibility: 1.42109e-013 Iterations: 43879		Variables Total: 1640 Nonlinear: 0 Integers: 1600	
Extended Solver Status Solver Type: B-and-B Best Obj: 124387 Obj Bound: 124387 Steps: 390 Active: 0		Constraints Total: 1680 Nonlinear: 0	
		Nonzeros Total: 10920 Nonlinear: 0	
		Generator Memory Used (K) 498	
		Elapsed Runtime (hh:mm:ss) 00:00:33	

Fuente: Elaboración propia.

El orden de la ruta queda indicado en un informe generado por Lingo denominado “*solution report*” (anexo 10.10), y también en el archivo Excel al cual está vinculado el modelo.

En la figura 6.5 se presenta el grafo correspondiente a los resultados obtenidos de esta instancia de prueba y en la tabla 6.3 se muestra el orden lógico de la ruta, como también la distancia de recorrido del vehículo según Lingo.

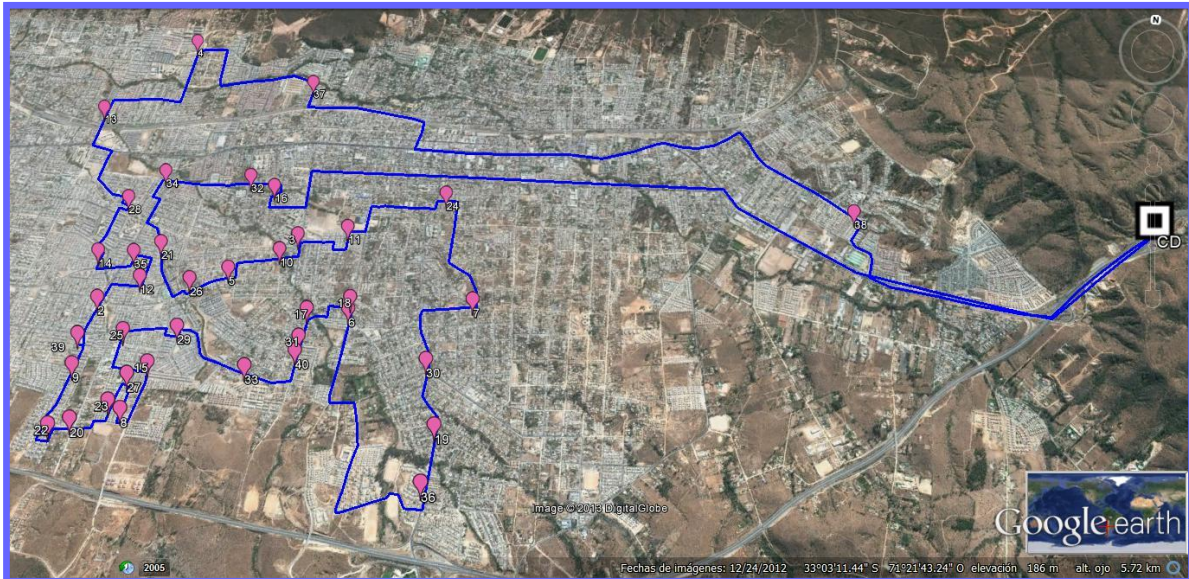
Tabla 6.3: Orden de ruta para el día jueves de Villa Alemana.

	Solución teórica.
Distancia a recorrer por el camión.	124,4 [Km]
Ruta Óptima.	CD→N16→N32→N34→N21→N26→N5→N10→N3→N11→N24→N7→N30→N19→N36→N6→N18→N17→N31→N40→N33→N29→N25→N15 N8→N27→N23→N20→N22→N9→N39→N2→N12→N35→N14→N28→N13→N4→N37→N38→CD

Leyenda: CD: Centro de distribución, N: Nodo, Km: kilómetros.

Fuente: Elaboración Propia.

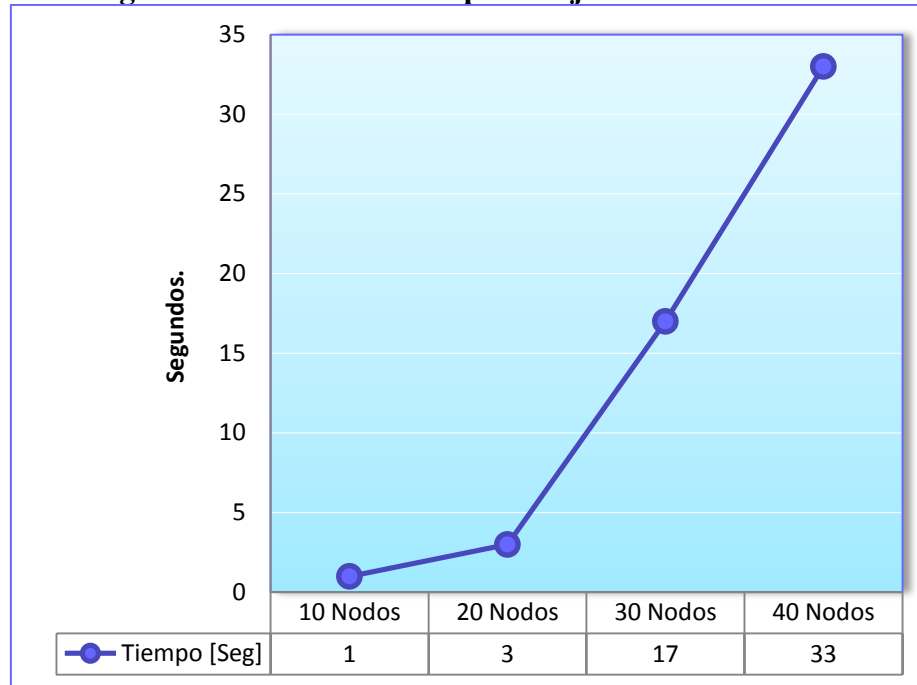
Figura 6.5: Grafo de recorrido ruta del día jueves Villa Alemana.



Fuente: Elaboración propia mediante *software Google Earth*.

En la figura 6.5 se puede ver el itinerario que debiese seguir el vehículo en el caso que todos los nodos soliciten ser atendidos. También se puede apreciar que los nodos del número dos al cuarenta están representados de color morado y que el nodo número uno está representado con el cuadrado denominado “CD” que corresponde al centro de distribución. Cabe mencionar que la verdadera ubicación geográfica del centro de distribución se encuentra en la localidad de Nogales, pero ha sido ubicada en ese lugar para efectos de visualización de todos los nodos.

Una vez ejecutada esta instancia, es necesario hacer ciertos cambios a la matriz de distancias para evaluar el comportamiento de los tiempos de iteración del modelo. Para ello se ha ajustado la matriz de la figura 6.3 quitándole ciertos nodos al azar, de tal forma de ejecutar el TSP con matrices de 10 nodos, 20 nodos, 30 nodos y 40 nodos. En la figura 6.6 se puede apreciar la variación del tiempo de ejecución en relación al número de nodos de la matriz.

Figura 6.6: Gráfico de tiempos de ejecución del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico de la figura 6.6 se puede apreciar claramente que los tiempos que tarda LINGO en resolver una instancia, van aumentando a medida que se incorporan más nodos a la matriz. En este caso para una matriz de 20 nodos el programa tarda 3 segundos en entregar la solución, aumentando a 33 segundos para una matriz con 40 nodos.

En base a lo anterior se puede afirmar que el modelo se ejecuta en un tiempo razonable para las diferentes instancias presentadas, las cuales no superan ni siquiera el minuto; considerando también que dentro del problema la matriz con una mayor cantidad de nodo es la ruta del día jueves de Villa Alemana (40 nodos). Por ende con respecto a los tiempos de ejecución consideramos aceptable el modelo, debido a que están muy por debajo del máximo establecido (20 minutos).

Por lo tanto podemos decir que **El modelo TSP programado en LINGO se ajusta al problema en estudio**, Debido a que se pudo verificar que:

- El modelo programado en LINGO entrega los mismos resultados al compararlo con un caso conocido en la literatura.
- Los tiempos de ejecución del TSP están muy por debajo del límite máximo establecido de por la empresa.

- El vínculo “@OLE” agregado al código fuente original fue interpretado correctamente por el modelo, importando las matrices a LINGO desde planillas Excel.
- El vínculo “@OLE” agregado al código fuente original fue interpretado correctamente por el modelo, exportando los resultados entregados por LINGO a planillas Excel.
- LINGO entrega resultados aceptables tanto en tiempo y en total de kilómetros recorridos al ser probados con las otras nueve matrices restantes del problema bajo estudio.

6.2 Análisis de resultados

Luego de haber verificado que el modelo planteado se ejecuta tal como lo programado se debe plantear una línea base, que corresponde a un marco de referencia de los costos actuales del sistema de distribución de la empresa. El propósito de hacer una línea base, es para realizar la comparación de los resultados de ésta, con los resultados del modelo de optimización de rutas propuesto. Todo este análisis es necesario para poder determinar si la metodología de ruteo de vehículos que se propone en este trabajo permite lograr mejoras.

6.2.1 Definición de la Línea base

Antes de comenzar a definir la línea base es necesario aclarar que el rutero va actualizando cada día la hoja de ruta, por ende, las rutas históricas se van eliminando y el archivo Excel donde se guarda el itinerario que deben seguir los vehículos, representa sólo el día actual que se está ruteando. Debido a esto, se le tuvo que pedir al rutero que durante el periodo de cuatro semanas (que corresponden al total del mes de Octubre del 2013), guardara las hojas de rutas diarias generadas en las ciudades bajo estudio. En el anexo 10.11 se presenta la hoja de ruta del día 17 de Octubre de Villa Alemana, a modo de ejemplo.

Lo anterior permitió obtener rutas reales que se realizaron en la empresa, y en base a ello se recopiló la información de dicho mes para crear la línea base. Cabe destacar que los camiones de la empresa llenan sus estanques en las estaciones de servicios “Shell”, y esta última le envía un reporte a Cencocal en un archivo Excel llamado “Enex cantidad de litros”. En este archivo se pueden encontrar los costos en combustible de todos los camiones de la empresa, como también los litros consumidos, los kilómetros (odómetro), entre otros datos. En el anexo 10.12 se presenta un extracto del archivo contenedor de la información proporcionada por Shell.

En base a la planilla anterior se pudo obtener los kilometrajes actuales de la empresa tanto diarios, semanales y mensuales para los dos camiones en el mes de octubre. Esto se puede ver en las tablas 6.4 y 6.5

Tabla 6.4: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.

Quilpué	Kilómetros recorridos				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	168	170	165	153	170
Semana del 14 al 18	164	178	171	159	156
Semana del 21 al 25	170	173	151	158	170
Semana del 28 al 1	173	180	162	164	157
Promedio Diario (Km)	169	175	162	158	163
Total Kilómetros Diario	166				
Total Kilómetros Semanal	828				
Total Kilómetros Mensual	3.311				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.5: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Villa Alemana.

Villa Alemana	Kilómetros recorridos				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	154	152	155	163	166
Semana del 14 al 18	155	155	157	152	171
Semana del 21 al 25	152	156	148	157	173
Semana del 28 al 1	158	150	158	153	171
Promedio diario (Km)	155	153	155	156	170
Total Kilómetros Diario	158				
Total Kilómetros Semanal	789				
Total Kilómetros Mensual	3.155				

Fuente: Elaboración Propia

Si se suman los resultados presentados en las tablas 6.4 y 6.5, se llega a que la distancia total recorrida entre ambos camiones para el mes de octubre del 2013 corresponde a 323 [Km] diarios, 1.616[Km] semanales y 6.466 [Km] mensuales. Con estas distancias recorridas por los vehículos, se calculan los costos de combustible de las rutas bajo estudio (Tabla 6.6 y tabla 6.7). Para ello se ha considerado un rendimiento por camión de 4,6 [Km/L] (valor proporcionado por los operarios, según información obtenida por la relación del tacómetro, con la cantidad de litros que hay en el estanque) y un valor de combustible Diesel de \$610 pesos el litro (valor del combustible para el mes de Octubre del 2013), con esto calculamos el costo de las rutas como:

Figura 6.7 : Formula de costos de ruta.

$$\text{Costo ruta} = \text{Distancia recorrida} * \left(\frac{\text{Precio Diesel}}{\text{Rendimiento Camión}} \right)$$

Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario aclarar que se ha decidido calcular los costos actuales de las rutas mediante la fórmula anterior, debido a que en la realidad el consumo de combustible del vehículo, no representa necesariamente la cantidad de kilómetros recorridos, por ejemplo: un camión estacionado con el motor encendido ó en un taco automovilístico, en ambos casos el motor está corriendo y consumiendo combustible pero la distancia recorrida es nula, afectando claramente en los costos de combustible. Por lo tanto para comparar la situación actual con la propuesta, ambas deben estar a prueba en similares condiciones, considerando que el modelo propuesto se basa en las distancias para calcular los costos.

A continuación se presentan en las tablas 6.6 y 6.7, el equivalente en costos de los kilómetros presentados anteriormente.

Tabla 6.6: Costos de combustible del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.

