



Instituto Tecnológico de Cd. Madero

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

COORDINACIÓN DE POSGRADO EN  
COMPUTACIÓN  
U.5.352/06  
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN  
DE TESIS DE GRADO

2005-NOV-10

C. ING. NELSON RANGEL VALDEZ  
Presente.

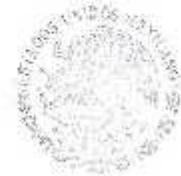
Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS DE ASIGNACIÓN DE RUTAS, HORARIOS Y CARGAS EN  
UNA DISTRIBUIDORA DE PRODUCTOS"**

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE  
"FOR MY PATRIA Y FOR MI BIEN"

DR. ANA MARÍA MENDOZA MARTÍNEZ  
JEFA DE LA DIVISIÓN



SEP  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN  
I.T.C.M.

AMM:NMCO:perc

Av. 1º de Mayo 1501 Pse. Col. Los Mangos  
Cd. Madero, Tam. C. P. 89440  
Internet: www.itcm.edu.mx  
Correo Electrónico: itcm@itcm.edu.mx

Teléfono: 3-57-48-90 al 99  
Fax: 3-57-48-20 ext. 1008



SEP

SUBSECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. MADERO

Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica



Dirección General de Educación Superior Tecnológica

## DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



# Análisis de los Problemas de Asignación de Rutas, Horarios y Cargas en una Distribuidora de Productos

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA  
COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

**I.S.C. NELSON RANGEL VALDEZ**

ASESORES:

**DRA. LAURA CRUZ REYES  
LIC. JOSÉ APOLINAR RAMÍREZ SALDÍVAR**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**Análisis de los Problemas de Asignación  
de Rutas, Horarios y Cargas en una  
Distribuidora de Productos**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

PRESENTA:  
**I.S.C. NELSON RANGEL VALDEZ**

ASESORES:  
**DRA. LAURA CRUZ REYES  
LIC. JOSÉ APOLINAR RAMÍREZ SALDÍVAR**

JURADO:  
**Presidente: DRA. LAURA CRUZ REYES  
Secretario: DR. HÉCTOR JOAQUÍN FRAIRE HUACUJA  
Vocal: M.C. CLAUDIA GUADALUPE GÓMEZ SANTILLÁN  
Suplente: M.C. ANA GUADALUPE VÉLEZ CHONG**

# DEDICATORIA

Son muchos los sentimientos que quisiera expresar para mostrar mi gratitud a quienes me inspiraron a terminar la maestría, son pocas las palabras que existen para describir esos pensamientos. La única forma que tengo para demostrarles lo que representan para mí es dedicándoles este trabajo. Por eso, dedico mi tesis:

A mis padres: Oscar Aurelio Rangel Lozano y Lucila Valdez del Rosal, a quienes amo con todo mi corazón y son gran parte de la razón por la que me quiero superar en esta vida.

**Mamá, Papá,** cuando lean esto  
quiero que sepan que ustedes  
han hecho posible esto  
para mí  
**GRACIAS!!!**

A toda mi familia, en especial a  
mis hermanos, por estar  
conmigo siempre.

A Dios, por darme a todos esos seres queridos y brindarme las alegrías  
que hasta hoy me ha dado.

A la Dra. Laura Cruz Reyes, por todo el apoyo que me dio para desarrollar mi investigación y por convertirse en el guía, maestro y modelo inspirador de la excelencia que me hace sentir orgulloso de haber pertenecido a esta institución.

A mis compañeros de maestría y a mis amigos por hacerme más ameno el tiempo que estuve estudiando.

## RECONOCIMIENTOS

En agradecimiento a la guía y apoyo recibidos durante la elaboración de mi tesis, en estas breves líneas quiero plasmar el nombre de aquellos que fueron de gran ayuda para poder concluir con bien este trabajo de investigación. Agradezco a:

- ) La Doctora Laura Cruz Reyes, que vuelve a ser mi Directora de Tesis, por haber creído en mi, por aconsejarme, por darme observaciones y comentarios, y por ser el guía que me ayudo a hacer una investigación excelente.
- ) El Licenciado José Apolinar Ramírez Saldívar, por darle el rumbo adecuado a esta investigación.
- ) Mi comité de tesis, compuesto por el Dr. Hector Joaquín Fraire Huacuja, el M.C. Claudia Gómez Santillán y el M.C. Ana Guadalupe Vélez Chong, por contribuir con sus comentarios y correcciones para mejorar la calidad de este documento.
- ) Todos los maestros, por haberme brindado el conocimiento necesario para poder llevar a cabo un estudio de calidad en esta institución.
- ) Todos mis compañeros, quienes para mi fueron modelos a seguir, por que representaron siempre un incentivo y un aliento para superarme y seguir luchando.
- ) El personal del área con quien tuve contacto, por su trato amable que hacía más amena mi estancia y me ayudo a terminar todos los trámites necesarios.
- ) El CONACYT por haber brindado la oportunidad a tantos estudiantes como yo a realizar estudios que impulsen la ciencia en México.

A todos aquellos con quienes conviví estos dos años quiero decirles: GRACIAS.

## RESUMEN

En esta tesis se abordó el problema de transporte que incluye las tareas de enrutado, programación de horarios y asignación de carga. La literatura muestra que la mayoría de los trabajos relacionados con los Sistemas de Transporte sólo abordan la solución de las tareas de enrutado y programación de horarios, como una combinación de variantes del problema de enrutado de vehículos Rich VRP (de sus siglas en inglés, Rich Vehicle Routing Problem), dejando a un lado la tarea de asignación de carga. En esos trabajos de investigación, la variante Rich VRP más compleja involucra cinco variantes VRP básicas, lo cual no es suficiente para modelar casos reales más complejos.

Los casos reales de transportación de productos se definieron, para el desarrollo de esta investigación, a partir del conjunto compuesto por restricciones especificadas en seis variantes VRP existentes (CVRP, HVRP, VRPMTW, VRPM, sdVRP, SDVRP); una nueva condición que limita el número de vehículos que pueden ser atendidos simultáneamente en un cliente; y la tarea de asignación de carga.

Para la solución de instancias reales del problema de transporte se propone una metodología basada en algoritmos aproximados. La metodología integra dos estrategias heurísticas: un sistema de colonia de hormigas (ACS, Ant Colony System), que resuelve las tareas de enrutado y programación de horarios; y DiPro, un algoritmo determinista diseñado para resolver la tarea de asignación de carga.

La experimentación se llevó a cabo empleando un sistema desarrollado a partir de la metodología propuesta y casos pertenecientes a una embotelladora de productos. Los resultados mostraron que el sistema redujo considerablemente el tiempo requerido para la planeación del transporte, con respecto al diseño manual. Además, disminuyó el número de unidades empleadas para la transportación en el 20% de los casos.

## SUMMARY

This thesis deals with a real and complex transportation problem including the routing, scheduling and loading tasks. The literature shows that most of the work related with Transportation Systems involves only the solution of the routing and scheduling tasks, as a combination of vehicle routing problem variants (Rich VRP), leaving away the loading subproblem. On those approaches the most complex Rich VRP includes only five VRP variants which aren't enough to define more complex real-world cases.

A set of VRP variants such as HVRP, VRPMTW, MDVRP, VRPM, sdVRP and SDVRP; a new constraint that limits the number of vehicles that can be attended in a customer simultaneously; and the loading task were used to define the real-world instances of a product transportation company.

In this research work a methodology of solution, based on approximated algorithms, for real-world transportation problem instances is proposed. The methodology consists on an integrated system that involves the Ant Colony System (ACS) algorithm, which solves the routing and scheduling tasks, and DiPro, a deterministic algorithm that was designed to solved the loading task.

We carried out experiments using instances from a bottled product company. Results show that the system reduced from sixteen hours to ten minutes the transportation planning with respect to the manual design used in the company. Besides, it reduced the number of vehicles used for the transportation in 20% of the cases.

# DECLARACIÓN

Los resultados y aportaciones de esta investigación han sido presentados conjuntamente con mis asesores en las siguientes publicaciones:

“ILP and Heuristic Approaches for a New VRP Variant”. International Federation of Operational Research Societies, IFORS 2005. Honolulu, Hawaii, USA. July 11-15, 2005.

“Heuristic Programming for a Rich VRP Model”. International Transactions in Operation Research, ITORS. Journal. (En Revisión).

“A Transportations System Based on Heuristic Optimization Methods”, Modeling Decisions for Artificial Intelligence, MDAI 2006. Tarragona, Catalonia, España. April, 3-5, 2006. (En Revisión).

“A Distributed Metaheuristic for the Transportation Problem”, International Symposium and School on Advanced Distributed Systems, ISSADS 2006. Guadalajara, Jalisco, Méx. January 23-27, 2006. (En Revisión).



# Capítulo 1

## Introducción

---

En este capítulo se proporciona un panorama general del trabajo de investigación desarrollado; se presentan sus antecedentes, definición del problema, objetivos y justificación; así como una descripción de la organización de este documento.

### 1.1 Antecedentes

La Gestión del Transporte es un problema en el cual los clientes necesitan ser abastecidos por los distribuidores de manera efectiva y eficiente. En la mayoría de los casos, los recursos son limitados y, debido a que el transporte representa un alto porcentaje del valor añadido a los bienes, del 5% al 20% del costo total según [Toth, 2001], es necesario encontrar mejores formas para planearlo.

Una de las problemáticas que encuentra el desarrollo de la Gestión de Transporte es la falta de metodologías robustas y herramientas que faciliten el diseño de la logística de transporte en situaciones complejas del mundo real.

Un problema muy conocido en la comunidad científica, y que se asocia comúnmente al problema de la gestión de transporte, es el problema del enrutado de vehículos o VRP (de sus siglas en inglés Vehicle Routing Problem). Los trabajos de investigación más recientes

abordan situaciones reales de transporte con una complejidad de hasta cinco variantes de VRP [Pisinger, 2005; Reimann, 2003]. Además, las herramientas comerciales existentes involucran seis variantes [Hall, 2004]. A pesar de estos avances, aún no es posible brindar una solución general al problema del transporte debido a que no existe un conjunto de restricciones definitivo que lo defina.

En este trabajo de investigación se aborda un problema real que surge de la necesidad de una embotelladora de productos: planificar los horarios y carga de sus vehículos, de manera que cubran las demandas de sus clientes. Una analogía de este problema con respecto a la solución del VRP correspondería a resolver al menos seis de sus variantes y por separado obtener la solución de la distribución de la carga.

Debido a que la complejidad de la variante VRP más sencilla, el VRP Capacitado, crece exponencialmente conforme aumenta el tamaño del caso que se resuelve (pertenece a la clase NP-duro), resolver la situación de la embotelladora de productos representa una dificultad aún mayor, por que además de involucrar diversas variantes VRP, añade las tareas de construcción de horarios y configuración de la carga dentro de los vehículos.

Con este trabajo de investigación se pretende contribuir a la solución general de este problema con una metodología que permite la integración de métodos que abordan múltiples condiciones y tareas de transportación.

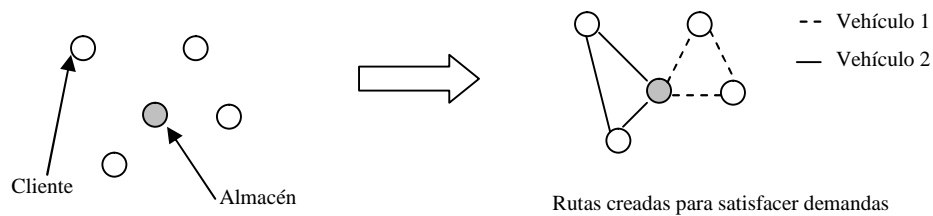
## **1.2 Descripción del Problema de Investigación**

El problema de investigación especificado por la embotelladora de productos está dividido en tres sub-problemas específicos: asignación de rutas, asignación de horarios y asignación de cargas. La asignación de rutas y la asignación de horarios se puede describir como un problema Rich VRP, es decir, un problema donde diversas variantes VRP participan en la definición de una situación más compleja y cuyo objetivo es encontrar un conjunto de rutas que satisfagan las demandas. La asignación de cargas puede verse como un problema de empaquetamiento (BinPacking) donde se debe determinar un conjunto mínimo de

contenedores para distribuir los productos. A continuación se muestran las definiciones básicas de los problemas relacionados con nuestro problema de investigación.

### 1.2.1 Vehicle Routing Problem (VRP)

El problema de la Asignación de Rutas a Vehículos es un problema en el cual un conjunto de almacenes buscan satisfacer las demandas de sus clientes. Para llevar a cabo esa labor, los almacenes cuentan con una flotilla de vehículos que deberán aprovechar al máximo, de tal manera que se minimicen los costos y que la satisfacción de la demanda sea eficiente. Este problema se describe en forma más detallada en las secciones 2.1 y 2.2, la Figura 1.1 ejemplifica un caso típico de este problema.