Quilpué	Costos (Pesos)				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	\$ 22.318	\$ 22.568	\$ 21.847	\$ 20.262	\$ 22.493
Semana del 14 al 18	\$ 21.703	\$ 23.629	\$ 22.730	\$ 21.119	\$ 20.742
Semana del 21 al 25	\$ 22.485	\$ 22.964	\$ 19.978	\$ 20.932	\$ 22.495
Semana del 28 al 1	\$ 22.889	\$ 23.834	\$ 21.522	\$ 21.692	\$ 20.846
Promedio diario	\$ 22.349	\$ 23.249	\$ 21.519	\$ 21.001	\$ 21.644
Costo Total Diario	\$ 21.952				
Costo Total Semanal	\$ 109.762				
Costo Total Mensual	\$ 439.048				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.7: Costos de combustible del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Villa Alemana.

Villa Alemana	Costos (Pesos)				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	\$ 20.372	\$ 20.143	\$ 20.517	\$ 21.581	\$ 22.055
Semana del 14 al 18	\$ 20.568	\$ 20.511	\$ 20.814	\$ 20.150	\$ 22.641
Semana del 21 al 25	\$ 20.099	\$ 20.636	\$ 19.689	\$ 20.814	\$ 22.966
Semana del 28 al 1	\$ 20.934	\$ 19.917	\$ 20.987	\$ 20.241	\$ 22.722
Promedio diario	\$ 20.493	\$ 20.302	\$ 20.502	\$ 20.697	\$ 22.596
Costo Total Diario	\$ 20.918				
Costo Total Semanal	\$ 104.589				
Costo Total Mensual	\$ 418.357				

Fuente: Elaboración Propia

Si se revisan los totales obtenidos en las tablas 6.6 y 6.7 se puede indicar que los costos de combustible totales de ambos camiones para el mes de octubre del 2013 corresponden a \$42.870 diarios, \$214.351 semanales y \$857.406 mensuales.

Una vez presentados los costos actuales de combustible de la empresa, se construye el marco de referencia (línea base), para los costos de distribución de la zona de estudio. En la tabla 6.8 se presentan detalladamente los costos de distribución considerados en esta línea base.

Tabla 6.8: Costos de distribución Mes de octubre 2013 (Quilpué y Villa Alemana)

Costos fijos	Sueldo Conductores (2)	\$900.000
	Sueldo Peonetas (4)	\$1.200.000
	Colación	\$ 186.000
	Total Costos fijos	\$ 2.286.000
Costos variables	<i>Combustible (Diesel)</i>	<i>\$857.406</i>
	Horas extras	\$290.908
	Peaje	\$312.800
	Parquímetro	\$14.956
	Total Costos variables	\$1.476.070
Costo Total	\$ 3.762.070	

Fuente: Elaboración Propia

6.2.2 Resultados de la Metodología Propuesta

Como se explico anteriormente se le solicito al rutero que guardara las hojas de rutas generadas en el mes de octubre, en base a esta información se procedió a calcular el kilometraje y el respectivo equivalente en costos según el *software* LINGO para el periodo de estudio. En las tablas 6.9 y 6.10 se presentan los kilómetros entregados por el programa para ambas ciudades, y en las tablas 6.11 y 6.12 se presentan el equivalente en costos de combustible de estas distancias.

Tabla 6.9: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Quilpué.

Quilpué	Kilómetros recorridos				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	122,90	123,49	125,79	124,23	129,93
Semana del 14 al 18	123,10	123,74	126,58	123,54	130,33
Semana del 21 al 25	122,23	123,50	124,77	124,57	131,20
Semana del 28 al 1	124,30	123,11	124,62	124,10	130,80
Promedio diario (Km)	123	123	125	124	131
Total Kilómetros Diario	125				
Total Kilómetros Semanal	627				
Total Kilómetros Mensual	2.507				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.10: Kilometrajes del mes de octubre del 2013, para la ciudad de Villa Alemana.

Villa Alemana	Kilómetros recorridos				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	133,57	129,91	126,73	122,24	130,48
Semana del 14 al 18	133,06	130,06	126,97	122,51	130,35
Semana del 21 al 25	133,51	130,20	126,60	123,32	130,49
Semana del 28 al 1	133,80	130,24	126,80	122,99	125,76
Promedio Diario (Km)	133	130	127	123	129
Total Kilómetros Diario	128				
Total Kilómetros Semanal	642				
Total Kilómetros Mensual	2.570				

Fuente: Elaboración Propia

Si se revisan los totales obtenidos en las tablas 6.9 Y 6.10 se puede decir que el total de distancias recorridas por ambos camiones para el mes de octubre del 2013 según LINGO corresponden a 254 [Km] diarios, 1.269[Km] semanales y 5.076 [Km] mensuales. Con estas distancias recorridas por los vehículos, se calculan los costos de combustible de las rutas en estudio (Tabla 6.11 y tabla 6.12). Para ello se debe considerar el mismo rendimiento y precio de combustible utilizado para calcular los costos de combustible de la línea base.

Tabla 6.11: Costos de combustible para la ciudad de Quilpué.

Quilpué	Costos (Pesos)				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	\$ 17.713	\$ 17.227	\$ 16.805	\$ 16.210	\$ 17.302
Semana del 14 al 18	\$ 17.645	\$ 17.247	\$ 16.837	\$ 16.246	\$ 17.285
Semana del 21 al 25	\$ 17.705	\$ 17.266	\$ 16.788	\$ 16.353	\$ 17.304
Semana del 28 al 1	\$ 17.743	\$ 17.271	\$ 16.814	\$ 16.309	\$ 16.677
Promedio diario	\$ 17.701	\$ 17.253	\$ 16.811	\$ 16.280	\$ 17.142
Costo Total Diario	\$ 17.037				
Costo Total Semanal	\$ 85.187				
Costo Total Mensual	\$ 340.749				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.12: Costos de combustible para la ciudad de Villa Alemana.

Villa Alemana	Costos (Pesos)				
Octubre de 2013	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Semana del 7 al 11	\$ 16.298	\$ 16.376	\$ 16.681	\$ 16.474	\$ 17.230
Semana del 14 al 18	\$ 16.324	\$ 16.409	\$ 16.785	\$ 16.382	\$ 17.283
Semana del 21 al 25	\$ 16.209	\$ 16.377	\$ 16.545	\$ 16.519	\$ 17.398
Semana del 28 al 1	\$ 16.483	\$ 16.326	\$ 16.525	\$ 16.456	\$ 17.345
Promedio diario	\$ 16.328	\$ 16.372	\$ 16.634	\$ 16.458	\$ 17.314
Costo Total Diario	\$ 16.621				
Costo Total Semanal	\$ 83.107				
Costo Total Mensual	\$ 332.428				

Fuente: Elaboración Propia

De las tablas 6.11 y 6.12 se puede indicar que los costos totales de combustible de ambos camiones para el mes de octubre del 2013 según la metodología propuesta corresponden a \$33.659 diarios, \$ 168.294 semanal y \$ 673.176 mensuales. También se debe indicar que las rutas calculadas en el periodo de estudio varían diariamente en el número de nodos a visitar, esto implica, que se generaron 20 itinerarios diferentes para Quilpué y 20 para Villa Alemana en el mes de Octubre. Con el propósito de dar un ejemplo ilustrativo de las rutas generadas, se ha decidido presentar los itinerarios que debiesen seguir de lunes a viernes los vehículos en el caso ejemplar de una semana en que todos los clientes (nodos) debiesen ser atendidos, los que se pueden ver en la figura 6.8. En el anexo 10.13 se presentan los grafos correspondientes a cada ruta generada y en el anexo 10.14 se presenta un grafo comparativo de la situación actual y la metodología propuesta para el día jueves 17 de octubre.

Figura 6.8: Secuencia de visita a los clientes.

Quilpué	Lunes	CD	N22	N21	N3	N16	N10	N25	N32	N4	N38	N9	N11	N8	N2	N14	N31	N24	N35	N27	N7
		N20	N36	N17	N13	N12	N33	N18	N5	N26	N28	N29	N37	N34	N23	N30	N15	N6	N19	CD	
	Martes	CD	N38	N17	N4	N39	N24	N36	N14	N18	N15	N23	N6	N22	N21	N5	N3	N34	N28	N10	N9
		N29	N7	N19	N35	N16	N25	N8	N31	N2	N33	N27	N13	N30	N11	N20	N26	N32	N40	N37	CD
	Miércoles	CD	N12	N32	N13	N18	N34	N14	N20	N24	N17	N40	N4	N11	N30	N8	N27	N36	N9	N7	N39
	N5	N31	N28	N38	N15	N2	N10	N33	N19	N37	N25	N23	N29	N35	N3	N26	N22	N6	N21	CD	
	Jueves	CD	N9	N5	N16	N12	N4	N8	N22	N29	N18	N26	N15	N7	N20	N2	N6	N24			
		N3	N11	N31	N32	N30	N19	N17	N14	N21	N33	N25	N27	N23	N13	N34	N28	CD			
	Viernes	CD	N28	N24	N26	N23	N25	N21	N8	N6	N17	N10	N13	N3	N18						
		N11	N4	N7	N12	N16	N19	N20	N14	N2	N15	N9	N5	N22	CD						
Villa Alemana	Lunes	CD	N4	N30	N24	N15	N19	N9	N25	N33	N31	N18	N27	N34	N6	N7	N8	N28	N29	N38	
		N16	N32	N11	N36	N20	N14	N3	N23	N2	N35	N12	N5	N22	N21	N10	N26	N37	N17	CD	
	Martes	N1	N26	N12	N29	N15	N9	N36	N16	N10	N3	N35	N37	N2	N6	N22	N30	N32	N18	N34	
		N13	N31	N17	N23	N28	N25	N7	N14	N8	N5	N11	N20	N33	N27	N19	N24	N4	CD		
	Miércoles	CD	N12	N28	N30	N18	N34	N36	N22	N4	N5	N32	N19	N23	N15	N24	N26	N16	N14	N20	
	N13	N6	N21	N11	N17	N25	N8	N31	N33	N7	N3	N27	N38	N9	N10	N35	N37	N2	CD		
	Jueves	CD	N16	N32	N21	N26	N5	N10	N3	N11	N24	N7	N30	N36	N19	N6	N18	N17	N31	N40	N33
		N29	N25	N15	N8	N27	N23	N20	N22	N9	N39	N2	N12	N35	N14	N28	N13	N4	N37	N38	CD
	Viernes	CD	N12	N26	N3	N2	N17	N11	N20	N4	N10	N14	N5	N7	N8	N18	N15				
		N27	N16	N6	N23	N29	N28	N19	N24	N25	N31	N22	N9	N21	N30	N32	CD				

Fuente: Elaboración Propia

Una vez presentados los costos de combustible de la metodología propuesta durante el periodo de estudio, se deben presentar los costos de distribución de igual forma como se hizo en la situación actual. Para ello en la tabla 6.13 se presentan los costos de distribución considerados en la metodología propuesta.

Tabla 6.13: Costos de distribución Mes de octubre 2013 (Quilpué y Villa Alemana)

Costos fijos	Sueldo Conductores (2)	\$ 900.000
	Sueldo Peonetas (4)	\$ 1.200.000
	Colación	\$ 186.000
	Total Costos fijos	\$ 2.286.000
Costos variables	<i>Combustible (Diesel)</i>	<i>\$ 673.176</i>
	Horas extras	\$ 0
	Peaje	\$ 312.800
	Parquímetro	\$ 14.956
	Total Costos variables	\$ 1.000.932
Costo Total	\$ 3.286.932	

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 6.14 es necesario esclarecer que los costos de horas extras de la metodología propuesta no se han corroborado en la práctica, debido a que el presente trabajo es solo una propuesta de mejora y dependerá del criterio de la empresa si se aplica o no.

Con respecto al tema de las horas extras, es necesario explicar que actualmente la empresa para lograr hacer los despachos correspondientes a cada día, necesita incurrir en el pago de horas extras hacia los choferes y peonetas. A pesar de que el tiempo no supera los 25 minutos (generalmente ocurre de lunes a jueves), al sobrepasar las 8 horas diarias de trabajo, este tiempo ya es considerado como una hora extra en la jornada laboral. En el caso de que se implementara la metodología propuesta, los kilómetros recorridos disminuirían aproximadamente en 30 kilómetros diarios por ruta; si consideramos que el camión en la ciudad circula a máximo 50 Km/Hr, obtenemos entonces un ahorro de aproximadamente media hora por ruta, por lo que en la mayoría de las ocasiones no sería necesario incurrir en esa “hora extra”. Es por este motivo que hemos establecido que con la metodología propuesta no debiesen existir horas extraordinarias.

6.2.3 Resultados de la Metodología Propuesta vs. Situación Actual.

En base a los resultados expuestos anteriormente, se creó un cuadro comparativo en donde se muestra la mejora en el sistema de distribución que podría obtenerse con la aplicación de la metodología propuesta. La tabla 6.14 muestra la información referente al periodo de estudio y las tablas 6.15 en adelante muestran un detalle de los ítems más relevantes de la tabla 6.14.