**Figura 1.1.** Ejemplo de definición de rutas en VRP.

### 1.2.2 Bin-packing Problem (BPP)

El problema de distribución de objetos en contenedores (Bin-packing) es un problema clásico de optimización combinatoria NP-duro, en el cual hay una secuencia de  $n$  objetos  $L = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , cada objeto con un tamaño dado  $0 < s(a_i) \leq c$ , y un número ilimitado de contenedores, cada uno de capacidad  $c$ . El objetivo es determinar el menor número de contenedores  $m$  en los cuales todos los objetos pueden ser distribuidos. La expresión 1.1 enuncia este problema.

dados (1.1)

$n$  = número de objetos a distribuir

$c$  = capacidad del contenedor

$L$  = secuencia de  $n$  objetos  $a_i$

$s(a_i)$  = tamaño de cada objeto  $a_i$

encontrar

una partición de  $L$  mínima,  $L = B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_m$

tal que en cada conjunto  $B_j$  la sumatoria del tamaño de cada objeto  $s(a_i)$  en  $B_j$  no exceda  $c$ ,

$$\sum_{a_i \in B_j} s(a_i) \leq c \quad \forall j, 1 \leq j \leq m.$$

En la versión discreta del problema *Bin-packing* de una-dimensión, la capacidad del contenedor es un entero  $c$ , el número de objetos es  $n$ , y por simplicidad, el tamaño de cada objeto  $s(a_i)$  es seleccionado del conjunto  $\{1, 2, \dots, c\}$  [Coffman 2002].

### 1.2.3 Routing-Scheduling-Loading Problem (RoSLoP)

Con el propósito de generalizar y extender el problema de transporte de esta investigación, y con el fin de caracterizar otras situaciones reales, en el siguiente párrafo se formula el problema de asignación de rutas, horarios y cargas (RoSLoP, de sus siglas en ingles Routing-Scheduling-Loading Problem).

Dado un conjunto de clientes con una demanda a ser satisfecha, un conjunto de almacenes que están disponibles para abastecerlos y un conjunto de variantes de BinPacking y VRP que los restringen, es necesario diseñar y asignar las rutas, horarios y cargas a los vehículos de tal manera que:

- Se satisfagan las demandas de los clientes;
- El costo total sea minimizado; y
- Las restricciones impuestas por las variantes VRP y BPP sean satisfechas.

### 1.3 Hipótesis

H: Al automatizar el Proceso de Distribución y Entrega de Productos mediante un Sistema Logístico Inteligente, con un enfoque de optimización, se logra:

- Minimizar el tiempo de planeación; y
- Minimizar costos de operación de una empresa de magnitud considerable.

## **1.4 Objetivos**

Los objetivos del presente trabajo de investigación se muestran dentro de esta subsección.

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar una metodología de solución para el problema RoSLoP basado en los modelos de solución creados para resolver variantes de VRP.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Describir formalmente el problema de investigación mediante programación matemática.
- Resolver la asignación de rutas en el problema RoSLoP a través de una heurística de solución basada en algoritmos aproximados que resuelven otras variantes VRP.
- Resolver la asignación de cargas a vehículos utilizando técnicas heurísticas deterministas.
- Proporcionar los horarios de servicio de los vehículos respetando las restricciones del caso que se esté abordando.
- Integrar la solución de cada uno de los sub-problemas de RoSLoP en una metodología de solución general que permita ser aplicada en situaciones del mundo real.
- Probar en un ambiente real la metodología de solución diseñada.

## **1.5 Justificación**

Una gran cantidad de empresas nacionales realizan la programación de transporte y distribución de productos en forma manual con base en la experiencia; por ello, el uso de

un sistema logístico que permita asignar y distribuir rutas, cargas y horarios en forma automática, contribuirá a lograr una mayor eficiencia en la realización de dichas tareas.

Actualmente el desarrollo de software logístico en nuestro país es pobre, por otra parte las herramientas extranjeras disponibles son muy costosas, algunas endémicas de la región donde fueron desarrolladas, y la mayoría carece del conjunto de restricciones necesarias para abordar una situación apegada a la realidad nacional .

El desarrollo de un Sistema Logístico Inteligente constituirá un gran soporte, ya que aún cuando en el mercado actual se encuentra software afín, ninguno esta orientado exclusivamente a dar solución a la problemática de programación de transporte y distribución de productos, con las características mencionadas en la definición del problema. En la sección 3.3 se hace una revisión del software comercial existente, se encontró que algunas aplicaciones están limitadas al área donde se desarrollaron y por lo tanto no se pueden aplicar en casos presentados en nuestro país. Además, por lo general resuelven entre cuatro y seis variantes VRP únicamente.

Por otro lado, a pesar de que la comunidad científica ha estudiado una gran cantidad de variantes VRP, son pocas las que se han abordado como una combinación de más de tres variantes, como es el caso de este trabajo investigación. En la sección 3.2 se muestra un resumen del estado del arte sobre Rich VRP donde se puede observar que no se ha abordado un caso real tan complejo como el de la embotelladora de productos, el cual involucra un amplio conjunto de variantes VRP.

## **1.6 Organización del Documento**

La tesis está organizada de la siguiente manera:

El Capítulo 2 aborda el problema transporte. Como parte del marco teórico se describen los problemas relacionados, se detalla a profundidad cada uno de los subproblemas que integran la gestión de transporte y se muestra un análisis de la complejidad del problema.

El Capítulo 3 presenta una relación de los trabajos relacionados con la investigación. Se muestran trabajos de la comunidad científica y un análisis del estado del arte del software comercial existente. También se incluye un análisis de las variantes Rich VRP identificadas hasta el momento.

El Capítulo 4 muestra un modelo de programación lineal entera que describe la tarea de definición de rutas del problema RoSLoP.

El Capítulo 5 presenta una metodología basada en heurísticos que resuelven de manera integrada el problema de transporte. Se describen las técnicas algorítmicas utilizadas así como el procedimiento a seguir para poder resolver casos del problema RoSLoP.

El Capítulo 6 muestra la experimentación realizada para validar la metodología propuesta para la solución de la gestión de transporte. Se describen los casos de prueba, el diseño del experimento y resultados.

El Capítulo 7 presenta las conclusiones a las que se llegó durante el desarrollo de esta investigación. El capítulo termina dando sugerencias de trabajos futuros.

# Capítulo 2

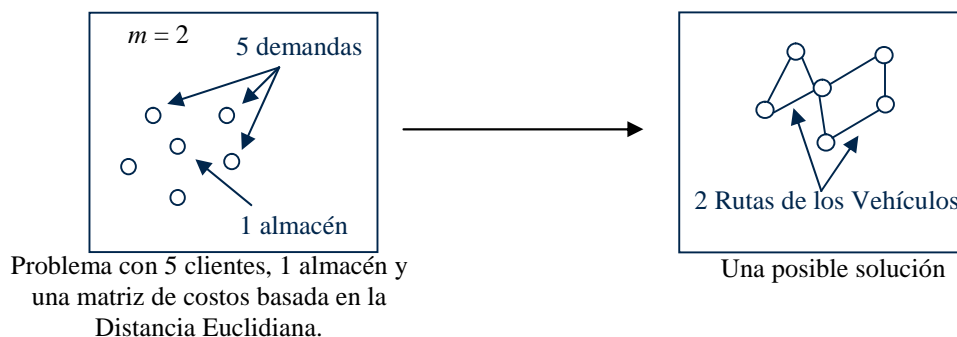
## Marco Teórico

---

El capítulo inicia con la definición general del VRP y un breve resumen de las variantes involucradas en este trabajo de investigación. Posteriormente se detallan cada una de las tareas que forman parte del problema de transporte y se presenta un análisis de su complejidad algorítmica, basado en los problemas que lo describen.

### 2.1 El Problema de la Asignación de Rutas a Vehículos (VRP)

En forma general, el problema clásico del VRP se puede definir formalmente a través de un grafo  $G(V, E)$  con un vértice especial  $v_0$  que representa el almacén, un conjunto de vértices  $V - v_0$  que simbolizan los clientes y una serie de aristas  $E$  con costos o tiempos asociados  $c_{ij}$  a ellas. El objetivo del problema es encontrar un conjunto  $m$  de rutas de vehículos que inicien y terminen en el almacén, que sean de costo mínimo, y que estén diseñadas de tal forma que los vértices restantes del grafo sean visitados exactamente una vez por los vehículos. El valor de  $m$  puede ser parte de los datos o de las variables de decisión. En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo del problema VRP clásico así como una posible solución.



**Figura 2.1.** Problema VRP Clásico.



## **2.2 Variantes del VRP**

El problema VRP ha sido objeto de numerosos estudios desde su primer formulación [Danzig, 1959]. Hoy en día, hay un gran número de extensiones del VRP, las cuales fueron creadas al añadir nuevas restricciones al VRP estándar o bien al combinar variantes ya existentes para crear una nueva más compleja. En las siguientes sub-secciones se describen algunas de las variantes más importantes de VRP que tienen como objetivo principal el minimizar los costos totales de sus operaciones.

### **2.2.1 VRP Capacitado**

También conocido como CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem), es la variante VRP más común que existe y se encuentra incluida en casi todas las extensiones más complejas. De acuerdo a [Blasum, 2002; Ralphs, 2004; Shawn, 1998], la característica más importante del CVRP es que posee un número de vehículos con una capacidad limitada  $Q$  la cual no debe exceder en cada ruta que le es asignada.

### **2.2.2 VRP Abierto**

De acuerdo a la definición mostrada en [Pisinger, 2005], el VRP Abierto u OVRP (Opened Vehicle Routing Problem) amplía las propiedades del CVRP al añadir una nueva propiedad a los vehículos que consiste en dejar abierta la posibilidad de que los vehículos puedan regresar o no al almacén después de visitar los clientes de la ruta a la que fue asignado.

### **2.2.3 VRP con más de un Almacén**

En [Mingozi, 2003; Jin, 2004] aparece la definición del VRP con más de un Almacén o MDVRP (Multi-Depot Vehicle Routing Problem). La nueva idea introducida es que en esta variante existe un conjunto de depósitos, a través de los cuales se va a satisfacer la demanda de los clientes. Si los clientes están agrupados en los depósitos (es decir que cada depósito tenga un conjunto específico de clientes asociado, por su cercanía a ellos) se considerará cada grupo como un problema VRP independiente y se resolverá como tal. Por otro lado, si

los clientes y depósito están mezclados entonces se tendrá un caso de la variante MDVRP en donde para minimizar los costos es necesario seleccionar el mejor almacén para abastecer una demanda dada.

#### **2.2.4 VRP con Múltiple uso de Vehículos**

En [Fleischmann, 1990; Taillard, 1995; Dorronsoro, 2005], se describe la variante de VRP con Múltiple uso de Vehículos o VRPM (Vehicle Routing Problem with Múltiple use of Vehicles). A diferencia del VRP estándar donde los vehículos son usados una sola vez, en esta extensión las unidades de transporte pueden ser asignadas a tantas rutas como su tiempo de servicio les permita. El VRPM no solamente busca minimizar los costos totales, sino que también busca reducir el número de vehículos que son necesarios para cubrir las demandas.

#### **2.2.5 VRP con Flotilla Heterogénea**

De acuerdo a [Taillard, 1996; Gendreau, 1998], en el VRP con Flotilla Heterogénea o HVRP (Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem) los clientes son atendidos por un conjunto de vehículos con propiedades diferentes. Las unidades varían en capacidad y costos. Cuando los costos que involucran la flotilla son iguales para cualquier vehículo se denominan costos fijos, mientras que aquellos que difieren por cada unidad de transporte se denominan costos variables.

#### **2.2.6 VRP Periódico**

La definición del VRP Periódico o PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem) se muestra en [Mingozzi, 2003; Dorronsoro, 2005]. La característica principal del PVRP es que el diseño de las rutas se debe desarrollar tomando en cuenta un periodo de planeación de  $p$  días, donde  $p$  es mayor a uno. Durante ese periodo los clientes podrían requerir de  $k$  visitas que podrían necesitar respetar una configuración dada.

En esta variante se generaliza al VRP clásico extendiendo el periodo de planeación de las actividades de transporte de los vehículos a varios días y no solamente a uno como se hace comúnmente en el VRP tradicional.

### **2.2.7 VRP con Entrega y Devolución de Bienes**

En [Gribkovskala, 2005; Dorronsoro, 2005] se describe el VRP con Entrega y Devolución de Bienes o VRPPD (Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery). Esta variante contempla la posibilidad de que los clientes regresen algunos bienes. En otras palabras, en VRPPD tanto el abastecimiento de clientes como la devolución de producto (p.e. envases vacíos) a los almacenes son tareas que hay que tomar en la planeación de las rutas de los vehículos. Dentro de esta ampliación del VRP estándar también se persigue como objetivo la minimización de los vehículos usados para cubrir las demandas.

### **2.2.8 VRP con Ventanas de Tiempo**

De acuerdo a [Jong, 1996; Shawn, 1998; Gambardella, 1999; Dorronsoro, 2005], el VRP con Ventanas de Tiempo o VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) es una extensión del VRP que envuelve una complejidad adicional al agregar la restricción de que los clientes deben ser servidos dentro una ventana de tiempo. Las ventanas de tiempo tienen horas de inicio y fin que forman la nueva condición que obliga a que la hora de llegada de los vehículos se encuentre dentro de ese periodo de tiempo.

Junto a esta variante surge una nueva denominada VRP con Múltiples Ventanas de Tiempo o VRPMTW (Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows) que ha sido estudiada en [Jong, 1996]. VRPMTW puede ser considerada como una generalización del VRPTW por que amplía su definición al uso de diferentes ventanas de tiempo por cliente. En situaciones reales estas ventanas de tiempo variadas se pueden interpretar como los diferentes turnos de trabajo de los empleados.