Tabla 6.14: Comparativa Situación Actual vs. Metodología Propuesta

Variables	Mes octubre 2013	
	Situación Actual	Situación Propuesta
Distancias Recorridas	6.466 [Km]	5.076 [Km]
Tiempo de Asignación de rutas	40 Hrs	13 Hrs
Costos Combustible	\$857.406	\$673.176
Costos Horas extras	\$290.908	\$0
Total Costos de distribución	\$ 3.762.070	\$ 3.286.932
Impacto de los costos de combustible en los costos de distribución.	22,79 %	20,48 %

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 6.14 se puede apreciar que los ítems expuestos son mejorados con la metodología propuesta. También hay que mencionar que se ha planteado el indicador “Impacto de los costos de combustible en los costos de distribución”, que básicamente hace referencia al porcentaje que representan los costos de combustibles de los costos totales de distribución, según la línea base establecida.

6.2.3.1 Cuadro comparativo: Total kilómetros recorridos (por los camiones pertenecientes a las 2 ciudades bajo estudio), de la metodología actual versus metodología propuesta.

A continuación en la tabla 6.17 se detalla la comparación de kilómetros de la ruta actual versus la ruta óptima generada por la metodología propuesta.

Tabla 6.15: Impacto en los kilómetros recorridos.

Kilómetros recorridos	Promedio estimado			
	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Situación actual	323	1.616	6.466	77.588
Situación Propuesta	254	1.269	5.076	60.917
Kilómetros disminuidos	69	347	1.390	16.671
Porcentaje de disminución	21,49%			

Fuente: Elaboración Propia.

6.2.3.2 Cuadro comparativo: Costos de combustible ruta actual versus ruta propuesta.

En la tabla 6.18 se presenta el porcentaje de disminución en relación al combustible consumido, que entrega la metodología propuesta v/s la situación actual.

Tabla 6.16: Impacto en los costos de combustibles.

Costos de combustible	Promedio estimado			
	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Situación actual	\$ 42.870	\$ 214.351	\$ 857.406	\$ 10.288.869
Situación Propuesta	\$ 33.659	\$ 168.294	\$ 673.176	\$ 8.078.113
Ahorro de costos	\$ 9.211	\$ 46.057	\$ 184.230	\$ 2.210.756
Porcentaje de disminución	21,49%			

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto con respecto a las tres tablas anteriores, se puede decir que:

- Las distancias de recorrido de los camiones se reducen en un 21,5%, lo que trae como efecto que los costos de combustible se reduzcan en la misma proporción como lo explicamos anteriormente.

- El tiempo de asignación de rutas se reduce de considerablemente si se considera que actualmente el rutero se demora aproximadamente 1 hora en asignar una ruta, mientras que con la utilización de Lingo, los tiempos no sobrepasan el minuto con las rutas actuales, y si se considera un incremento en el número de nodos en el futuro para algunas de las rutas, se podría llegar a requerir como máximo, un tiempo de asignación de rutas por parte de Lingo de 20 minutos (matrices con más de 45 nodos).
- El ahorro en costos de combustible corresponde a \$184.230 mensuales, con un equivalente anual de \$ 2.210.756.
- El impacto de los costos de combustible en los costos totales de distribución se reduce de 22,8% a 20,5%, es decir, dos puntos porcentuales más abajo.

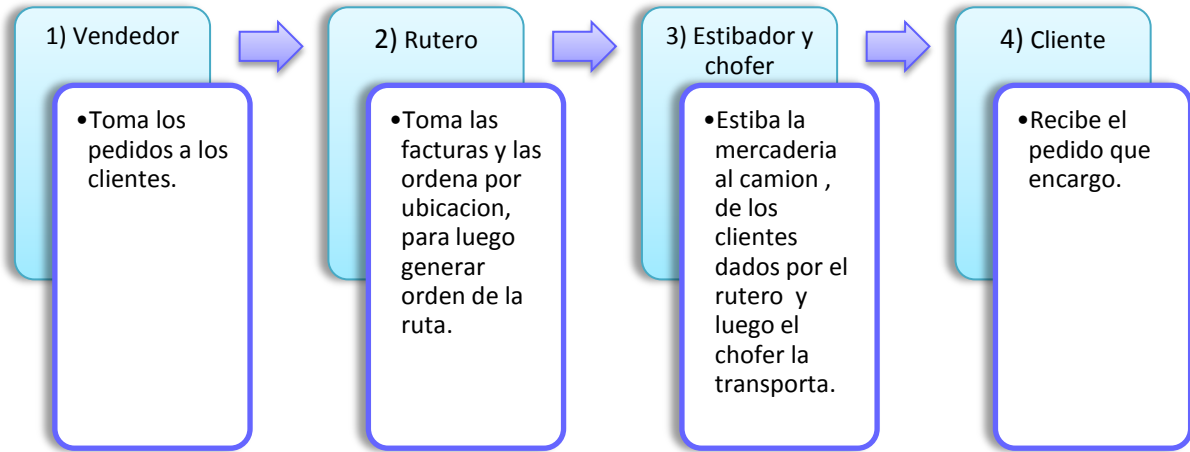
Para finalizar es necesario analizar el nivel de incumplimiento en la entrega, pero se debe mencionar que éste no se ha comprobado en la práctica al igual que los costos de horas extras, debido a que el presente trabajo es solo una propuesta de mejora y dependerá del criterio de la empresa si se aplica o no.

6.2.4 Nivel de incumplimiento de entrega

Con incumplimiento de entrega nos referimos a la situación en donde el pedido solicitado por un cliente, no es entregado en la fecha correspondiente. Esto se puede dar en los siguientes casos:

- Error en la planificación de las rutas por parte del rutero
- Error al momento de estibar la carga
- Casos fortuitos en donde el cliente a atender no esté disponible para la entrega del pedido

A continuación se muestra un esquema en el que se presenta de manera simplificada el sistema actual de distribución que tiene la empresa, desde el punto de vista de los “actores principales” dentro de este proceso, en el cual además se pueden apreciar los posibles responsables de que se produzca un incumplimiento en la entrega del pedido.

Figura 6.9: Simplificación del Sistema de distribución actual de Cencocal

Fuente: Elaboración Propia

Dentro del proceso de distribución la actividad realizada por el rutero, es donde principalmente se producen errores que se traducen en un incumplimiento de la entrega del servicio. La tarea del rutero cómo se menciona en la figura, es tomar todas las facturas correspondientes a los pedidos de todos los clientes, analizarlas y según la ubicación de estos dentro de cierto sector, crea un orden de despacho. En esta parte que al rutero muchas veces se le traspapelan las facturas, (considerando que en algunas rutas son hasta más de 50 clientes, no así nodos), lo que provoca que en algunos casos no considere 1 o 2 pedidos cuando genera el orden de la ruta, y como esta información luego es mandada al centro de distribución para que se estiben los pedidos y luego se transporten para llevarlos hasta el cliente, se produce un efecto en cadena que termina en que el pedido no sea recibido por el cliente. A esta causa es a la que se le denomina “Error en la planificación de las rutas por parte del rutero”.

Los otros dos casos por los cuales se puede producir un incumplimiento de la entrega (“Error al momento de estibar la carga”, “Casos fortuitos en donde el cliente a atender no esté disponible para la entrega del pedidos”), no se examinarán más allá, ya que la probabilidad de ocurrencia es baja.

A continuación se presenta la tabla 6.10, en donde se lista el nivel de incumplimiento de entrega de la situación actual para el mes de estudio. Cabe aclarar que éste hace referencia a los pedidos que no fueron entregados en el día que fueron solicitados, pero esto no implica que el pedido no sea enviado dentro de la semana al cliente, es decir, cuando en la empresa ocurren estos incumplimientos por lo general el pedido es enviado al día siguiente al cliente. Esto conlleva a que el camión se salga de la ruta que debe atender en el día, para dirigirse a

reponer el pedido no entregado del día anterior, trayendo como consecuencias un aumento en el número de kilómetros recorridos, como también en las horas extras trabajadas.

Tabla 6.17: Nivel de Incumplimiento de entregas

Octubre	7 al 11	14 al 18	21 al 25	28 al 1	Porcentaje promedio
Clientes a Visitar	403	410	438	425	100%
Clientes Visitados	398	406	429	419	98,6%
Clientes no Visitados	5	4	9	6	1,43%
Porcentaje semanal	1,24 %	0,98 %	2,05 %	1,41 %	

Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente tabla se presenta la comparación del Nivel de incumplimiento de entregas de la situación actual v/s la metodología propuesta.

Tabla 6.18: Resultado promedio de indicadores

Indicadores	Actual	Propuesta
Nivel de incumplimiento de entregas (Mensual)	1,43%	0%

Fuente: Elaboración Propia.

Para el caso del nivel de incumplimiento en la entrega, hemos establecido que no debiesen generarse este tipo de problemas debido a que con el modelo de optimización propuesto, el rutero tendrá que asignar en el archivo Excel los clientes que deben ser atendidos y en el mismo archivo se entrega orden en cual deben ser visitados los clientes. A diferencia del sistema actual explicado anteriormente, en donde todo se realiza de manera manual incurriendo de esa manera en errores humanos.

Capítulo VII: Factibilidad de la propuesta

En este capítulo se evalúa económicamente los costos e inversiones de la metodología propuesta. De tal forma que se verifique a través de algún indicador económico que lo propuesto cumple el objetivo de disminuir los costos de distribución.

7. Factibilidad de la propuesta.

En el capítulo V es presentado un nuevo sistema de ruteo para la empresa bajo estudio. Este sistema tiene asociados una disminución de los costos actuales de distribución que posee la empresa, y una inversión para su puesta en marcha.

La propuesta consiste en adquirir un *software* que cambiaría todo el sistema de ruteo actual de la empresa haciendo este proceso automatizado. Para justificar que la propuesta es rentable económicamente se evaluarán los costos e inversiones implicadas, mediante el indicador económico “VAC” (Valor Actual de Costos), debido a que se parte de la base de que los ingresos de la empresa con la implementación de la propuesta serían los mismos que los de la situación actual y por tanto irrelevantes de ser considerados, por lo que debe seleccionarse la alternativa que tenga el menor valor actualizado de sus costos.

A continuación se presenta una tabla en donde en la primera columna se muestran todos los requerimientos necesarios para la implementación de la propuesta y en la segunda columna se indica si este requerimiento está o no actualmente en la empresa. En el caso de que no esté, habrá que realizar un desembolso para su adquisición.

Tabla 7.1: Requerimientos para la implementación de la propuesta y su disponibilidad.

Requerimientos	Disponibilidad
Licencia Lingo	No
Licencia Office	Si
Computador	Si
Operario computador	Si

Fuente: Elaboración Propia

En base a la tabla anterior se puede indicar que la única inversión necesaria para la implementación de la propuesta, corresponde a la Licencia de Lingo, ya que todos los demás requerimientos ya se encuentran en la empresa. Con respecto al operario, este sería el mismo que actualmente cumple la labor de rutero, ya que tiene un dominio en office suficiente para ser capaz de operar las planillas Excel con los datos.

La inversión sería entonces:

\$1.596.335 pesos

Este dinero corresponde al precio de la Licencia de Lingo para la versión Industrial. (Las distintas versiones de Lingo, con sus respectivos precios, se presentan en el anexo 10.15). Se escogió la versión Industrial en su forma base ya que la cantidad de variables (32.000) y restricciones (16.000) que ofrece son más que suficientes para resolver las matrices de distancias con las que se trabaja. Cabe mencionar que el precio de la licencia expresado en pesos, fue calculado considerando el valor del dólar para el día 03 de Diciembre del 2013, el cual corresponde a US\$ 533 (El precio en dólares de la licencia es US\$ 2.995).

En el anexo 10.17 se presenta en detalle un cuadro de amortizaciones para el financiamiento de la inversión mediante una entidad bancaria en un plazo de 12 meses, y en el Anexo 10.16 se presenta en detalle el VAC tanto de la Situación Actual, como el de la Metodología propuesta. Como se menciono anteriormente lo que se busca es encontrar la alternativa más conveniente para la empresa, en términos de menores costos.

El resultado de la alternativa 1 que corresponde a conservar el actual sistema de ruteo de la empresa, se presenta a continuación:

- VAC = -\$ 30.332.132

El resultado de la alternativa 2 que corresponde a la adquisición de un programa que optimice el cálculo de las rutas, se presenta a continuación:

- VAC=-\$ 28.180.459,66

Al comparar los VAC obtenidos por ambas alternativas se pueden distinguir dos cosas:

- a) Que la alternativa 2 en un plazo de 12 meses permite la recuperación total de la inversión.
- b) La alternativa 2 aun implicando un gran desembolso de dinero (inversión) al final del periodo (12 meses) logra obtener ahorros en cuanto a los costos.

Por lo tanto si la empresa invierte en la metodología propuesta seguirá teniendo utilidades, ya que, incluyendo la inversión los costos siguen siendo menores a los costos actuales.

Capítulo VIII: Conclusiones

En este capítulo se presenta las conclusiones que se pueden desprender de este trabajo, así como también las recomendaciones pertinentes.

8. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se cumple el objetivo general, ya que, si se aplica la metodología propuesta se puede producir un ahorro del 21,5% en los costos actuales de combustibles para las rutas de Quilpué y Villa Alemana, lo que en términos monetarios representa un equivalente de \$ 2.210.756 anuales en ahorro de combustible.
- Los kilómetros recorridos por los vehículos disminuyen, lo que tiene como efecto directo la reducción de los tiempos de recorrido de las rutas. Lo anterior implicaría que la empresa no tendría que pagar la hora extra que actualmente se les paga a los choferes y auxiliares entre los días lunes y jueves.
- La nueva metodología proporciona un modelo de optimización (basado en bibliografía conocida), que le permitirá a la empresa bajo estudio disminuir la incertidumbre en cómo realizar sus operaciones diarias de reparto dejando de lado los métodos basados en la intuición y la experiencia de los trabajadores.
- El impacto de los costos de combustible en los costos totales de distribución se reduce de 22,8% a 20,5%, es decir la metodología propuesta permite reducir en más de dos puntos porcentuales los costos de distribución que actualmente manejan en la empresa.
- La metodología propuesta proporciona una herramienta sencilla y de fácil aplicación que logra mejores resultados respecto a la situación actual. Además se ajusta a la realidad diaria de la empresa, permitiendo agregar o quitar clientes dependiendo si estos realizan o no pedidos.
- El tiempo dedicado al ordenamiento de la ruta disminuye considerablemente con la implementación de Lingo. Esta diferencia de tiempo que puede ser destinada a otras actividades como por ejemplo el cálculo de rutas de otras ciudades en donde atiende la empresa.
- El incumplimiento con respecto a la entrega de productos disminuiría, ya que, el sistema propuesto evitaría que se produjeran errores en cuanto a la planificación de las rutas por parte del rutero, puesto que esta tarea se realizaría de forma automatizada.
- Se comprobó que el sistema propuesto es rentable económicamente, a través del indicador económico VAC, ya que al cabo de un año los costos totales (en valor actual) de distribución disminuyen en más de 2 millones, además de que se logra la recuperación total de la inversión en el mismo periodo.

A continuación se presentan ciertas observaciones que se deben tener en consideración:

- Para poder llevar a cabo la metodología propuesta, se requiere hacer una inversión, no menor, que consiste en comprar el *software* de optimización LINGO.
- Se debe tener en consideración que no se evaluó cómo se comportaría el sistema en estados excepcionales o muy extremos, ya que se determinó que estos o bien no han ocurrido, o podrían ocurrir en forma aislada. Como por ejemplo, que por algún motivo los vehículos no pudiesen transitar libremente por las calles de la ciudad.
- Se debe tener en consideración supuestos que se hicieron para obtener ciertos datos de entrada, como las matrices de distancias, que se han confeccionado en base a la información proporcionada para la distancia sobre caminos por Google Maps.
- Por último se debe tener en consideración que los costos de combustible, se calcularon en base a un rendimiento promedio y a un valor de litro de combustible promedio.

Recomendaciones

- Según los resultados obtenidos del trabajo de estudio, parece recomendable para la empresa la utilización de herramientas de ruteo, como la que aquí se desarrolló para el manejo de sus rutas de distribución.
- Se recomienda mantener actualizada la información de las matrices de distancia. El estudio de los parámetros se debe ajustar y afinar de manera de tener valores representativos al momento de realizar los ruteos.
- En cuanto a los incidentes, tema que no se consideró para la realización del modelo, sería interesante estudiar cómo afectaría al ruteo la existencia de una cantidad de incidentes. Por ejemplo, se podría estudiar cómo cambian los resultados cuando ocurre algún accidente dentro del perímetro en el cual circula un camión de la empresa.
- Se recomienda llevar el sistema propuesto al resto de las ciudades en donde actualmente distribuye la empresa. Para ello se tendrían que crear nuevas matrices de distancia en base a la ubicación geográfica de los clientes de esas ciudades, mediante la herramienta Google Maps. Esto conllevaría un gran beneficio en cuanto ahorro en combustible para Cencocal.

Capítulo XI: Bibliografía

En este capítulo se presentan las diferentes fuentes de donde se obtuvo información para la realización del presente trabajo

9. Bibliografía

[Ballou, 04] Ballou, R. H. Logística. Administración de la cadena de suministro. México: Prentice Hall. Pearson Educación, 2004

[Beasley, 83] Beasley, J: Route first . Cluster second methods for vehicle routing. Omega 11, 1983.

[Bowersox et al, 06] Bowersox, D. J., Closs, D. J. & Bixby Cooper, M. Supply Chain Logistics Management. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2006.

[Bodin et al, 83] Bodin, L., Golden, B., Assad, A., Ball, M. Routing and scheduling of vehicles and crews the state of the art. Computers & Operations Research 10, 1983.

[Céspedes & Schultz, 12] Céspedes y Schultz. Diseño y Desarrollo de un Modelo de Asignación para la Optimización de Rutas de Distribución de la Empresa Disecom S.A. *Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil Industrial*. Universidad de Valparaíso, 2012

[Colomi et al, 91] Colomi, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. Distributed optimization by ant colonies. In Varela, F., Bourgine, P., eds.: Proceedings of the European Conference on Artificial Life, Elsevier, Amsterdam, 1991.

[CSCMP , 08] Council of Supply Chain Management Professionals. «Definición de Gestión Logística» (en inglés), 2008.

[Clarke & Wright, 64] Clarke, G., Wright, W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. Operations Research 12, 1964

[Muñoz, 07] Duarte Muñoz A., “Metaheurísticas”. Librería-Editorial Dykinson, 2007

[Duran & Cortes, 08] Durán y Cortes,. Sistema de apoyo a las decisiones de ruteo marítimo para un proveedor de alimentos para salmones. *Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil Industrial*. Universidad de Chile, 2008.

[Farias, 11] Farias D. Optimización de las rutas de recolección para contenedores de los Sectores Puerto y Bancario de la Ciudad de Valparaíso. *Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil Industrial*, Universidad de Valparaíso, 2011.

[Teran, 10] González Teran,. Diseño de un modelo para la asignación y ruteo de las bombas estacionarias desde las plantas de concreto de holcim (colombia) s.a, zona Bogotá. *Trabajo para optar al título de Especialista en Gerencia en Logística Integral*, Universidad Militar Nueva Granada, 2010.

[Dantzig et al, 54] Dantzig, R. Fulkerson, & S. Johnson. Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1954 Vol. 2, No. 4, 393 – 410.

[Ghiani G et al, 03] Ghiani G., Laporte G., Musmanno R., Introduction to Logistics Systems Planning and Control. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2003.

[Glover, 86] Glover, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research* 13, 1986.

[Hernández, 12] Gonzalo Hernández. Modelamiento de Sistemas de Distribución. *Apuntes de Clase, Investigación de Operaciones*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso, 2012.

[Hillier; Lieberman, 99] Hillier Frederick S., Lieberman Gerald J., “Introducción a la Investigación de Operaciones”, Editorial Mc Graw Hill, México D.F., 1999.

[Martin, 03] Martin, M. *Investigación operativa*. Madrid: Pearson Educación S.A, 2003.

[Prawda, 04] métodos y modelos de investigación de operaciones, volumen 1, prawda juan, mexico editorial limusa s.a 2004.

[Taha, 04] Taha, H. A. *Investigación de Operaciones* (7a. ed.). Mexico: Pearson Educación. 2004.

[Thompson, 13] Andrés Thompson. Propuesta de mejora al sistema de distribución operacional de Melón Supercentro para el reparto de cemento envasado en la Región Metropolitana. (Trabajo de título de Ingeniería Civil Industrial, Universidad de Valparaíso), 2013.

LINDO Systems Inc. (2004). *LINGO User's Guide*. Chicago: LINDO Systems Inc:

Empresa Cencocal: S.A [www.Cencocal.c]

Pagina web [<http://www.google.com/earth>]

Pagina web [www.googlemaps.com]

Capítulo X: Anexos

En este capítulo se presenta información como resultados de la memoria.

10. Anexos

Anexo 10.1: Modelos de los camiones de la empresa

Cantidad	Marca	Modelo
2	MERCEDES BENZ	AC 915
11	MERCEDES BENZ	ACC 915
2	MERCEDES BENZ	VITO 111CDI
2	MERCEDES BENZ	SPRINTER
1	MERCEDES BENZ	SPRINTER 413
1	MERCEDES BENZ	1315/C
2	MERCEDES BENZ	1720/C48
3	MERCEDES BENZ	1520/C48
1	MERCEDES BENZ	ATEGO-1725
1	MERCEDES BENZ	ATEGO-1315
1	MERCEDES BENZ	ATEGO-2425
2	MERCEDES BENZ	ATEGO-1015
1	MERCEDES BENZ	ATEGO-1518
1	MERCEDES BENZ	AXOR-2533
3	MITHSUBISHI	CANTER
1	FORD	F.14000
1	TREMAC	
1	FORD	CARGO 1516
1	FORD	CARGO 1516
1	FORD	CARGO 1416
1	CHEVROLET	NPR-4.9
1	CHEVROLET	NKR-69
2	CHEVROLET	NQR-918
1	FREIGHTLINER	M2-106
1	KIA	FRONT 2.7
1	SUZUKI	ATEGO-1016
1	SUZUKI	ATEGO-1017

Fuente: Elaboración propia, en base a información proporcionada por Cencocal.

Anexo 10.2: Representación visual de OptiMap.

OptiMap - Más rápido de ida y vuelta Solver

Destinos

Agregar ubicación de Dirección:

 Añadir!

o añadir a granel por dirección o (lat, lng).

- 33.038592,-71.395917
- 33.03414,-71.399414
- 33.050677,-71.397837
- 33.044761,-71.374333
- 33.039421,-71.34842
- 33.035954,-71.36395
- 33.044438,-71.355611
- 33.041438,-71.367692
- 33.038839,-71.361807
- 33.020440005366,-71.3600343403

ANADE de Lista De Localizaciones

Opciones de ruta

Anexo 10.3: Ejemplo de cómo funciona el software What's Best, con un modelo TSP.

- Matriz de distancia de ejemplo

Matriz de Distancias					
	Ciente 1	Ciente 2	Ciente 3	Ciente 4	Ciente 5
Ciente 1	80000	8	5	3	5
Ciente 2	8	80000	1	5	9
Ciente 3	4	1	80000	7	2
Ciente 4	3	5	6	80000	6
Ciente 5	7	9	2	9	80000

- Definición de la matriz binaria de decisión: Variable Xij

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table titled "Matriz Binaria Xij" and a dialog box titled "Integer - Binary".

The table "Matriz Binaria Xij" has the following data:

	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5
Cliente 1	0	0	0	0	0
Cliente 2	0	0	0	0	0
Cliente 3	0	0	0	0	0
Cliente 4	0	0	0	0	0
Cliente 5	0	0	0	0	0

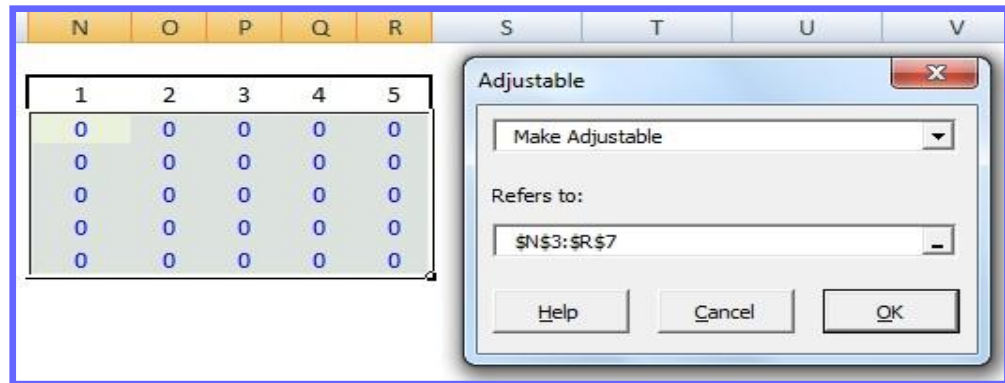
The "Integer - Binary" dialog box shows the following settings:

- Binary Names in Workbook: WBBINxij
- Refers to: \$C\$5:\$G\$9
- Integer Type: Binary - WBBIN, General - WBINT

- 1° Restricción: Continuidad de ruta

1	0	Not =	1	1	2	3	4	5
2	0	Not =	1	0	0	0	0	0
3	0	Not =	1	Not =	Not =	Not =	Not =	Not =
4	0	Not =	1	1	1	1	1	1
5	0	Not =	1					

- Definición de la variable auxiliar Y_{ij} (para la eliminación de las sub-rutas)