En estas variantes también se puede considerar como un objetivo a alcanzar el minimizar el número de vehículos usados.

### **2.2.9 VRP con Partición y Entrega**

En [Archetti, 2001; Dorronsoro, 2005] se define VRP con Partición y Entrega o SDVRP (Split and Delivery Vehicle Routing Problem) como una relajación del VRP donde es permitido que un cliente pueda ser servido por diferentes vehículos, si esto reduce el costo general. Esta relajación es muy importante si el tamaño de las órdenes del cliente es mayor o igual a la capacidad del vehículo.

En [Dror, 1994] se concluyó que es más difícil obtener una solución óptima en SDVRP que en el VRP clásico.

### **2.2.10 VRP con Dependencia de Sitio**

La descripción del VRP con Dependencia de Sitio o sdVRP es proporcionada en [Thangiah, 2003]. sdVRP es una extensión en donde algunos clientes deben ser abastecidos por vehículos o almacenes previamente especificados. Esta dependencia en algunos casos se debe a que las condiciones geográficas de los clientes no permiten que toda la flotilla disponible de un almacén pueda ser empleada para cubrir sus pedidos o bien, que debido a la ubicación del depósito no sea redituable su utilización bajo ninguna circunstancia.

### **2.2.11 VRP Dinámico**

El VRP Dinámico o DVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem) es descrito en [Bianchi, 2000]. En esta variante la localización de los clientes o su demanda toman valores iniciales que pueden cambiar en el transcurso de una solución del problema. Esto significa que no se pueden encontrar soluciones a priori, por lo que sólo se determinan estrategias para especificar que acciones deben ser realizadas con base en el estado del sistema.

### **2.2.12 VRP Estocástico**

En el VRP Estocástico o SVRP (Stochastic Vehicle Routing Problem), de acuerdo a [Dorronsoro, 2005], uno o varios componentes del problema son aleatorios, como clientes

estocásticos (los cuales tiene una probabilidad asociada de presencia/ausencia), demanda estocástica y tiempos de servicio y viaje estocásticos. Este enfoque se resuelve a través de un proceso de dos fases; en la etapa inicial se obtiene una solución antes de conocer las variables aleatorias, y en la sucesora se lleva a acabo un proceso de corrección, una vez que los valores de dichas variables son revelados.

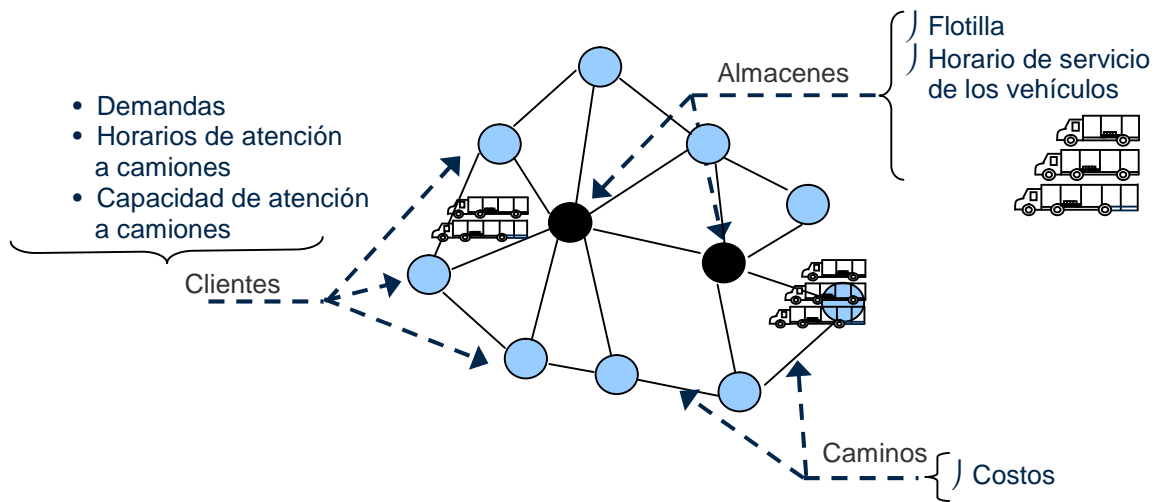
Es importante mencionar que la mayoría de las variantes anteriormente descritas mantiene implícita en su definición, el uso de la extensión CVRP. Generalmente, el CVRP es considerado como el VRP clásico y se asume en cada trabajo de investigación, por lo común que es encontrarlo en situaciones reales.

En la literatura revisada existen pocos enfoques que involucren mas de 5 variantes [Pisinger, 2005; Reimann, 2003] y mucho menos que estén dirigidos a la solución de problemas reales. A continuación se mostrará la descripción de un problema complejo en donde uno de sus sub-problemas se define a través de la combinación de algunas de las variantes VRP previamente descritas.

### **2.3 El Problema de Transporte**

El transporte de productos es una problemática del mundo real en donde entran en consideración numerosos factores como: ubicación geográfica de los almacenes y clientes, capacidad de la flotilla de vehículos y horarios de servicio de los clientes. El objetivo principal consiste en cubrir una serie de demandas respetando las limitantes de operación. Por ejemplo, un almacén puede tener un conjunto de camiones con horarios de servicio limitados, fuera de los cuales no se les puede programar ningún viaje, o bien los clientes podrían necesitar ser atendidos por un conjunto especial de vehículos o en horarios especiales.

En la Figura 2.2 se muestra en forma gráfica los componentes principales del problema de transporte (clientes, almacenes y caminos) y algunas condiciones asociadas a cada uno de ellos.

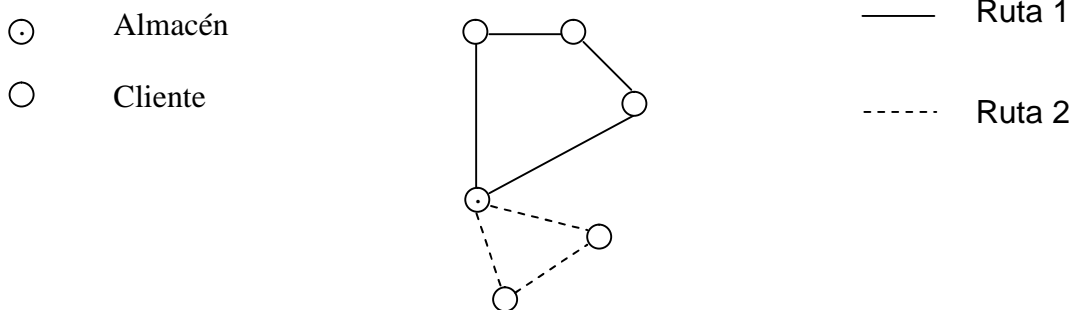


**Figura 2.2.** El Problema de Transporte.

En la transportación de productos, además de buscar satisfacer las demandas de clientes, se requiere resolver otras tareas, entre ellas:

- definir rutas y asignarlas a camiones;
- asignar horarios a camiones; y
- determinar las cargas de camiones.

La definición de rutas es la actividad en la cual se diseñan recorridos para visitar los clientes. La finalidad de esta tarea es crear recorridos que inicien y terminen en el almacén y además visiten todos los clientes, como se muestra en la Figura 2.3.



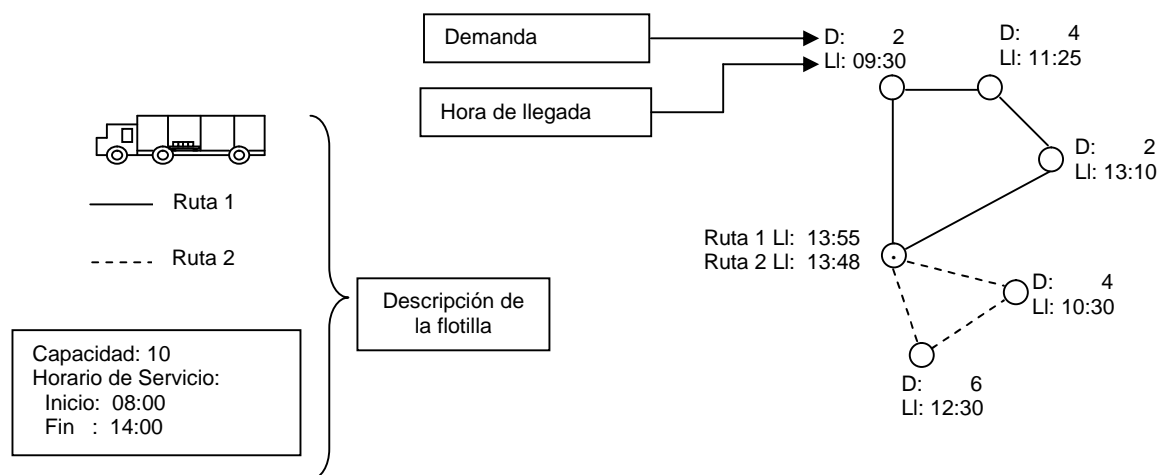
**Figura 2.3.** Ejemplo de Rutas.

En la asignación de las rutas se definen qué vehículos son asignados a cada uno de los recorridos previamente identificados. Esta tarea ocurre de forma natural cuando se

establecen las rutas. Generalmente, para construir las rutas se toman en cuenta las limitantes del almacén, clientes y vehículos; debido a esto, tanto la definición de rutas como su asignación se llevan a cabo simultáneamente.

La programación de los horarios se efectúa una vez que ya han sido asignadas las rutas. Basado en el horizonte de planeación, que es el periodo de tiempo durante el cuál deberán ser satisfechas todas las demandas, se definen las horas de entrada y salida de cada localidad (esto incluye tanto al almacén como a los clientes). Los horarios se elaboran tomando en cuenta limitantes como el horario de atención de los clientes o el horario de servicio de los vehículos.

En la Figura 2.4 se muestra una asignación de rutas que toma en cuenta dos de las posibles limitantes que se pueden hallar en un caso del problema de transporte: capacidad de vehículos y horario de servicio. También se puede apreciar una programación de horarios factible.



**Figura 2.4.** Ejemplo de Asignación de Rutas.

Para algunos distribuidores, en especial las distribuidoras de productos embotellados, además de diseñar y programar horarios de rutas existe otra labor muy importante que deben considerar, la distribución de la carga. Esto se debe a que los productos son de una gran diversidad, con propiedades físicas y lógicas diferentes entre sí.

La distribución de la carga es la tarea que se encarga de precisar la ubicación exacta del producto dentro de un vehículo. Esta actividad también se encuentra restringida por un gran número de factores, los cuales varían de acuerdo a la situación en que se aplique. Algunas limitantes pueden ser: agrupaciones especiales de los productos de acuerdo a categorías, tamaños o pesos; dimensiones de los contenedores donde se van a ubicar los productos; y capacidad del vehículo que transporta el producto. En la literatura especializada, a una versión simplificada de este problema se le conoce como BPP y fue definido previamente en la sección 1.2.2.

En general, las tres actividades principales que constituyen el problema de transporte son la definición y asignación de rutas, la asignación de cargas y la asignación de horarios.

## **2.4 El Problema del Transporte en una Embotelladora de Productos**

Como ya se ha mencionado, la asignación de la carga, junto con el diseño y asignación de rutas y la asignación de horarios, son tareas de la Gestión del Transporte. Éste problema se delineó en forma general en párrafos anteriores, pero en esta sección se describirá como parte de un caso real particular: el de una empresa del sector refresquero. Para facilitar el entendimiento de la situación que se aborda, de ahora en adelante la problemática general abordada se denominará RoSLoP (Routing, Scheduling and Loading Problem, nomenclatura en inglés de los subproblemas asociados a la gestión de transporte).

### **2.4.1 Definición y Asignación de Rutas en una Embotelladora de Productos**

Al problema de definición y asignación de rutas en una embotelladora de productos le llamaremos en esta tesis BPVRP. Este nombre nace de las siglas en inglés del problema que representa (Bottled Product Vehicle Routing Problem) y puede ser considerado como un Rich VRP . Este es un nombre genérico dado a aquellos problemas que involucran un subconjunto de variantes VRP en su definición, como en nuestro caso, con el fin de tener un modelo genérico que corresponda a casos más apegados a la realidad.



La definición del BPVRP incluye 10 extensiones de VRP muy conocidas y 2 nuevas restricciones. El objetivo de esta tarea es asignar rutas a vehículos con el mínimo costo. Las restricciones que deben ser satisfechas en cada ruta se basan en las variantes VRP que definen al problema.