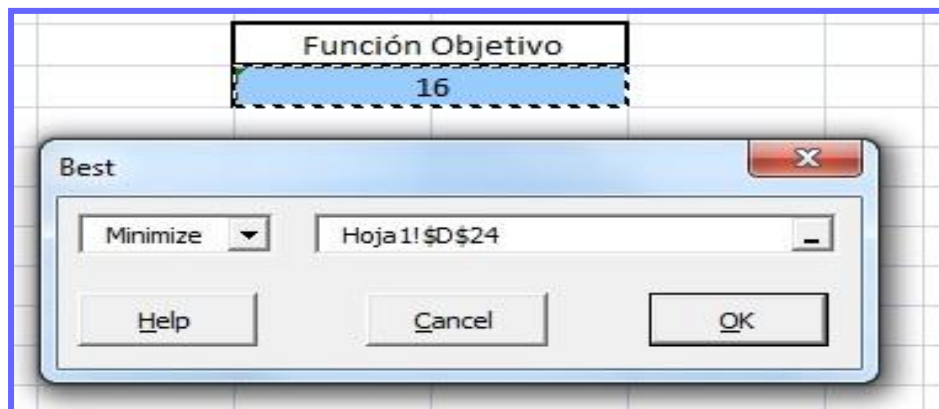


- Restricción de eliminación de sub-rutas

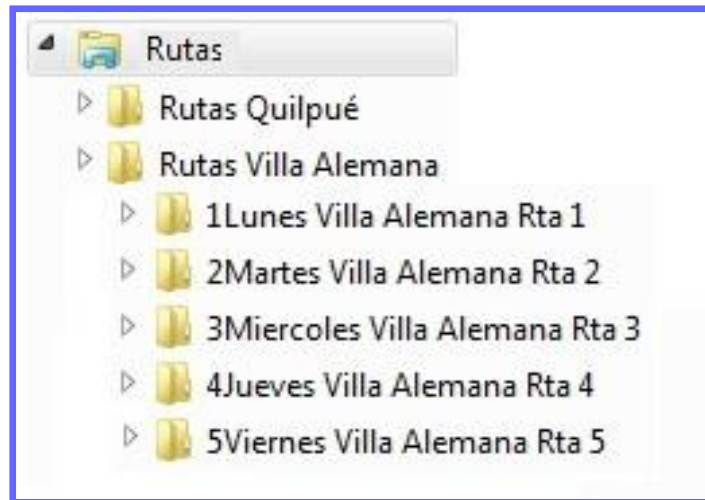
1	0	Not =	1
2	0	Not =	1
3	0	Not =	1
4	0	Not =	1
5	0	Not =	1

	1	2	3	4	5
1	=<=	=<=	=<=	=<=	=<=
2	=<=	=<=	=<=	=<=	=<=
3	=<=	=<=	=<=	=<=	=<=
4	=<=	=<=	=<=	=<=	=<=
5	=<=	=<=	=<=	=<=	=<=

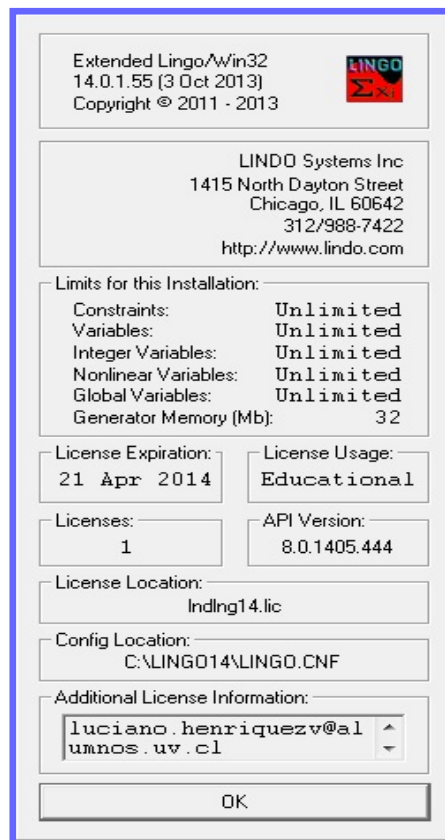
- Definición de función objetivo (con la solución de la matriz de ejemplo incluida)



Anexo 10.4: Matrices de cada ruta.



Anexo 10.5: Licencia Extended otorgada por LINGO



Anexo 10.6: Representación de la obtención del código fuente del TSP.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
STAFF1.KZ	15-03-2013 11:00	LINGO Document	1 KB
STAFOLE1	15-03-2013 11:00	Hoja de cálculo d...	43 KB
STAFOLE2	15-03-2013 11:00	Hoja de cálculo d...	16 KB
TEST	15-03-2013 11:00	LINGO Document	1 KB
TRAN	15-03-2013 11:00	LINGO Document	7 KB
TRAN	15-03-2013 11:00	LINGO Document	1 KB
TRAN	15-03-2013 11:00	Hoja de cálculo d...	14 KB
TRANCHART	15-03-2013 11:00	LINGO Document	8 KB
TRANDB	15-03-2013 11:00	Microsoft Office A...	420 KB
TRANDB	15-03-2013 11:00	LINGO Document	8 KB
TRANDB	15-03-2013 11:00	Microsoft Office A...	214 KB
TRANDB.sql	15-03-2013 11:00	Archivo SQL	3 KB
TRANDB_SQL.sql	15-03-2013 11:00	Archivo SQL	3 KB
TRANDB2	15-03-2013 11:00	Microsoft Office A...	498 KB
TRANOLE	15-03-2013 11:00	LINGO Document	5 KB
TRANOLE	15-03-2013 11:00	Hoja de cálculo d...	14 KB
TRANOLESPARSE	15-03-2013 11:00	LINGO Document	5 KB
TRANOLESPARSE	15-03-2013 11:00	Hoja de cálculo d...	18 KB
TRANSEMIC	15-03-2013 11:00	LINGO Document	5 KB
TRANSOL	15-03-2013 11:00	LINGO Document	18 KB
TSP	15-03-2013 11:00	LINGO Document	2 KB
VROUTE	15-03-2013 11:00	LINGO Document	11 KB

Anexo 10.7: Código fuente del TSP propuesto

MODEL:

! Problema del Agente viajero (TSP);

SETS:

NODO / 1.. 40/: U;

ARCO(NODO, NODO):

DISTANCIA, !Matriz de distancias Dij;

X; !X(i, j) = 1 si se usa el arco i,j;

ENDSETS

DATA:

DISTANCIA =

@OLE('\Users\Luciano\Desktop\Rutas\Rutas Villa Alemana\4Jueves Villa Alemana Rta 4\Jueves Villa alemana Rta 4.xlsx');

ENDDATA

```

N = @SIZE( NODO);
! Función objetivo = suma producto de la matriz de distancia por matriz X (variables);
[FUNCION_OBJETIVO]MIN = @SUM( ARCO: DISTANCIA * X);    ![1];

@FOR( NODO( K): !para una ciudad K;

!Se debe ingresar en ella;
@SUM( NODO( I)| I #NE# K: X( I, K)) = 1;           ![2];

!Se debe salir de ella;
@SUM( NODO( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;           ![3];

!Eliminación de los sub rutas;
@FOR( NODO( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:           ![4];
    U( J) >= U( K) + X ( K, J) -
    ( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
    ( N - 3) * X( J, K)
);
);
!X es una variable binaria;
@FOR( ARCO: @BIN( X));                             ![5];

! Por primera y ultima parada sabemos;
@FOR( NODO( K)| K #GT# 1:
    U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
    U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);

DATA:
! Ruta para Exportar la solucion;

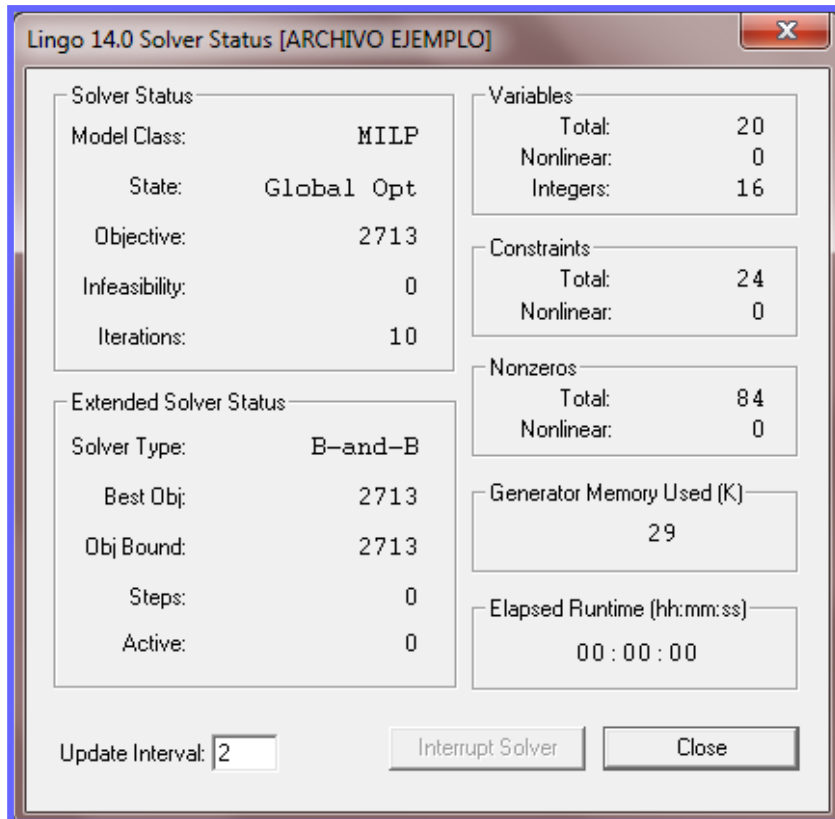
@OLE( '\Users\Luciano\Desktop\Rutas\Rutas Villa Alemana\4Jueves Villa Alemana Rta
4\Jueves Villa alemana Rta 4.xlsx')=U,FUNCION_OBJETIVO;

ENDDATA

END

```

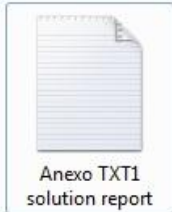
Anexo 10.8: Ventana que presenta la solución del Ejemplo



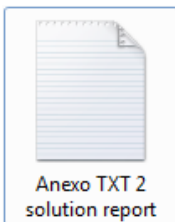
Variable	Value	Reduced Cost
N	4.000000	0.000000
U(1)	0.000000	0.000000
U(2)	2.000000	0.000000
U(3)	1.000000	0.000000
U(4)	3.000000	0.000000
DISTANCIA(1, 1)	0.000000	0.000000
DISTANCIA(1, 2)	702.0000	0.000000
DISTANCIA(1, 3)	454.0000	0.000000
DISTANCIA(1, 4)	842.0000	0.000000
DISTANCIA(2, 1)	702.0000	0.000000
DISTANCIA(2, 2)	0.000000	0.000000
DISTANCIA(2, 3)	324.0000	0.000000
DISTANCIA(2, 4)	1093.0000	0.000000
DISTANCIA(3, 1)	454.0000	0.000000
DISTANCIA(3, 2)	324.0000	0.000000
DISTANCIA(3, 3)	0.000000	0.000000

DISTANCIA(3, 4)	1137.000	0.000000
DISTANCIA(4, 1)	842.0000	0.000000
DISTANCIA(4, 2)	1093.000	0.000000
DISTANCIA(4, 3)	1137.000	0.000000
DISTANCIA(4, 4)	0.000000	0.000000

Anexo 10.9 resultados matriz de 40 nodos:



Anexo 10.10 resultados matriz de 40 nodos:



Anexo 10.11: Hoja de ruta del jueves 17 de octubre, de Villa Alemana.