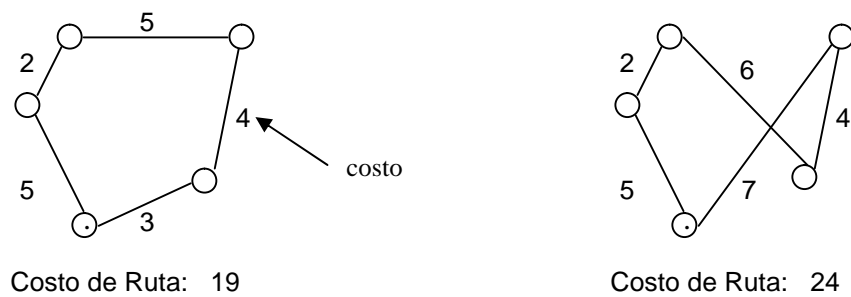
**Tabla 2.1.** Propiedades de BPVRP

<b>Propiedad</b>	<b>Variante VRP Asociada</b>
Vehículos con capacidad limitada.	CVRP
Los vehículos no necesitan regresar al almacén al final de su hora de servicio.	OVRP
Varios almacenes para abastecer los clientes.	MDVRP
Los vehículos pueden ser usados mientras su tiempo de servicio se los permita.	VRPM
Vehículos con diferentes capacidades y costos.	HVRP
El periodo de planeación se puede extender a varios días.	PVRP
Los clientes pueden regresar algunos bienes al almacén.	VRPPD
Los clientes tienen ventanas de tiempo asociadas a ellos durante las cuales deben ser atendidos los camiones.	VRPTW VRPMTW
Algunos clientes depende de conjuntos de vehículos o almacenes específicos para ser atendidos, elementos fuera de ese conjunto no pueden ser usado.	sdVRP
La demanda de los clientes puede exceder la capacidad de los vehículos.	SDVRP
Los almacenes pueden tener demanda.	(ninguna)
Los clientes tienen una capacidad limitada para recibir vehículos.	(ninguna)

La Tabla 2.1 integra todas las restricciones identificadas en los casos BPVRP. La primer columna describe las propiedades de los casos del mundo real, la segunda muestra la variante VRP vinculada a esa propiedad. Las primeras 10 filas corresponden a las extensiones: CVRP, OVRP, MDVRP, VRPM, HVRP, PVRP, VRPPD, VRPTW, sdVRP, SDVRP. Las últimas dos filas representan las nuevas restricciones para las cuales no se identificaron referencias que las involucraran, en la literatura revisada. Estas restricciones son: capacidad limitada en los clientes para atender simultáneamente a los vehículos que los abastecen (CCVRP, Customer Capacity VRP); y la posibilidad de que algunos depósitos puedan ser clientes de otros almacenes (DDVRP, Depot Demand VRP).

En los siguientes párrafos se presentan las restricciones que participan en BPVRP como parte del problema real de transportación se dan a continuación:

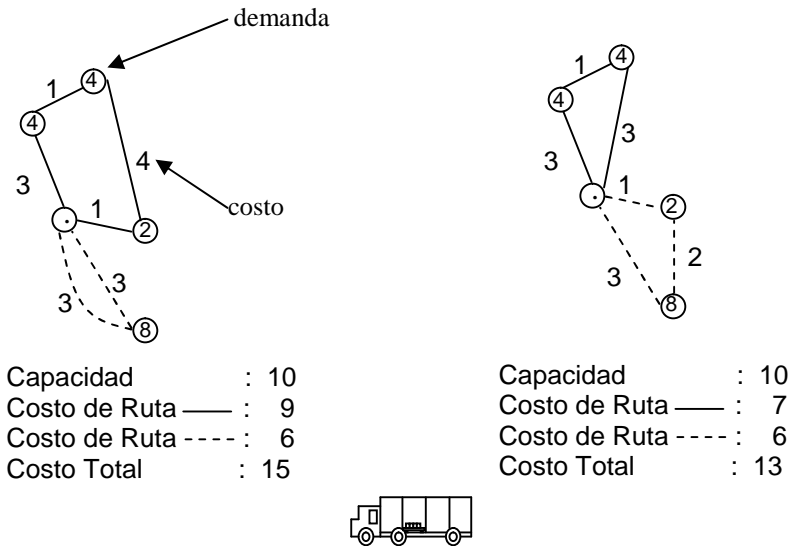
**La ubicación del almacén y los clientes, y el tiempo de viaje.** Este elemento se refiere a las conexiones geográficas que existen entre cada una de las localidades. Cada localidad puede enlazarse con las demás de diferentes maneras, estos enlaces son expresados a través de conexiones. Una secuencia de enlaces entre localidades iniciando y terminando en el almacén forman una ruta. La ruta es evaluada con un costo, que proviene de la suma de los costos que cada conexión tiene. El costo de la ruta puede afectar positiva o negativamente al costo total de la solución final, es por eso que se debe poner especial atención en este punto. En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de cómo afecta la ubicación de las localidades en la solución final.



**Figura 2.5.** Importancia de la selección de conexiones en la minimización del costo de enrutamiento.

**La Demanda de los Clientes.** Se refiere a la cantidad de bien o producto solicitada por un cliente y que debe ser satisfecha por el almacén. En ocasiones las demandas pueden superar la capacidad de los vehículos disponibles por lo cual será necesario programar más de un viaje para satisfacerla.

**Capacidad de los Vehículos.** La capacidad de un vehículo se refiere a qué tanto puede ser llenado el vehículo. Por lo general, ésta es regulada por el peso total o la altura del producto que transporta. Por otro lado, pueden existir otras limitantes como normas de transporte emitidas por instituciones gubernamentales, o por la misma compañía, que restrinjan la carga de un camión dependiendo del lugar por donde transita. Además, una flotilla con vehículos de capacidades diferentes también implica propiedades diferentes que se deben tomar en cuenta, como por ejemplo costos variables. El usar un vehículo convenientemente también puede influir en el costo de una ruta. Aprovechar de manera inteligente su capacidad puede conducir a mejores recorridos pero un mal uso de ella puede provocar un efecto contraproducente. En la Figura 2.6 se da un ejemplo de éstos casos.



**Figura 2.6.** Beneficio en el costo de la solución al usar de forma inteligente la capacidad del camión para satisfacer las demandas.

**Capacidad de los Clientes.** Este aspecto se refiere a la posibilidad de que un cliente pueda atender dos o más unidades de transporte de forma simultánea, es decir, que más de un vehículos descarguen al mismo tiempo en una localidad. Como se mencionó anteriormente, esta es una de las nuevas restricciones (CCVRP) propuestas en el presente trabajo de investigación.

**Tiempo de Servicio de los Vehículos.** Cada uno de los vehículos tiene un periodo de tiempo durante el cual están disponibles para poder transportar productos a los clientes, fuera de ese horario no es posible realizar viajes. Además, los camiones deben regresar al centro de embarque de donde salieron antes de que su horario de trabajo termine. Esta es una restricción durante la creación de las rutas puesto que hay que tomar en cuenta que los viajes de los vehículos se encuentren dentro de su tiempo de servicio.

**Horarios de Atención de los clientes y del almacén.** Así como los vehículos deben respetar un horario, los clientes también deben de ser atendidos en determinados periodos. Cada cliente puede tener horas específicas en las cuales puede recibir el producto, las unidades de transporte deberán estar coordinadas de tal manera que descarguen el producto en los clientes dentro de este tiempo.

***Tiempo de Carga y Descarga de la mercancía.*** Este es el tiempo que el vehículo necesita para poder descargar el producto que suple al cliente, dejándolo listo para iniciar el siguiente viaje (el traslado de un vehículo de una localidad a otra adyacente). La planificación de las rutas debe considerar que el vehículo no sobrepase el horario de atención del cliente al descargar los bienes.

***Lugar de retorno del vehículo.*** En algunas situaciones podría ser conveniente analizar dónde se debe dejar el camión que transporta la mercancía al finalizar su jornada, o simplemente tomar en cuenta la posibilidad de dejar libre el punto de retorno de las unidades de transporte, es decir, no obligarlas a regresar al almacén. Debido al funcionamiento de algunas embotelladoras de productos, éstas pueden encontrar redituable el dejar descansando sus unidades de transporte en lugares diferentes al almacén donde se cargan.

***Almacenes.*** Los almacenes pueden dar origen a dos posibles restricciones: la primera consiste en que puede existir más de un almacén para satisfacer un pedido; la segunda identifica la posibilidad de que los depósitos puedan solicitar producto a otros depósitos. Ambos casos deben tomarse en cuenta durante la planeación de rutas, para poder definir la solución más adecuada.

***Necesidad de retornos de envases.*** Es posible que algunos clientes requieran regresar envases vacíos. Esto representa una carga más del vehículo que deberá ser llenada en los clientes.

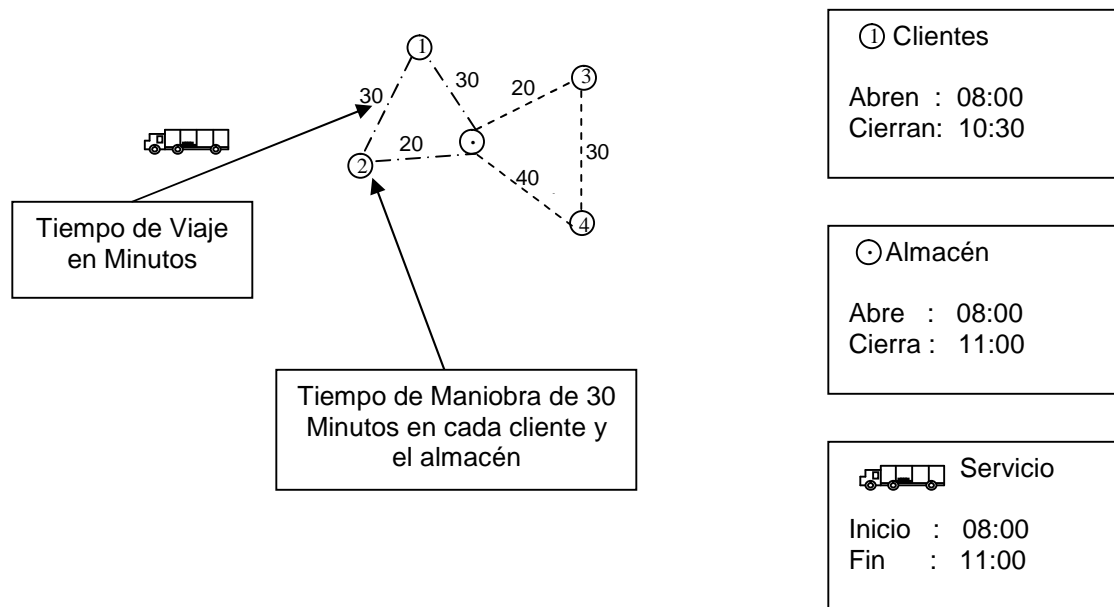
***Dependencia de Sitio.*** En algunas ocasiones los clientes pueden requerir de vehículos especiales para poder ser atendidos, de no contar con ellos su demanda no puede ser entregada. En esta situación es conveniente tomar en cuenta que no se agote por completo el tiempo de servicio de tales vehículos a fin de poder cubrir esas demandas especiales. La unidad de medida de los costos en una embotelladora de productos puede variar, en algunas situaciones se busca reducir el tiempo de reparto de la mercancía, en otras se busca reducir los costos totales; sin embargo es muy común encontrarse que las compañías buscan atacar

ambas situaciones en forma simultánea tratando de encontrar la mejor solución que balancee ambos casos.

En esta tesis se desarrollará un Sistema de Transporte Inteligente cuyo objetivo es únicamente minimizar el número de vehículos, considerando las condiciones impuestas por variantes de VRP tales como: CVRP, VRPTW, HVRP, SDVRP, sdVRP, VRPM y CCVRP.

### 2.4.2 Asignación de Horarios en una Embotelladora de Productos

La asignación de horarios en una embotelladora de productos se crea de acuerdo a las rutas que se hayan construido y al periodo de planeación durante el cuál se pretenda satisfacer todas las demandas. El factor a considerar en este aspecto es el horizonte de planeación.



- - - - Ruta 1	Salida del Almacén	1er. Visita a Cliente 1		2a. Visita a Cliente 2		Retorno al Almacén
	Salida	Llegada	Salida	Llegada	Salida	Llegada
	8:30	09:00	09:30	10:00	10:30	10:50
- - - - - Ruta 2	Salida del Almacén	1er. Visita a Cliente 3		2a. Visita a Cliente 4		Retorno a Almacén
	Salida	Llegada	Salida	Llegada	Salida	Llegada
	8:30	08:50	09:20	09:50	10:20	11:00

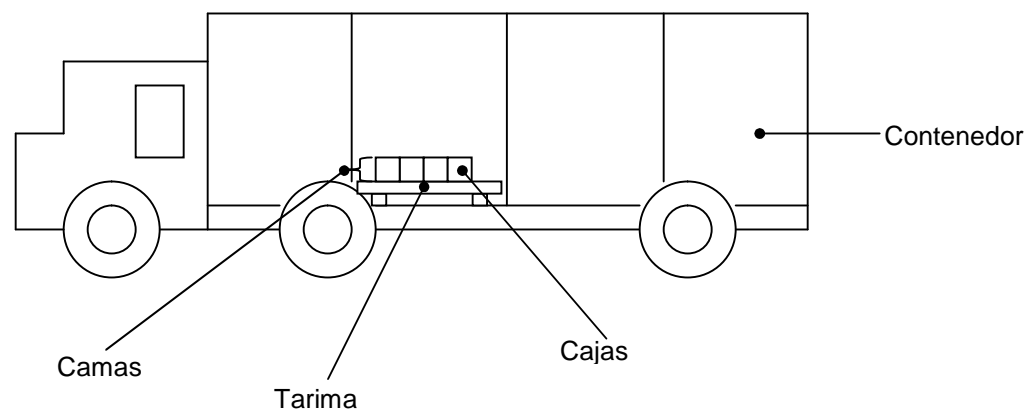
Figura 2.7. Diseño de una ruta tomando en cuenta Límites de Horarios.