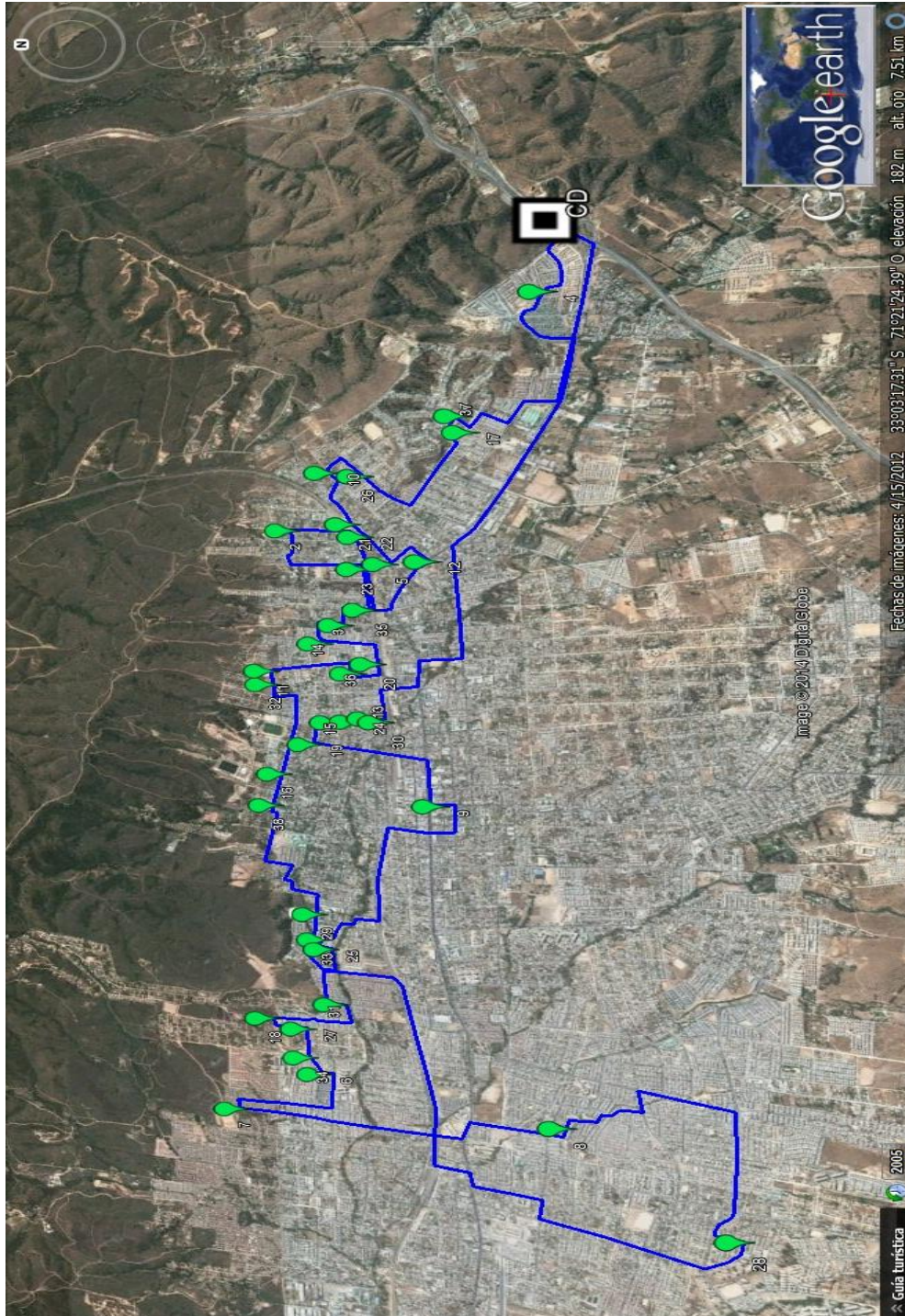
	B	C	D
1			
	17 Noviembre- Villa Alemana		
	SORIANO MUNOZ BARBARA	CASTRO SANTIBANEZ RAUL ORLANDO	MORALES CALANCHE ARNALDO
	CONTRERAS CONTRERAS RAUL	PEREZ CARCAMO GLADYS	LEON ORTIZ JOSE ISAAC
	MOLINA ROJAS ALEJANDRO	SALINAS CESPEDES LUIS	HENRIQUEZ CAAMMANO PEDRO
	ESTAY JOFRE DENISSE	PENA ARANCIBIA MARISOL	YOUNG GUZMAN LUIS
	JIMENEZ JOHN	SEPULVEDA JUANA	ROMERO LOBOS PAMELA
	JIMENES ROJAS ALEJANDRO	AVELLO BASTIAS GERALD	MURA RAVANAL MARIANA
	RIVERA VARAS ROMINA	FERNANDEZ VILLALOBOS JAIME	CONTRERAS CONTRERAS JUAN
	SABORES DE FAMILIA LTDA PANADERIA Y EL ROCIO 898	GUTIERREZ GARCIA LAURA	CARVAJAL MONTERO CECILIA
	VASQUEZ MUNOZ VIVIANA ELIZABETH	CASTILLO FUENTES JENNY MICHEL	OLGUIN PARRA VIRGINIA
	LOBOS MOLINA SERGIO	SANTIBANEZ MIRANDA MIGUEL	CONTRERAS CONTRERAS ROSA M.
	CASTRO CHACANA LUISA VERONICA	ZUNIGA CARRENO CARLOS DAVID	GONZALEZ GATICA MARIA IRENE
	LEIVA CUELLO LEOPOLDO E.	CONTRERAS CONTRERAS RICHARD I.	FERNANDEZ HERNANDEZ LUIS
	PACHECO ELIANA	ARIAS AGUILERA JACQUELINE	ALVARADO VILLEGAS MARIA INES
	ESCOBAR PACHECO ELIANA	CALDERON SANTIBANEZ ADELA DEL C	
	MONARDES MONARDES MIGUEL ANGEL	FLORES DAY FRANCISCO	

Anexo 10.12: Extracto de archivo Excel: "Enex cantidad de litros".

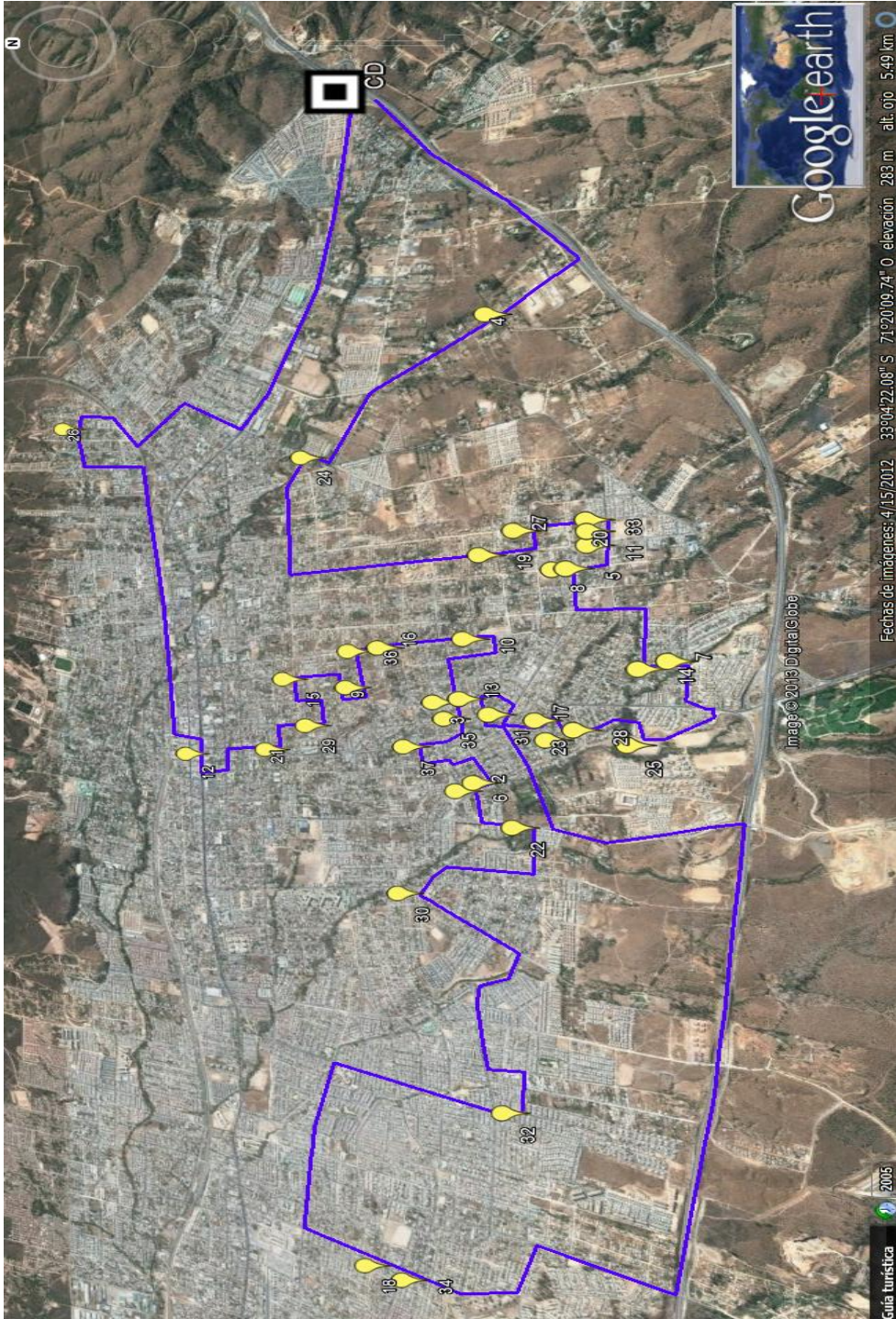
O20												
Detalle de Transacciones: (02/01/2013 al 06/11/2013)												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	M	
File	Patente	Estacion	Guia Despacho	Tipq	Productc	Fecha	Litr	Precio Ver	Odomet	Monto To		
58	XE4501	3288058	2593283	Venta	DIESEL	02-01-2013 9:16	87,941	628	628275	54.850		
767	CVV699	3288767	2593430	Venta	DIESEL	02-01-2013 10:25	47,591	628	56762	29.887		
767	WT1684	3288767	2593642	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:13	62,04	628	417981	38.961		
767	CDYR84	3288767	2593649	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:16	55,548	628	124897	34.884		
767	CGVP22	3288767	2593659	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:21	43,002	628	96995	27.005		
767	CF3F31	3288767	2593667	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:25	64,814	628	107287	40.703		
767	CVHV29	3288767	2593722	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:51	86,611	628	148486	54.392		
57	CDPP57	3288057	2593725	Venta	DIESEL	02-01-2013 12:52	415,271	627	153148	260.375		
58	DJHP88	3288058	2593747	Venta	DIESEL	02-01-2013 13:06	44,411	628	13968	27.890		
58	CSFF46	3288058	2593754	Venta	DIESEL	02-01-2013 13:11	57,591	628	65921	36.167		
767	BVJW70	3288767	2593758	Venta	DIESEL	02-01-2013 13:14	37,197	628	167678	23.360		
767	ZR4454	3288767	2593771	Venta	DIESEL	02-01-2013 13:21	71,822	628	338943	45.104		
767	DHYR67	3288767	2593844	Venta	DIESEL	02-01-2013 14:07	113,174	628	22468	71.073		
767	CF5C34	3288767	2593855	Venta	DIESEL	02-01-2013 14:13	118,986	628	102781	74.723		
767	ZK2982	3288767	2593880	Venta	DIESEL	02-01-2013 14:24	100,053	628	272496	62.833		
767	CWHD20	3288767	2593954	Venta	DIESEL	02-01-2013 15:26	71,532	628	836444	44.922		
60	NP8164	3288060	2594030	Venta	DIESEL	02-01-2013 16:14	71,805	630	644553	45.237		
767	BDXF81	3288767	2594129	Venta	DIESEL	02-01-2013 17:18	98,994	628	372002	62.168		
767	CVHV32	3288767	2594150	Venta	DIESEL	02-01-2013 17:30	85,177	628	53288	53.491		
2037	CVHV29	3288037	2594308	Venta	DIESEL	02-01-2013 18:54	90,781	638	148847	57.918		
736	BVJW70	3288736	2594647	Venta	DIESEL	02-01-2013 22:10	77,755	638	168046	49.608		
2037	CVHV32	3288037	2594656	Venta	DIESEL	02-01-2013 22:15	72,295	638	53663	46.124		