**Horizonte de Planeación.** El horario de servicio del almacén normalmente se ajusta al horario de servicio de los vehículos, pero puede ser independiente, es decir, un horario donde se definen dos tiempos diferentes, uno para carga de productos y otro de retorno de unidades móviles. En la Figura 2.7 se muestra la planeación de rutas tomando en cuenta los horarios de servicio de vehículos, clientes y almacén.

### 2.4.3. La Distribución de Carga en una Embotelladora de Productos

Esta tarea es completamente independiente de las otras dos actividades: definición y asignación de rutas, y asignación horarios. Su objetivo es acomodar el producto de forma eficiente dentro de los vehículos. En la embotelladora de productos que se tomó en cuenta para formular el problema de investigación, la organización de la mercancía se hace en contenedores dentro de los vehículos, y se deben respetar ciertas restricciones de acomodo.

**Restricción de Capacidad de Contenedores.** Esta restricción limita la cantidad de producto que puede acomodarse en cada contenedor. Un contenedor es una sección física localizada en el vehículo donde se puede colocar producto, como se ve en la Figura 2.8. Para poder hacer esto se definen unidades de asignación de producto a contenedores, las cuales pueden ser cajas, camas o tarimas.



**Figura 2.8.** Descripción de las unidades de asignación del vehículo

**Propiedades de las Cajas de Productos.** La unidad de asignación mínima son cajas de productos, esta es la unidad base con la que los clientes hacen su pedido. Las cajas no

pueden tener producto mezclado y poseen algunas propiedades que se hacen necesarias para la labor de distribución. Entre ellas se encuentran las siguientes (ver Figura 2.9):

*Altura.* Es la longitud vertical de la caja que contiene el producto.

*Peso.* Es el peso total de la caja llena de producto.

*Peso Soportado.* Es una medida general de cuánto producto puede ser colocado arriba de una caja sin que el producto que ésta contenga sufra daño alguno. En otras palabras es la resistencia del producto. Esta propiedad es muy importante por que es la que permite controlar cuánto producto puede ir arriba de otro producto, el manejo inteligente de la misma puede llevar a distribuciones eficientes.

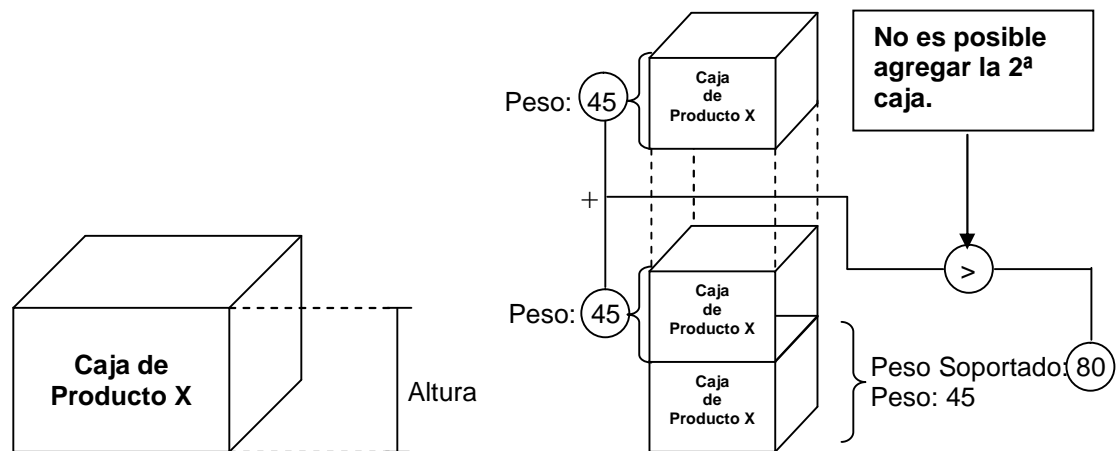
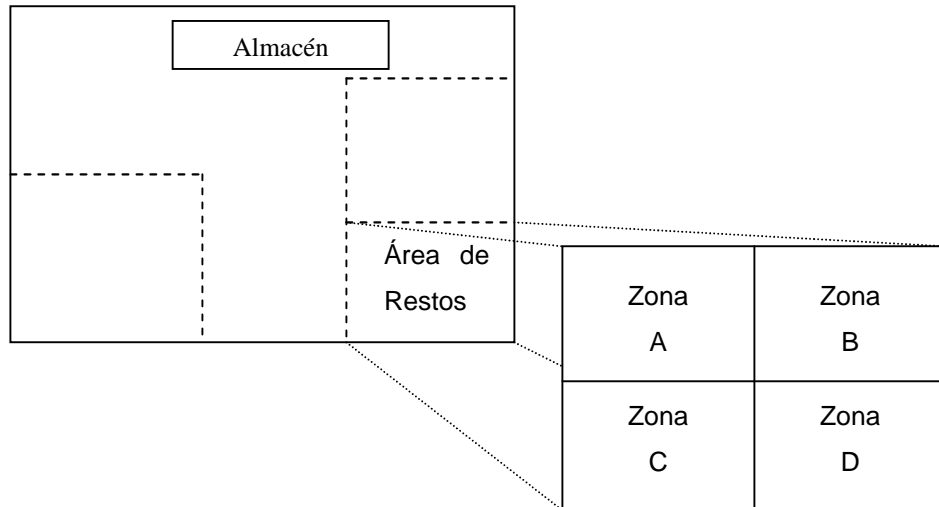


Figura 2.9. Descripción de las cajas de producto y sus propiedades.

Además de las propiedades físicas de los productos mencionadas anteriormente, existen dos propiedades más que se deben tomar en cuenta al momento de distribuir mercancía, estas son:

*Categoría.* La categoría es una característica que permite identificar qué productos son compatibles al asignarse el mismo valor en esta propiedad. La similitud que se expresa con esta propiedad es en cuestión de dimensiones, es decir, productos de la misma categoría son productos cuyas diferencias son despreciables para la labor de distribución y se optan por tomarlos como iguales al momento de construir camas.

*Área de Restos.* Al igual que categoría, éste valor también identifica compatibilidad de los productos, pero en este caso es en relación con la ubicación de productos. El área de restos es el área donde se encuentra localizado todo el producto perteneciente a tarimas incompletas y se encuentra dividido en zonas, cajas de productos de la misma zona podrán combinarse para formar unidades de asignación más complejas como camas o tarimas (ver Figura 2.10).



**Figura 2.10.** Áreas de Restos de los Almacenes. Área de donde se extrae parte del producto para satisfacer la demanda.

**Propiedades de las Camas de Productos.** Debido a la dificultad de asignar las cajas a los contenedores de los vehículos, se requiere la creación de camas y tarimas. Las camas son conjuntos de cajas ordenadas de tal manera que su largo y ancho se ajuste al del contenedor del camión. Existen dos tipos de camas, mezcladas y completas. Las camas mezcladas son aquellas formadas por productos diferentes, pero compatibles, esto se define a través de las propiedades de categoría y área de restos. Las camas completas son aquellas cuyo producto es homogéneo, es decir idénticos en todos los aspectos. Al igual que las cajas individuales, las camas poseen algunas propiedades necesarias para poder realizar la distribución, estas propiedades son:

*Número de Cajas de Producto.* Este valor no es constante y depende del producto que las compone. Se refiere al número de cajas que forman la cama.

*Altura.* La altura de una cama es la altura del producto del cual se compone. En camas mezcladas o completas, cuando el producto es variado, la altura es la altura

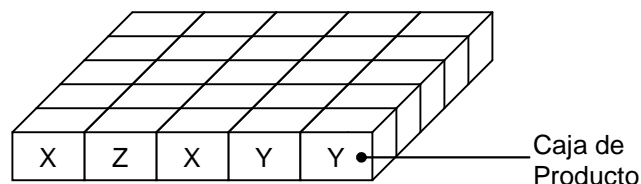


de cualquiera de los productos que la contienen, esto es así por que para poder combinarlos en una cama deben tener la misma categoría, lo cual asegura que el producto sea compatible. Ser compatible significa que las diferencias de altura, el largo y el ancho de los productos no existen o son despreciables.

*Peso.* El peso de una cama varía de acuerdo al producto que la forma. El método para determinarlo es el mismo tanto para camas mezcladas como para completas. Este es igual a la sumatoria de los pesos de cada una de las cajas que hay en ella. Es importante mencionar que el número de cajas en una cama no es constante y que cuando la cama es mezclada se debe considerar que las cajas pueden tener pesos no homogéneos entre sí.

*Peso Soportado.* El peso soportado de una cama se define como el menor peso de soporte de las cajas que la componen. En otras palabras, de todas las cajas de producto que forma la cama, aquella cuyo peso soportado sea el menor será la que dé el valor de peso soportado de la cama. Cuando la cama es completa, el peso soportado puede ser el de cualquier caja de producto puesto que todos son iguales, cuando la cama es mezclada se emplea el método anterior.

*Categoría y Área de Restos.* Estas propiedades se heredan de cualquier producto dentro de la cama.



**Figura 2.11.** Cama Mezclada de producto; varias cajas forman esta unidad de asignación.

**Propiedades de las Tarimas de Productos.** A pesar de que las camas proporcionan una unidad de asignación más cómoda, es necesario adaptarse a las condiciones físicas del almacén. En algunas embotelladoras de productos, éstos se organizan en tarimas completas y en áreas de restos. Una tarima completa es un número de camas homogéneas apiladas una sobre otra que no sobrepasan el peso soportado de los productos. Las tarimas completas no son tan altas como los contenedores y son resultado de la producción y organización del almacén. Éstas son las primeras en utilizarse para cubrir las demandas de los clientes. El

área de restos es un lugar especial donde se mandan las tarimas que han quedado incompletas y generalmente tiene zonas dentro de ellas para clasificar productos.

En general, las tarimas son una unidad de asignación que surge de la necesidad de control del producto dentro del almacén y para facilitar su manejo por los montacarguistas, quienes mueven el producto dentro del almacén y del almacén al vehículo. Las tarimas pueden ser homogéneas, ó completas como las descritas en el párrafo anterior, o heterogéneas o mezcladas. Las tarimas mezcladas se crearon para facilitar a los montacarguistas el manejo del producto. Sus propiedades son muy similares a las de las tarimas completas e incluyen:

*Numero de Camas de Producto.* Cuando se trata de tarimas completas el número de camas es fijo y dependiente del tipo de producto. En tarimas mezcladas no existe un número de camas fijo, depende de la altura límite para la tarima mezclada.

*Altura.* Éste es un valor fijo para tarimas completas, que varía de acuerdo al tipo de producto que las forma. Las tarimas mezcladas varían la altura pero tienen un límite de altura establecido del cual no se deben exceder.

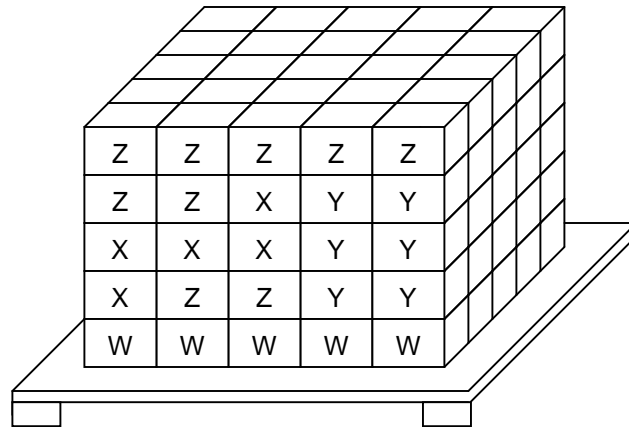
*Peso.* Es el acumulado de las cajas de producto que conforma la tarima.

*Peso Soportado.* Se puede calcular fácilmente restando al peso soportado de la cama inferior de la tarima los pesos de las camas que se encuentren encima de ella dentro de la misma tarima.

*Área de Restos.* En las tarimas sucede lo mismo que en las camas, ésta propiedad se hereda de cualquier producto dentro de la tarima, todas deben tener la misma, no se permite productos de diferentes áreas de restos en una tarima.