Anexo 10.13 : Grafos de rutas

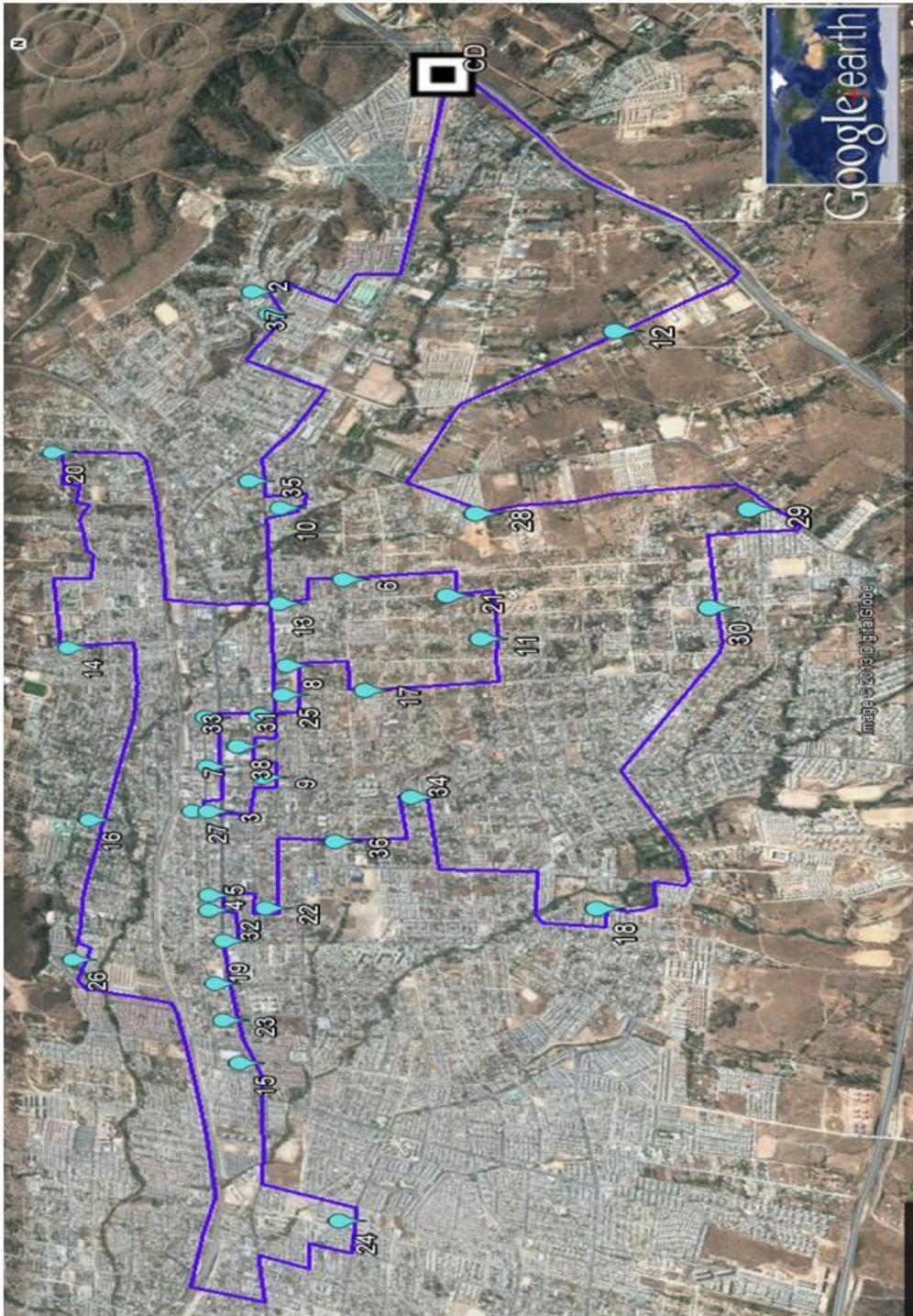
Ruta lunes Villa alemana



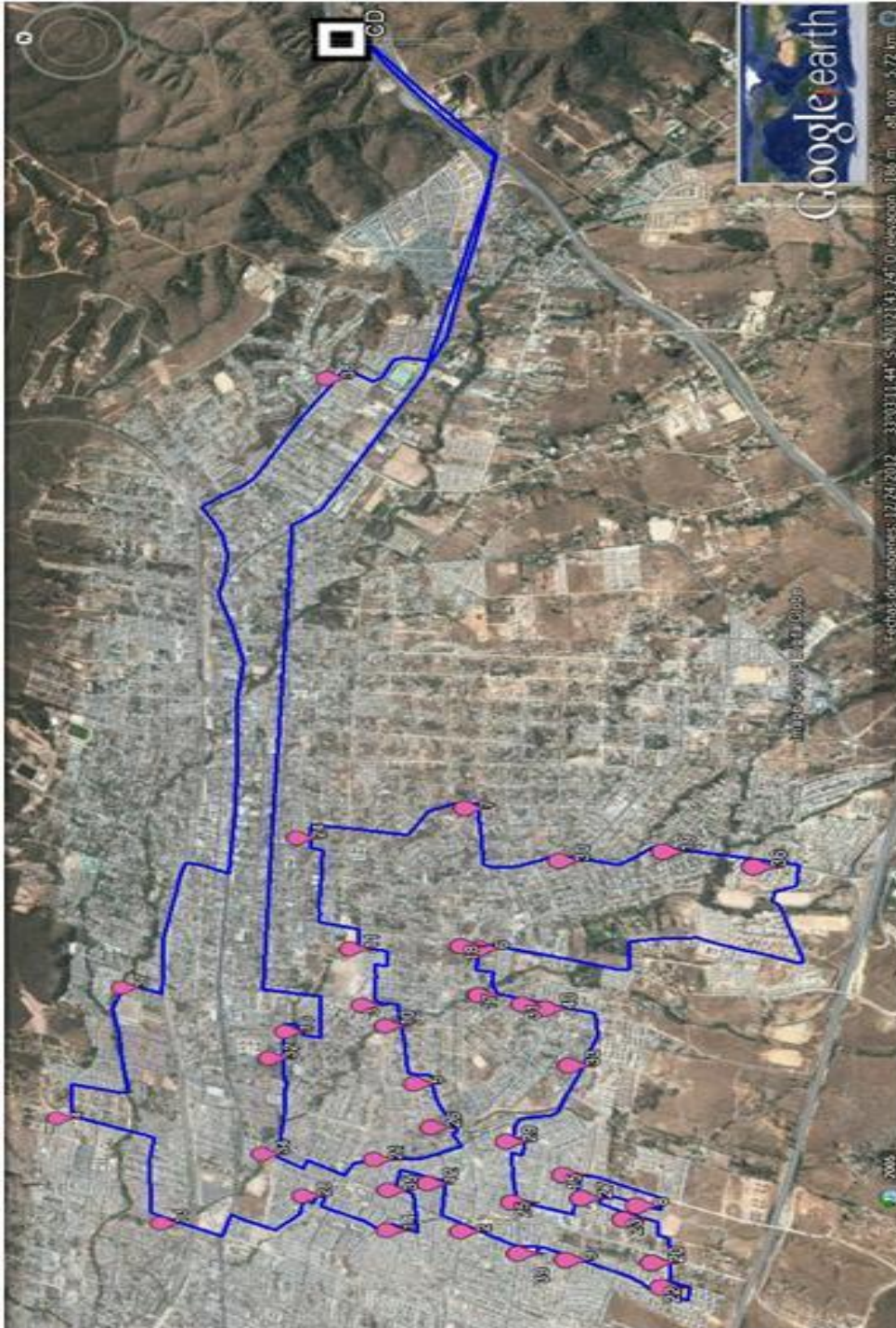
Ruta Martes Villa Alemana



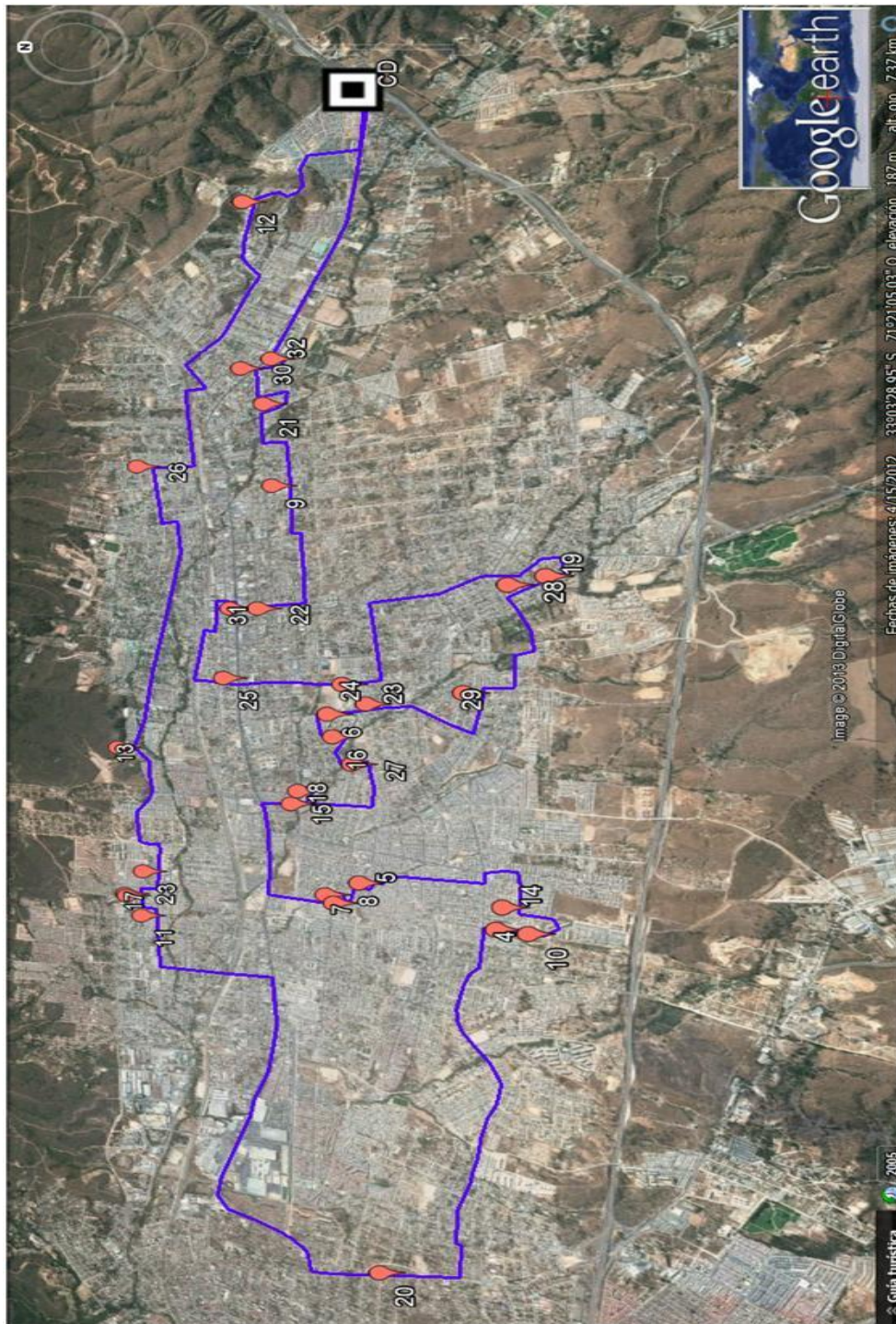
Ruta Miercoles Villa Alemana



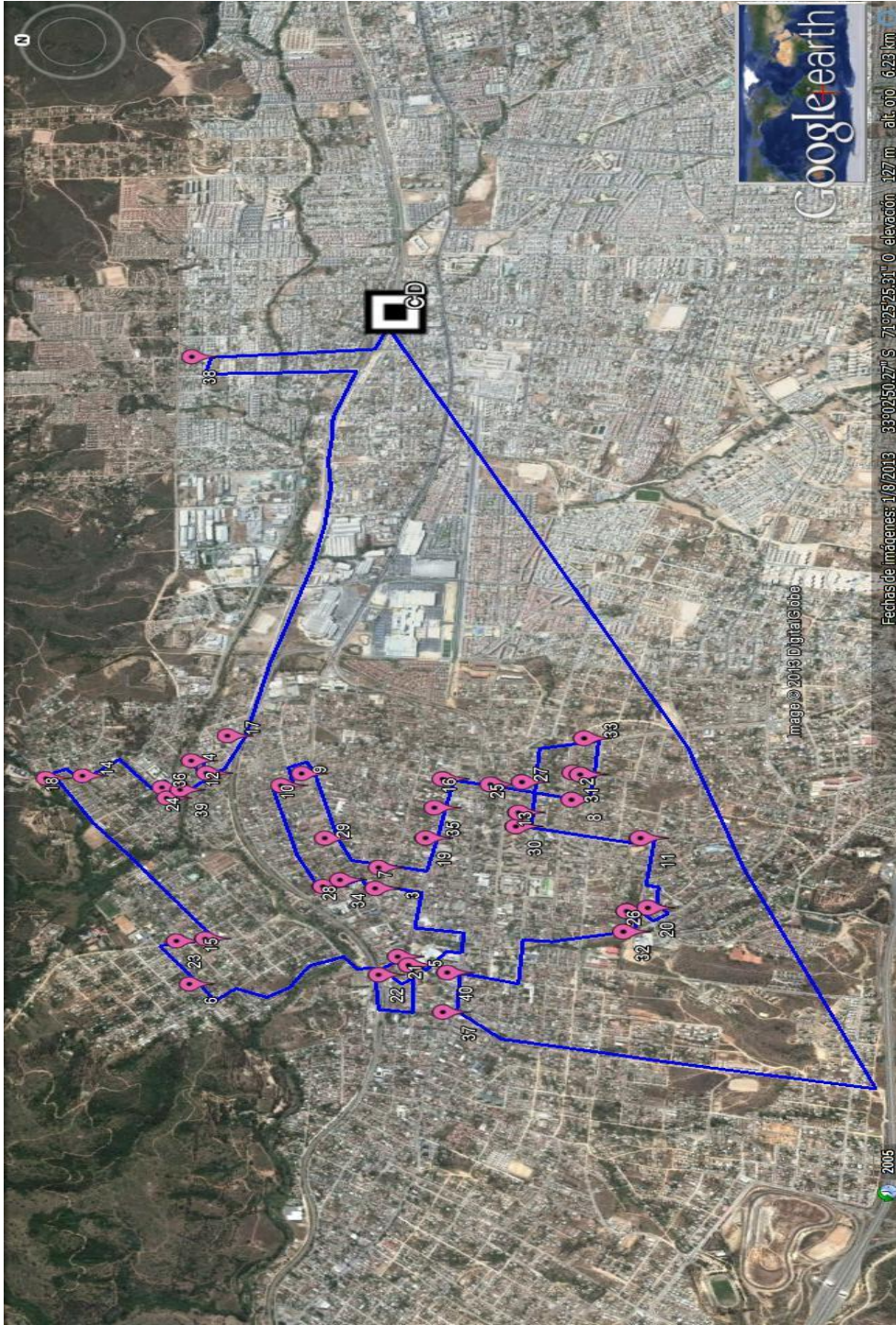
Ruta jueves Villa Alemana



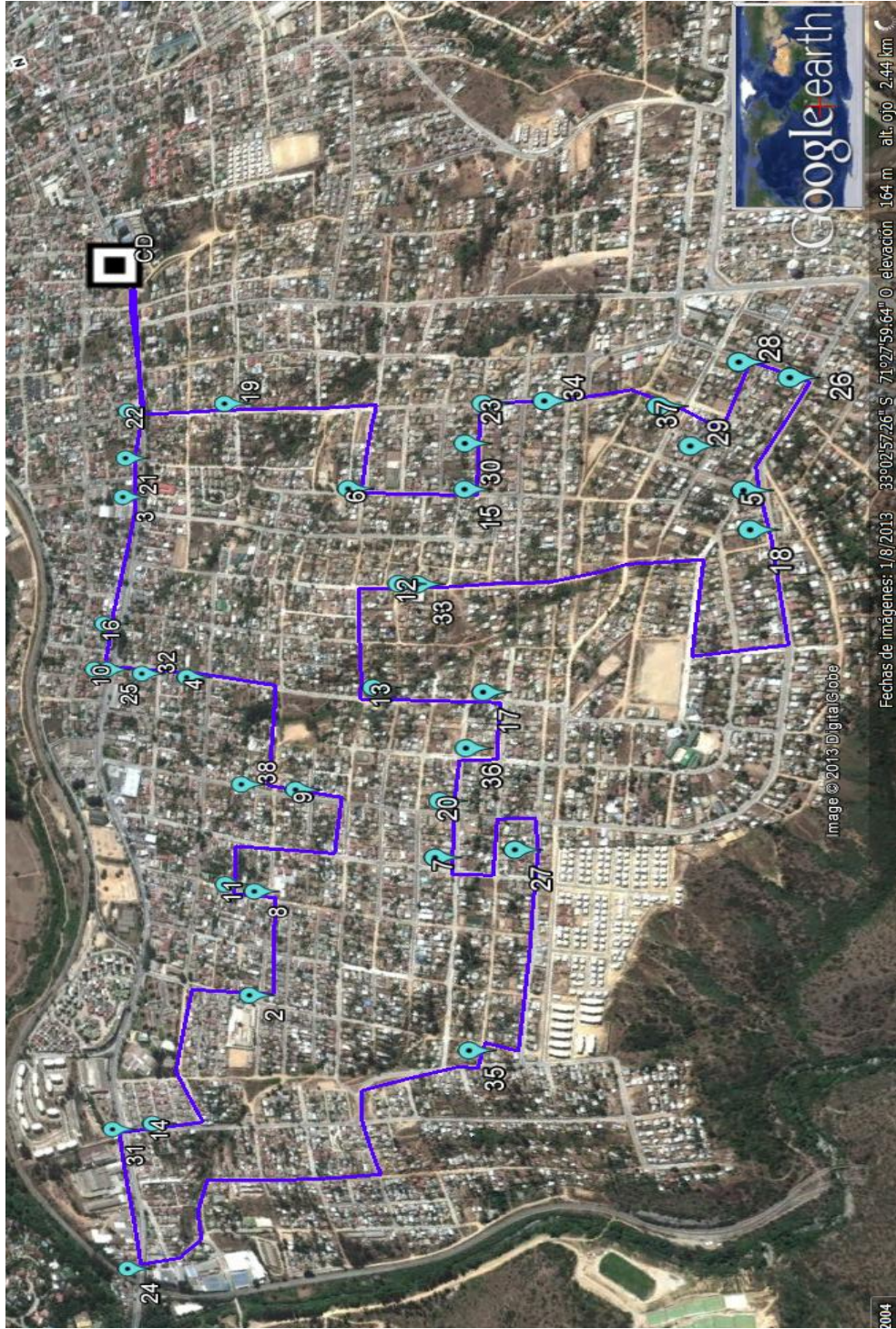
Ruta viernes Villa Alemana



Ruta Lunes Quilpué.

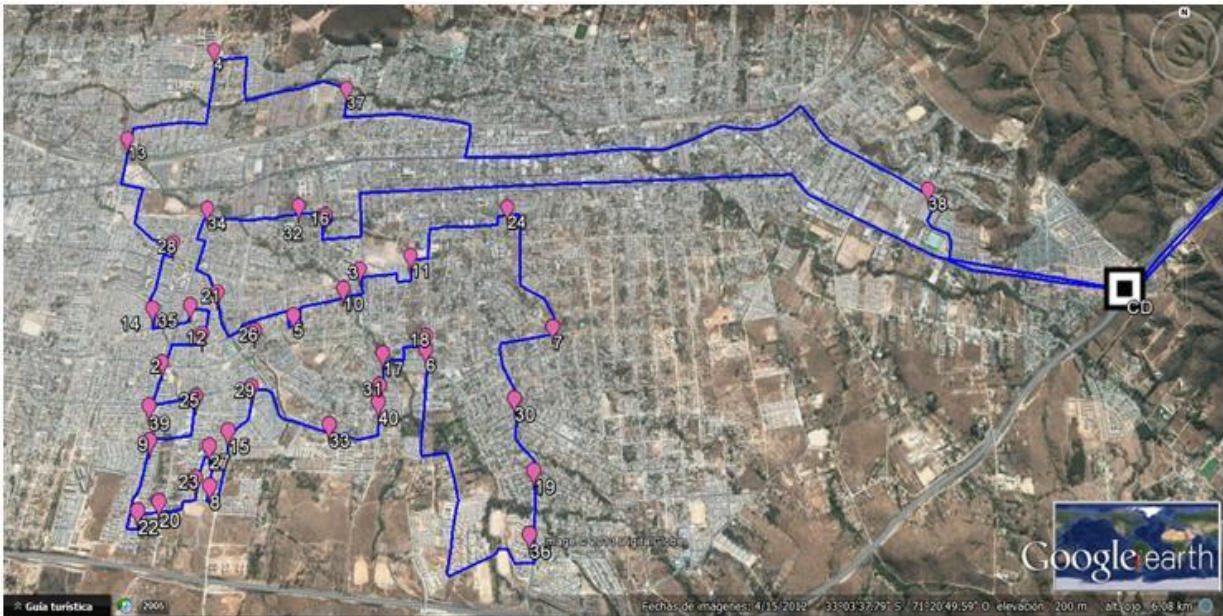
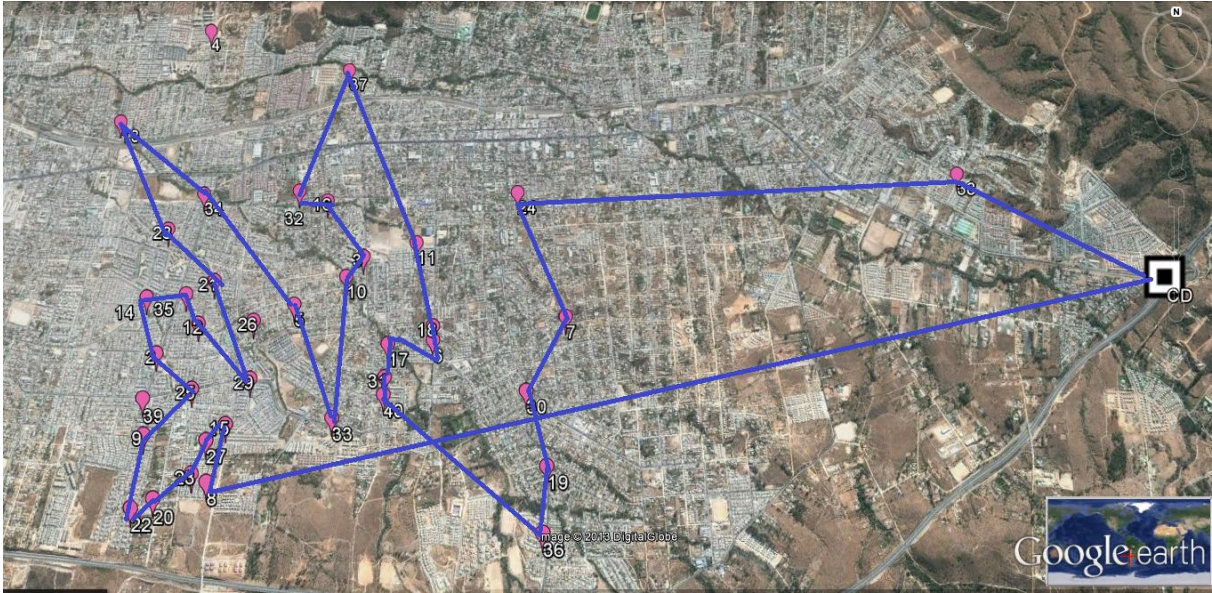


Ruta Martes Quilpué.



Anexo 10.14: Grafos de la situación actual y la metodología propuesta para el día jueves 17 de Octubre.

- En la primera imagen se presenta la situación actual, y en la segunda la metodología propuesta.



Anexo 10.15: Versiones de Licencias de Lingo y sus respectivos precios en dólares.

LINGO						
Version	Base	Options				
		Barrier	Nonlinear	Global	Stochastic	Conic
Super	\$495	\$150	\$150	\$150	\$150	\$150
Hyper	\$995	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300
Industrial	\$2,995	\$900	\$900	\$900	\$900	\$900
Extended	\$4,995	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500	\$1,500

Version	Base			Nonlinear	Global	
	Linear Models			Nonlinear	Multistart	Global Solver
	Constraints	Variables	Integers	Variables	NL Variables	NL Variables
Super	1,000	2,000	200	200	200	10
Hyper	4,000	8,000	800	800	800	20
Industrial	16,000	32,000	3,200	3,200	3,200	50
Extended	Unrestricted	Unrestricted	Unrestricted	Unrestricted	Unrestricted	Unrestricted

Anexo 10.16: Valor Actual de Costos (VAC) de alternativa 1 y alternativa 2

Alternativa 1													
	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Remuneraciones		-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000
Combustible		-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406	-857.406
Horas extras		-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908	-290.908
Otros costos		-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756
Total costos de operación		-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070
Resultado antes de impuesto		-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070	-3.762.070
Ahorro Impuesto 20%		752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414	752.414
Resultado después de impuesto		-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656
Flujo neto	0	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656	-3.009.656
VAC (2,4%)		-\$ 30.332.132											

Alternativa 2

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Remuneraciones		-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000	-2.100.000
Combustible		-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176	-673.176
Horas extras		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Otros costos		-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756	-513.756
Total costos de operación		-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932	-3.286.932
Amortización		-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606	-26.606
Intereses		-36.716	-34.024	-31.271	-28.454	-25.572	-22.624	-19.608	-16.523	-13.367	-10.138	-6.835	-3.457
Resultado antes de impuesto		-3.350.253	-3.347.562	-3.344.808	-3.341.991	-3.339.110	-3.336.162	-3.333.146	-3.330.061	-3.326.905	-3.323.676	-3.320.373	-3.316.994
Ahorro Impuesto 20%		670.051	669.512	668.962	668.398	667.822	667.232	666.629	666.012	665.381	664.735	664.075	663.399
Resultado después de impuesto		-2.680.203	-2.678.049	-2.675.847	-2.673.593	-2.671.288	-2.668.929	-2.666.517	-2.664.049	-2.661.524	-2.658.941	-2.656.299	-2.653.595
Amortización		26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606	26.606
Inversión		-1596335											
Flujo neto		-1.596.335	-2.653.597	-2.651.444	-2.649.241	-2.646.987	-2.644.682	-2.642.324	-2.639.911	-2.637.443	-2.634.918	-2.632.335	-2.629.693
VAC (2,4%)		-\$ 28.180.460											

Anexo 10.17: Evaluación de Financiamiento

Gasto Financiero	
Inversión a financiar	1596335
Tasa de interés	2,30%
Periodo	12
Monto de Amortización	\$ 153.743,65

Periodo	Saldo insoluto	Valor cuota	Interes	Amortización
Mes 1	\$ 1.479.307	\$ 117.028	\$ 36.716	\$ 153.744
Mes 2	\$ 1.359.587	\$ 119.720	\$ 34.024	\$ 153.744
Mes 3	\$ 1.237.114	\$ 122.473	\$ 31.271	\$ 153.744
Mes 4	\$ 1.111.824	\$ 125.290	\$ 28.454	\$ 153.744
Mes 5	\$ 983.653	\$ 128.172	\$ 25.572	\$ 153.744
Mes 6	\$ 852.533	\$ 131.120	\$ 22.624	\$ 153.744
Mes 7	\$ 718.398	\$ 134.135	\$ 19.608	\$ 153.744
Mes 8	\$ 581.177	\$ 137.221	\$ 16.523	\$ 153.744
Mes 9	\$ 440.800	\$ 140.377	\$ 13.367	\$ 153.744
Mes 10	\$ 297.195	\$ 143.605	\$ 10.138	\$ 153.744
Mes 11	\$ 150.287	\$ 146.908	\$ 6.835	\$ 153.744
Mes 12	\$ 0	\$ 150.287	\$ 3.457	\$ 153.744