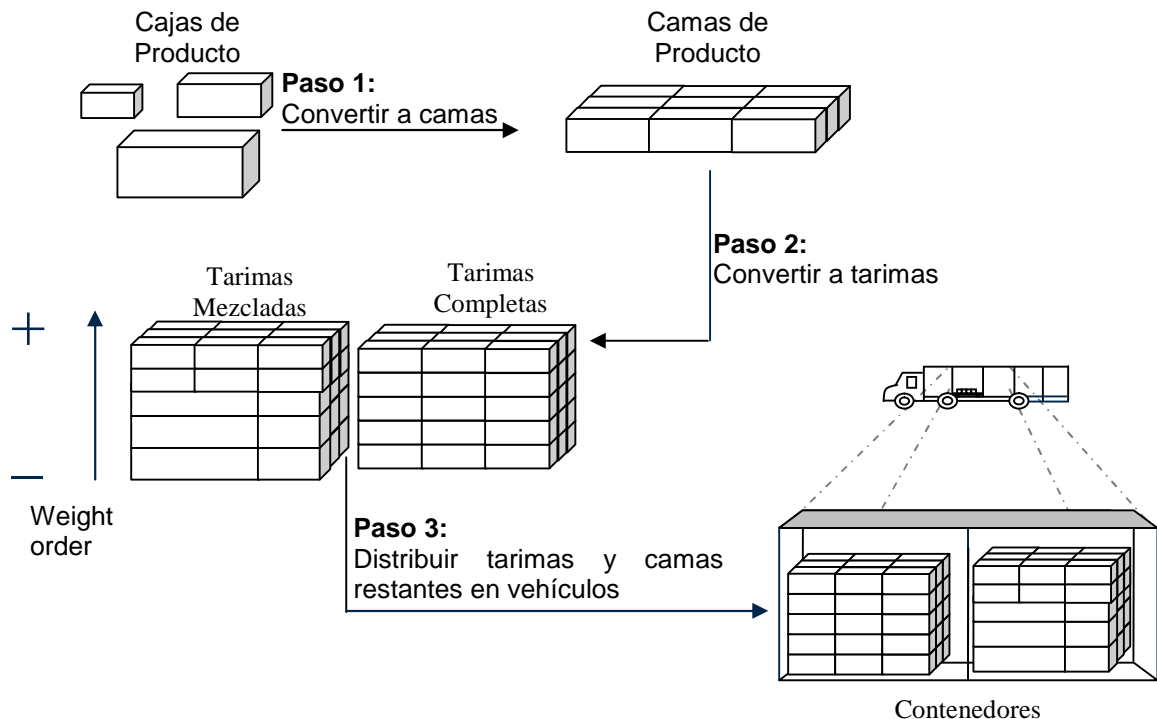
Las tarimas ya no tienen categoría por que ya no importa como son los productos de una cama y otra, mientras no rebasen la altura límite.

Un aspecto muy importante a tomar en cuenta es que una tarima es un tablón de madera donde se colocan las camas de producto, la unidad de asignación recibió ese nombre por que es ahí donde se organiza el producto que será enviado al vehículo. La cantidad de producto que se puede colocar en ese tablón es de acuerdo al tipo de tarima que se trate, completa o mezclada.



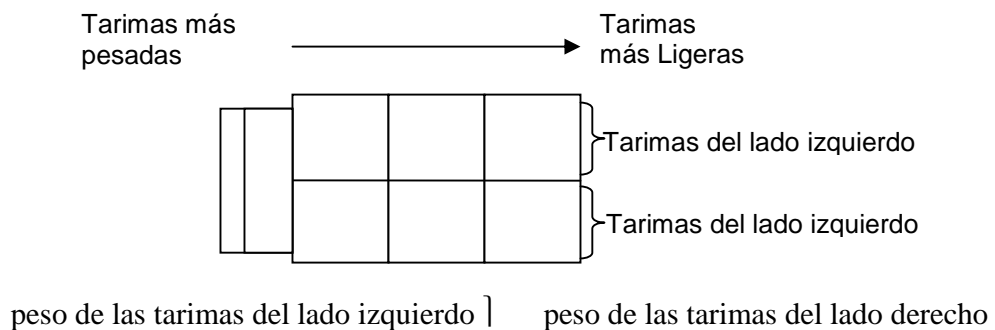
**Figura 2.12.** Tarima Mezclada.

Una vez que ya se tienen construidas las unidades de asignación, se procede a asignarlas a los vehículos. El procedimiento general de asignación se muestra en la Figura 2.13.



**Figura 2.13.** Procedimiento General para Distribuir la carga en el Vehículo.

**Restricciones de Balanceo de Carga.** Para asignar las tarimas a los vehículos se deben respetar algunas condiciones de balanceo de carga. Primero, las tarimas más pesadas deben de estar ubicadas en la parte frontal del vehículo, mientras que las más ligeras deberán ir atrás. Segundo, ambos lados del vehículo deberán de estar en balance, es decir, el peso total de las tarimas que se encuentran del lado derecho del vehículo deberá ser aproximado a la suma de los pesos de las tarimas del lado izquierdo. Considerando estos dos puntos la asignación de las tarimas puede llevarse a cabo. La Figura 2.14 muestra el esquema de asignación descrito en este párrafo.



**Figura 2.14.** Organización del balanceo de la carga en vehículos.

## 2.5 Complejidad del Problema de Transporte

En esta sección se presenta un análisis de la complejidad del problema de transporte a través del estudio de los problemas que se han identificado como parte de él de acuerdo a su naturaleza.

### 2.5.1 Teoría de NP-Completez

En los problemas de tipo combinatorio el método tradicional para encontrar una solución óptima es realizar una búsqueda exhaustiva en el conjunto de soluciones posibles, es decir generar todas las configuraciones factibles, calcular su costo y elegir aquella que ofrezca mejores resultados. Desafortunadamente esta metodología no es eficiente, pues el tiempo de cálculo crece exponencialmente con base en el tamaño de la instancia del problema.

Como se dice en [Garey, 1977], en 1971 Stephen Cook propuso los fundamentos para lo que hoy se conoce como la teoría NP-Completez. Esta conjetura permite clasificar a los problemas en dos clases:

- ) Clase P: aquellos para los que se conocen algoritmos de solución en tiempo polinomial, considerándose solubles eficientemente; y
- ) Clase NP, donde pertenecen la mayoría de los problemas encontrados en la práctica, pues para éstos se desconoce un algoritmo polinomial de resolución.

Stephen Cook demostró que existen problemas de decisión NP, los cuales son extremadamente complicados, denominándolos NP-Completos. A la versión de optimización de éstos los nombró NP-duros, ya que implican mayor grado de dificultad.

### **2.5.2 Complejidad del Enrutamiento**

El VRP es un problema de optimización entera de naturaleza NP-duro, esto significa que el esfuerzo computacional requerido para resolverlo incrementa exponencialmente en relación al tamaño del mismo.

La dificultad combinatoria del VRP recae conceptualmente en la intersección de dos tipos de problemas bien conocidos:

- ) El Problema del Agente Viajero (TSP – Traveling Salesman Problem). Suponiendo que la capacidad del vehículo es infinita, un VRP se simplifica al hecho de encontrar un circuito hamiltoniano, lo cual es la definición del TSP. Por otro lado si la capacidad de los vehículos es finita, de tal forma que es imposible satisfacer a todos los clientes en un solo recorrido, el VRP puede representarse como un TSP Múltiple (MTSP – Multiple Traveling Salesman Problem), una instancia de MTSP puede ser transformada en su equivalente TSP añadiendo al grafo  $k-1$  (siendo  $k$  el número de rutas) copias adicionales del nodo centro de embarque y sus arcos incidentes (no existiendo arcos entre los  $k$  nodos y el centro de embarque).

- ) El Problema del Empacado en Contenedores (BPP – Bin Packing Problem). El VRP puede visualizarse como un BPP, suponiendo que cada ruta es análoga a un contenedor y cada pedido de un cliente a un objeto cuyo peso es el costo de viaje para satisfacer la demanda del mismo.

De lo anterior se puede inferir que una solución factible al VRP es una trayectoria TSP (en un grafo expandido) que satisface las restricciones del BPP, es decir el VRP se puede definir como una intersección entre TSP y BPP. Dado que TSP y BPP son NP-duros [Garey, 1997], se sigue que VRP (siendo aún más complejo) también pertenece a la clase NP-Duro.

Puesto que este tipo de problemas son intratables polinomialmente, no existe un algoritmo exacto capaz de resolver instancias relativamente grandes. Para tal situación es deseable obtener soluciones aproximadas y cercanas a lo óptimo, las cuales puedan ser encontradas en forma rápida y sean lo suficientemente adecuadas para cumplir con el objetivo planteado. Debido a que en la mayoría de las aplicaciones prácticas se prefiere reducción de tiempo sobre exactitud de la solución, dicho enfoque es abordado mediante el uso de métodos aproximados.

### **2.5.3 Complejidad de la Programación de Horarios y Carga de Vehículos**

La tarea de programación de horarios también es NP-dura debido a que ésta problemática es considerada como una variante de VRP [Marinakis, 2002]. En este trabajo de investigación, la programación de horarios es inicialmente resuelta junto con el problema de asignación de rutas, sin embargo, en la solución se obtiene un horario estándar que debe ser transformado al horario real manejado por la embotelladora; para cada cliente asignado a los vehículos disponibles. La generación de los horarios reales en este trabajo de investigación es un proceso cuya complejidad algorítmica es de  $O(mn)$  donde  $m$  es el número de vehículos disponibles para cubrir las demandas y  $n$  es el número de clientes con una demanda a satisfacer.

Por otra parte, el subproblema de la distribución de carga, donde el pedido de los clientes se necesita distribuir en los contenedores de los vehículos, se puede ver como un problema de empacado o BinPacking, en el cual los artículos a acomodar representan la demanda y los contenedores son justamente los contenedores de los vehículos. Debido a que BinPacking es un bien conocido problema NP-duro [Martello, 1990], la distribución de la carga también se encuentra dentro de este grupo, incrementando la dificultad de nuestro problema debido a que tiene presente dos problemas de ese tipo.

# Capítulo 3

## Estado del Arte

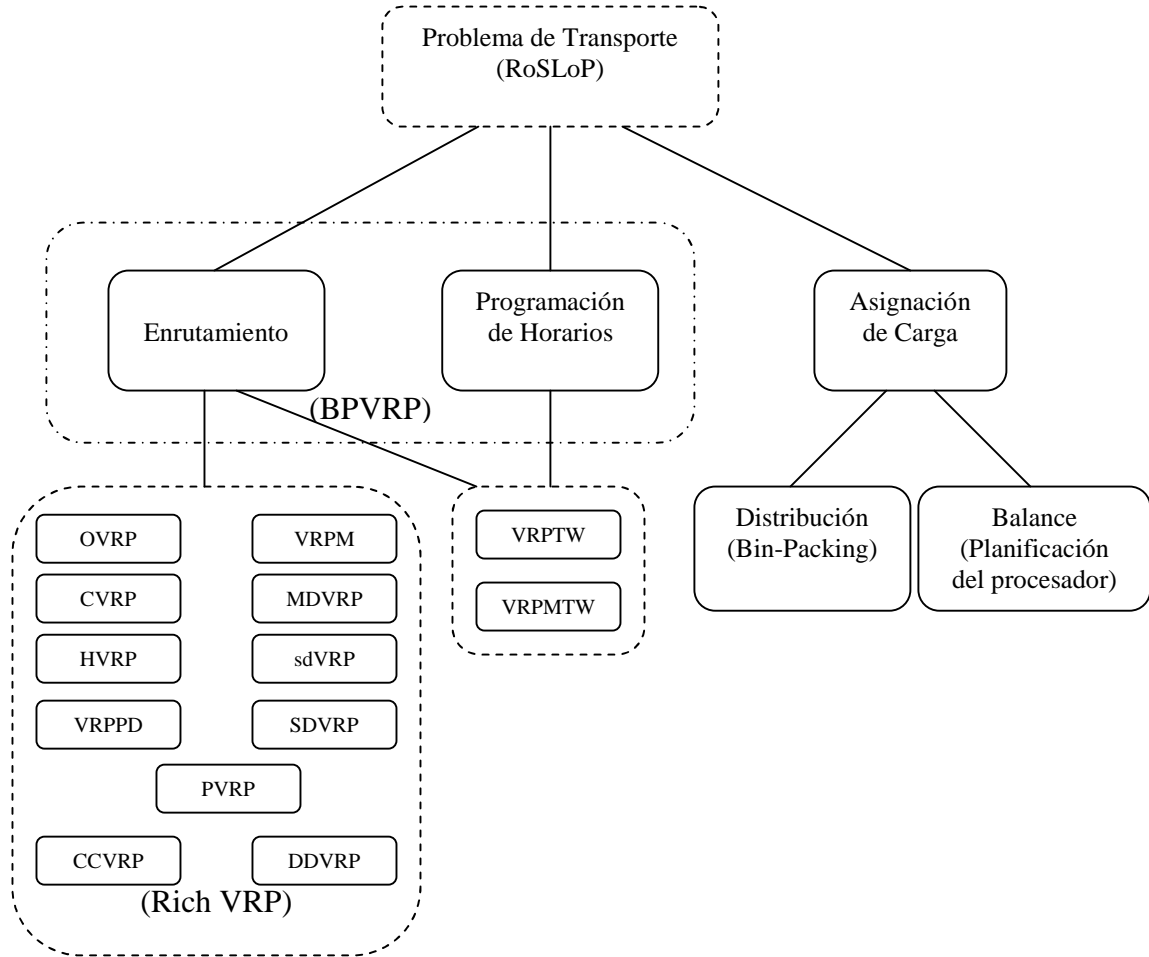
---

En la primer sección de este capítulo se muestra un diagrama de los problemas de optimización involucrados con el problema RoSLoP. En la segunda sección se presentan los trabajos que han abordado el problema VRP. La tercer sección proporciona una revisión del software comercial que ha resuelto el problema de transporte para situaciones reales. Se concluye este capítulo con un análisis de los trabajos relacionados.

### 3.1 Problemas de Optimización involucrados

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de árbol que describe la relación de todos los problemas que participan en la definición del problema RoSLoP. Como se puede ver en la Figura 3.1, el problema VRP forma parte de la definición de dos subproblemas de RoSLoP: enrutamiento y programación de horarios. Esto demuestra la importancia del estudio de este problema, y sus algoritmos de solución, para la construcción de metodologías que resuelvan el problema de transporte.





**Figura 3.1.** Relación de los problemas que participan en el Problema RoSLoP.

Por otro lado, la tarea de asignación de carga de RoSLoP se puede relacionar con dos problemas de optimización comunes: BinPacking y el problema de la Planificación de uso del Procesador de una Computadora. El análisis de los mecanismos de solución de BinPacking se pueden aplicar para resolver la parte de distribución de la carga, lo cual queda como un trabajo futuro de esta investigación; mientras el uso de técnicas para planificar el uso del procesador, como la estrategia Round Robin empleada en este proyecto, pueden emplearse durante el balanceo.

### 3.2 Trabajos relacionados con VRP

El VRP ha sido ampliamente abordado por una gran cantidad de investigadores con diversas metaheurísticas y algoritmos exactos (los esfuerzos de éstos últimos han ido

encaminados a resolver sólo pequeñas instancias), en la Tabla 3.1 se muestra algunos de los trabajos más importantes, desarrollados para distintas variantes.

**Tabla 3.1.** Estado del Arte de las variantes del VRP.

<b>Variante</b>	<b>Abordado por</b>	<b>Perspectiva Algorítmica</b>	<b>Enfoque de Solución</b>
CVRP	[Fisher, 1994]	Ramificación y Poda	Exacto
	[Bullnheimer, 1997]	Sistema de Colonia de Hormigas	Metaheurístico
	[Blasum, 2002]	Ramificación y Poda	Exacto
	[Pisinger, 2005]	Búsqueda Adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
VRPTW	[Shawn, 1998]	Búsqueda por Entornos Grandes	Metaheurístico
	[Gambardella, 1999]	Múltiple Sistema de Colonia de Hormigas	Metaheurístico
	[Bräysson, 2001a]	Algoritmo Genético	Metaheurístico
	[Baran, 2003]	Sistema de Colonia de Hormigas	Metaheurístico
	[Pisinger, 2005]	Búsqueda Adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
MDVRP	[Hjorring, 1995]	Búsqueda Local	Metaheurístico
	[Pisinger, 2005]	Búsqueda Adaptativa por entornos grandes	Metaheurístico
SDVRP	[Feillet, 2002]	Ramificación y Costo	Exacto
sdVRP	[Pisinger, 2005]	Búsqueda Adaptativa por Entornos Grandes	Metaheurístico
VRPPD	[Righini, 2000]	Algoritmos de particionamiento de recorridos	Heurístico
VRPB	[Jacobs, 1992]	Heurística de Asignación Generalizada	Heurístico
DVRP	[Tian, 2003]	Hormigas Híbrido	Metaheurístico
	[Chitty, 2004]	Hormigas Híbrido	Metaheurístico
SVRP	[Laporte, 1998]	Método Entero “Forma L”	Exacto
TDVRP	[Gambardella, 2003]	Sistema de Colonia de Hormigas	Metaheurístico
VRPM	[Taillard, 1995]	Búsqueda Tabú	Metaheurístico
HVRP	[Gendreau, 1998]	Búsqueda Tabú	Metaheurístico
PVRP	[Cordeau, 1997]	Búsqueda Tabú	Metaheurístico

A la par de la investigación del estado del arte, se realizó una indagación sobre el software similar existente, ésta se presenta en la siguiente sección.

### 3. 3 Software Comercial Afín

En la Tabla 3.2 se muestra el software afín más utilizado en el área comercial. En la primer columna se muestra el nombre del programa comercial; la segunda columna presenta las variantes que logran resolver; la tercer columna corresponde a nuevas restricciones consideradas; la cuarta columna indica el país donde fue creado el software; por último la quinta columna proporciona los sistemas operativos compatibles con el software.

**Tabla 3.2.** Estado del Arte de software comercial afín.

<b>Software</b>	<b>Variantes VRP abordadas</b>	<b>Restricciones Adicionales</b>	<b>País de origen</b>	<b>Sistemas Operativos</b>
A. MAZE routes	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Restricciones de viaje</li> <li>▪ Caminos de peaje</li> <li>▪ Restricción de carreteras</li> </ul>	Canadá	Windows
A. MAZE zones	CVRP VRPTW DVRP HVRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	Canadá	Windows
ArcLogistics Route	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
BUSTOPS	VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Restricción de carreteras</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
DynaRoute	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
OPTRAK	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	Reino Unido	Windows
Compass	DVRP VRPTW PDVRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
DirectRoute	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
CATRIN	CVRP VRPTW Site Dependent VRP PVRP HVRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conexiones asimétricas</li> <li>▪ Costo de entrega dependiente de la hora</li> <li>▪ Cambios en información del cliente</li> <li>▪ Restricción de carreteras</li> </ul>	Alemania	Windows
ILOG Dispatcher	CVRP VRPMTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelado de restricciones complejas para rutas, p.ej. cliente fuera de servicio durante cierto tiempo por causas externas</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows Linux
ROADNET	CVRP VRPTW	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Restricción de Equipo</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
RoutSmart	CVRP VRPTW Site Dependent VRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
RoutTronic	CVRP VRPTW PDVRP Site Dependent VRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
ShipConsII	CVRP VRPTW DVRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows
STARS	CVRP VRPMTW HVRP PVRP Site Dependent VRP MDVRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ninguna</li> </ul>	E.E.U.U.	Windows UNIX

### 3.4 Análisis de Trabajos Relacionados

Un área emergente en el estudio del problema VRP es la investigación sobre un tipo de casos especiales que involucran la solución de variantes complejas (formadas por un conjunto de variantes VRP). Estos nuevos problemas se denominan Rich VRP, y representan un área emergente sobre la cual se están llevando a cabo análisis profundos. La Tabla 3.3 resume alguno de los trabajos más significativos al respecto, muestra las variantes de interés para la definición de RoSLoP y las compara con las abordadas por diferentes autores.

**Tabla 3.3.** Análisis de trabajos de investigación sobre variantes Rich VRP

Autor	Variantes que aborda											
	CVRP	OVRP	VRPTW	VRPMTW	HVRP	VRPM	MDVRP	SDVRP	sdVRP	VRPPD	CCVRP	DDVRP
[Feillet, 2002]	✓		✓					✓				
[Dondo, 2003]	✓											
[Hajri, 2003]	✓		✓		✓		✓					
[Ralph, 2004]	✓											
[Pisinger, 2005]	✓	✓	✓				✓	✓				
[Ropke, 2004]	✓		✓				✓			✓		
RoSLoP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Como se puede observar en la Tabla 3.3, la mayoría de los investigadores científicos se han centrado en estudiar hasta cuatro variantes de VRP en conjunto; la única excepción es [Pisinger, 2005], quien aborda cinco variantes empleando una sola técnica de solución. Aún así su trabajo es muy limitado para tomarse como base de solución del problema RoSLoP ya que, aunado a esto, se encuentra la desventaja de no contar con una variante que aborde también la tarea de asignación de carga.

Por otro lado, como puede apreciarse en la Tabla 3.2 del software comercial, la mayoría de los sistemas desarrollados resuelven cuatro variantes del VRP o menos, sólo CATRIN y STARTS abordan cinco y seis de ellas respectivamente. Además la mayoría de este tipo de software es endémico de la región donde fue desarrollado, pues utiliza bases de datos de carreteras del país en el cuál se diseñó, por lo que su uso en México es poco probable.

También se presenta como una desventaja el costo de los programas comerciales. De acuerdo a una revisión de los programas hecha en [Hall, 2004], el precio de las aplicaciones que se pueden encontrar hoy en día varía de ocho mil a diez mil dólares, sin incluir los costos de mantenimiento.

Debido a esto, se puede decir que los métodos desarrollados y publicados en la comunidad científica resuelven problemáticas de VRP muy limitadas y no pueden ser escaladas a versiones más complejas del mismo, ni utilizadas en problemáticas de transporte que involucran otras tareas diferentes de enrutamiento.

La metodología que se propone en esta tesis pretende resolver mediante un enfoque heurístico, un conjunto amplio de variantes de VRP, y mediante un enfoque integral resolver simultáneamente tareas de enrutamiento, programación de horarios y carga de vehículos, las cuales definen problemas del mundo real.

# Capítulo 4

## **Modelo de Programación Lineal Entera para la Asignación de Rutas**

---

Debido a la complejidad del problema de transportación que se aborda en esta tesis y que hemos denominado RoSLoP, se delimitó el alcance de su definición formal. En el modelo formulado mediante Programación Lineal Entera (ILP, Integer Linear Programming), sólo se consideró la tarea de asignación de rutas; sin embargo, la metodología de solución resuelve las tres actividades. Las condiciones dadas por la empresa de transportación estudiada hacen a RoSLoP más general que el problema clásico de enrutamiento de vehículos VRP.

Este capítulo inicia con una revisión de trabajos relacionados con la formulación de modelos ILP para el problema de enrutamiento de vehículos VRP. El análisis revela que los modelos previos no abordan todos los aspectos considerados en esta investigación. Finalmente se presentan los elementos que conforman al modelo matemático.

### **4.1 Trabajos Relacionados**

En la presente sección se muestra el modelo matemático formulado para describir el problema de asignación de rutas BPVRP, el cual incluye siete variantes del problema

clásico VRP. En la literatura revisada se identificaron numerosos modelos matemáticos que abordan a lo más cuatro variantes de VRP; dichos trabajos sólo describen subconjuntos de las variantes de VRP modeladas en este proyecto de investigación.

En la Tabla 4.1 se muestra el resumen de los trabajos de investigación que sirvieron de base para el modelo ILP de este proyecto. Entre ellos se encuentran: [Ralph, 2004], que describe un modelo matemático para el CVRP; [Hajri, 2003] que formula el problema VRP con múltiples ventanas de tiempo en el depósito y uso múltiple de vehículos, en forma implícita también se restringe la capacidad de los vehículos; [Feillet, 2002] que proporciona un modelo para el VRPTW con Particionamiento y Entrega (SDVRPTW); y [Dondo, 2003] que proporciona un modelo ILP del HVRP con múltiples almacenes, y restricciones de ventanas de tiempo y capacidad.

**Tabla 4.1.** Modelos Matemáticos de diferentes problemas VRP.

Autor	Variantes que aborda								
	CVRP	VRPTW	VRPMTW	HVRP	VRPM	MDVRP	SDVRP	sdVRP	CCVRP
[Feillet, 2002]	✓	✓					✓		
[Dondo, 2003]	✓								
[Hajri, 2003]	✓	✓		✓		✓			
[Ralph, 2004]	✓								
En este trabajo de Investigación <sup>1</sup>	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Es importante mencionar que debido a la complejidad del problema, el modelo ILP solo describe tareas de asignación de rutas del problema RoSLoP. Para formular matemáticamente este problema es necesario definir un conjunto de constantes y variables que contienen los datos sobre los casos RoSLoP.

## 4.2 Agentes y Eventos

Con la finalidad de construir el modelo ILP fue necesario definir algunos conjuntos de elementos que permitieran describir los agentes y eventos del problema RoSLoP. En la Tabla 4.2 se muestran los conjuntos usados para definir BPVRP.

**Tabla 4.2.** Conjuntos del Modelo ILP de la tarea de Asignación de Rutas.

<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
$N$	Conjunto de clientes
$N_v$	Clientes que debe ser abastecido por el almacén $v$ , $N_v \in N \cup V$ .
$V$	Conjunto de Almacenes. Debido a que algunos almacenes pueden ser clientes, hay un conjunto implícito que mantiene la relación de las localidades (almacenes y clientes) y se representa por $N \cup V$ .
$C$	Flotilla de vehículos.
$C_v$	Subconjunto de vehículos que pertenece a un almacén $v$ .
$K$	Conjunto máximo de rutas necesarias para satisfacer las demandas de los clientes con la flotilla disponible. La cardinalidad de este conjunto es igual a: $\sum_{v \in V} K_v$
$K_v$	Conjunto de rutas asignado a un almacén $v$ que no podrá ser asignado a ningún otro almacén, $K_v \in K$
$T$	Conjunto de turnos u horarios de atención en los clientes.
$T_m$	Conjunto de horarios pertenecientes a un cliente $m$ .
$P_{max_v}$	$\max(P_{mv}), \forall m \in N \cup V - v$ , la demanda más grande que debe ser satisfecha por el almacén $v$ .
$C_{min_v}$	$\{Capacidad_c \mid c \in C_v, \text{ y } \min(Capacidad_c)\}$ , $\forall c \in C$ , es la capacidad más pequeña de los camiones del almacén $v$ .

Para calcular la cardinalidad máxima de cada subconjunto  $K_v$  se utiliza la ecuación (4.1).

$$\left| K_v \right| = \left| C_v \right| \cdot \left( \frac{P_{max_v}}{C_{min_v}} \right) \quad (4.1)$$

### 4.3 Parámetros y Variables

La Tabla 4.3 muestra la definición de parámetros necesarios para describir la tarea de asignación de rutas de un caso BPVRP.

**Tabla 4.3.** Definición de Parámetros.

<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
$P_{vm}$	Pedido solicitado por el nodo $m$ al almacén $v$ , $\forall m \in N \cup V - v, v \in V$ . El par $mv$ existe si $m$ es un cliente del almacén $v$ .



$Capacidad_c$	Capacidad de carga del camión $c$ , $\forall c \in C$ .
$MAX_{carga}$	Carga máxima tomada de algún camión $c$ cuya capacidad de carga $Capacidad_c$ supera al resto los camiones existentes $C - c$ .
$TT_{cim}$	Tiempo de transporte para que el camión $c$ viaje del nodo $i$ al nodo $m$ , $\forall c \in C_{v \in V}, i \in N \cup V, m \in N \cup V, i \neq m$ .
$TM_{cm}$	Tiempo de maniobra para atender el vehículo $c$ en el nodo $m$ .
$RETORNO_{cm}$	Tiempo de retorno del camión $c$ , que se encuentra en el nodo $m$ , al almacén al que pertenece.
$Tiempo\_Servicio_c$	Tiempo de operación del camión $c$ , después del cuál debe encontrarse en el almacén al que pertenece.
$Inicio\_TS\_Veh_c$	Inicio de la ventana de tiempo del vehículo $c$ durante la cual el vehículo $c$ puede prestar sus servicios para cubrir las demandas.
$Fin\_TS\_Veh_c$	Fin de la ventana de tiempo durante la cual el vehículo $c$ puede prestar sus servicios para cubrir las demandas.
$Inicio\_TW\_Cliente_m$	Inicio de las ventanas de tiempo $t$ del cliente $m$ .
$Fin\_TW\_Cliente_m$	Fin de las ventanas de tiempo $t$ del cliente $m$ .
$ENTRADA_{ctm}$	Intersección de los inicios de las ventanas de tiempo de los clientes y vehículos: $Inicio\_TS\_Veh_c \cap Inicio\_TW\_Cliente_m, \forall c \in C_{v \in V}, t \in T_m, m \in N_{v \in V}$
$SALIDA_{ctm}$	Hora de terminación del turno $t$ en el nodo $m$ para atender al camión $c$ .
$MAX_{tiempo}$	Periodo de operación del sistema (horizonte de planeación).
$MaxVehicle_{tm}$	Número máximo de vehículos simultáneos que puede recibir el nodo $m$ en el turno $t$ .

La Tabla 4.4 muestra la definición de las variables de decisión usadas en el modelo ILP.

**Tabla 4.4.** Variables Binarias.

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
$camion\_asignado_c$	Variable que toma el valor de 1 si el camión $c$ fue empleado en una o más rutas para la satisfacción de demandas de clientes, y 0 en caso contrario.
$X_{imk}$	Variable de rutas que tomará el valor de 1 si la trayectoria $im$ fue recorrida en la ruta $k$ , y 0 en caso contrario.
$nf_{hk}$	Variable que tomará el valor de 1 si el nodo $h$ en la ruta $k$ fue el último nodo visitado, y 0 en caso contrario.
$Y_{ck}$	Variable que tomará el valor de 1 si el camión $c$ fue asignado a la ruta $k$ , y 0 en caso contrario.
$M_{cmk}$	Esta variable toma el valor 1 si el camión $c$ realizó una operación de maniobra en $m$ en la ruta $k$ , y 0 en caso contrario.
$T_{cijk}$	Variable de transporte que toma el valor de 1 si el camión $c$ hace un viaje de $i$ a $j$ en la ruta $k$ , y 0 en caso contrario.

$turno_{ctmk}$	Variable que toma el valor de 1 si el camión $c$ visitó en el turno $t$ el nodo $m$ , como parte de la ruta $k$ , y 0 en caso contrario.
$Mismo_{kk'}$	Variable que indica si las rutas $k$ y $k'$ fueron asignadas a un mismo camión.
$Empalme_{cdtm}$	Variable de empalme que indica si los camiones $c$ y $d$ se empalman en tiempo en el nodo $m$ durante el turno $t$ .

La Tabla 4.5 muestra la definición de las variables enteras del modelo.

**Tabla 4.5.** Definición de variables enteras.

<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
$Carga_{mk}$	Variable entera positiva que tomará el valor de la carga que haya sido transportada en la ruta $k$ para ayudar a satisfacer la demanda del nodo $m$ .
$tt_{cmk}$	Variable que toma el valor del tiempo de transporte y de maniobra requerido por el camión $c$ para llegar a un nodo $m$ desde el nodo anterior, en la ruta $k$ .
$Llegada_{ctmk}$	Variable que tiene el tiempo de llegada para el camión $c$ en la ruta $k$ cuando visita al nodo $m$ en el turno $t$ .
$Salida_{ctmk}$	Variable que tiene el tiempo de salida para el camión $c$ en la ruta $k$ cuando visita al nodo $m$ en el turno $t$ .

#### 4.4 Función Objetivo

El objetivo del Modelo ILP es minimizar el número de vehículos requeridos para satisfacer las demandas de todos los clientes. La función objetivo se muestra en la ecuación (4.2).

$$\min \sum_{c \in C} camion\_asignado_c \quad (4.2)$$

#### 4.5 Restricciones

En esta sección se muestran las restricciones usadas para modelar la tarea de asignación de rutas del problema BPVRP.

Las ecuaciones (4.3, 4.4 y 4.5) presentan las restricciones necesarias para construir las rutas que cubrirán las demandas de los clientes, de acuerdo a las consideraciones especificadas en la definición del VRP estándar.

La ecuación (4.3) obliga a los clientes a ser visitados a lo más una vez en una ruta  $k$ . En otras palabras, esta restricción evita la formación de ciclos en el interior de una ruta.

$$\sum_{\substack{i \in N_{v \in V} \\ i \neq m}} X_{imk} \leq 1, \forall m \in N_{v \in V}, k \in K_{v \in V} \quad (4.3)$$

Con la ecuación (4.4) se presenta la restricción que obliga a una ruta a empezar en un almacén. Es decir, la restricción fuerza a la ruta  $k$  a iniciar en un almacén  $v$ , debido a que son los únicos que pueden satisfacer las demanda de los clientes.

$$\sum_{\substack{j \in N_{v \in V} \\ j \neq v}} X_{vjk} \leq 1, \forall v \in V, k \in K_{v \in V} \quad (4.4)$$

La ecuación 4.5 asegura que la trayectoria seguida en una ruta  $k$  sea continua y no salte ciudades visitadas. También ayuda a determinar la última ciudad visitada.

$$\sum_{\substack{i \in N_{v \in V} \\ i \neq h}} X_{ihk} - \sum_{\substack{j \in N_{v \in V} \\ h \neq j}} X_{hjk} - n f_{hk} = 0, \forall h \in N_{v \in V}, k \in K_{v \in V} \quad (4.5)$$

Las ecuaciones (4.6 y 4.7) se encargan de hacer cumplir la restricción del problema VRP básico donde se pide que la demanda de los clientes sea satisfecha por completo. De acuerdo a estas restricciones, la variable  $Carga_{mk}$  puede contener un valor menor al pedido  $P_{vm}$  que un cliente  $m$  hace a un almacén  $v$ . Esta descripción formula la definición de la variante SDVRP, donde es posible que en un viaje a un cliente  $m$  no se satisfaga toda su demanda y por lo tanto requiera de más viajes para completarla. También se encuentra implícita la variante sdVRP en la variable  $P_{vm}$ , ya que cada cliente tiene una demanda específica a un almacén  $v$  y cada almacén  $v$  tiene una flotilla para cubrir sus pedidos, por lo cual el cliente  $v$  con demanda a  $m$  solo puede ser abastecido por los vehículos  $c \in C_v$ .

La ecuación (4.6) asegura que se satisfaga el pedido solicitado por el nodo  $m$  a un almacén  $v$ . En esta restricción solamente se toman en cuenta las rutas que estén asociadas al mismo depósito  $v$  sobre el cual se hizo el pedido  $P_{mv}$ . La variable  $Carga_{mk}$  contiene la carga que se transporta en la ruta  $k$  al nodo  $m$ .

$$\sum_{k \in K_{v \in V}} (Carga_{mk}) - P_{vm} = 0, \forall m \in N_{v \in V}, v \in V \quad (4.6)$$

Con la ecuación (4.7) se asegura que la variable  $Carga_{mk}$  tome un valor sólo si hubo un viaje al cliente  $m$  en la ruta  $k$ . Dicho de otra manera, esta restricción fuerza a la variable  $Carga_{mk}$  a tomar valor sólo si existe un viaje al cliente  $m$  desde alguna ciudad  $i$  en la ruta  $k$ . Es importante hacer notar que los arcos  $im$  están íntimamente vinculados con los arcos que pueden ser alcanzados por la ruta  $k$  que depende del almacén  $v$  a la que se asocia.

$$MAX_{carga} \cdot \sum_{\substack{i \in N_{v \in V} \\ i \neq m}} X_{imk} - Carga_{mk} \geq 0, \forall k \in K_{v \in V}, m \in N_{v \in V} \quad (4.7)$$

Con las ecuaciones (4.8 y 4.9) se cumple la condición que da origen a la variante CVRP, que dice que los vehículos no deben exceder su capacidad de carga en la ruta a la que fueron asignados.

Debido a que una misma ruta no puede ser cubierta por mas de un camión, la restricción (4.8) fuerza que un solo camión  $c \in C_v$  sea asignado a una ruta  $k$ .

$$\sum_{c \in C_{v \in V}} Y_{ck} \leq 1, \forall k \in K_{v \in V} \quad (4.8)$$

La ecuación (4.9) asegurará que el camión  $c$  que se asignó a la ruta  $k$  no exceda su capacidad de carga contabilizada en  $Carga_{mk}$ . Es decir, se encargará de que un vehículo no transporte más carga de la que puede llevar.

$$\sum_{c \in C_{veV}} (Capacidad_c \cdot Y_{ck}) - \sum_{m \in N_{veV}} Carga_{mk} \geq 0, \quad \forall k \in K_{veV} \quad (4.9)$$

Las ecuaciones (4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17) contribuyen a dar solución a la variante HVRP. Debido a que en esta variante los costos de maniobra y transporte dependen del tipo de vehículo, éstas ecuaciones ayudan a precisarlos de acuerdo al conjunto de camiones escogido por la ecuación (4.8).

La combinación de las ecuaciones (4.10) a (4.12) determinan los camiones que abastecieron a los clientes. En otras palabras, especifican si un camión  $c$  realizó una maniobra de carga o descarga en un cliente  $m$  visitado en una ruta  $k$ .

$$Y_{ck} - M_{cmk} \geq 0, \quad \forall c \in C_v, m \in N_v, k \in K_{veV} \quad (4.10)$$

$$MAX_{carga} > MAX_{carga} \cdot M_{cmk} - Carga_{mk} \geq 0, \quad \forall c \in C_{veV}, m \in N_{veV}, k \in K_{veV} \quad (4.11, 4.12)$$

Con las ecuaciones (4.13) y (4.14) se determina por qué camiones fueron visitados los clientes. Es decir, se encargará de asignar el valor de 1 a  $T_{ckij}$  si el recorrido  $ij$  de la ruta  $k$  fue asignado al camión  $c$ , y 0 en caso contrario.

$$-2 < 2 \cdot T_{cij} - (X_{ijk} + Y_{ck}) \leq 0, \quad \forall i \text{ y } j \in N_{veV}, c \in C_{veV}, k \in K_{veV} \quad (4.13, 4.14)$$

La mezcla de las ecuaciones (4.15) y (4.16) proporcionan los clientes, en cada ruta, desde los cuales los camiones deben efectuar su viaje de regreso al almacén para volver a cargarse de productos y continuar satisfaciendo otras rutas. Es decir, determina el cliente  $m$  en una ruta  $k$  desde el cual un camión  $c$  se va a regresar al almacén.

$$-2 < 2 \cdot nf_{cmk} - (nf_{mk} + Y_{ck}) \leq 0, \quad \forall m \in N_{veV}, c \in C_{veV}, k \in K_{veV} \quad (4.15, 4.16)$$

Una vez que se tienen conocimiento de que camiones participan en la solución, que clientes satisfacen y por donde viajan, se procede a calcular el tiempo total consumido por vehículo de acuerdo a las rutas que le fueron asignadas. Esto es llevado a cabo a través de

la ecuación (4.17) que realiza un conteo de los tiempos de transporte, maniobra y retorno a almacén, por cada visita a un cliente  $m$  en una ruta  $k$ .

$$tt_{cmk} = \sum_{i \in N_{veV}} (TT_{cim} \cdot T_{cimk}) + TM_{cm} \cdot M_{cmk} + RETORNO_{cm} \cdot nf_{cmk}, \quad (4.17)$$

$$\forall c \in C, m \in N_{veV}, k \in K_{veV}$$

La ecuación (4.18) formula la definición de la variante VRPM al permitir utilizar un vehículo tantas veces como su tiempo de servicio lo admita. Es decir, un camión  $c \in C_v$  puede ser asignado a tantas rutas  $k \in k_v$  mientras no exceda el tiempo permitido.

$$\sum_{m \in N_{veV}} \sum_{k \in K_{veV}} tt_{cmk} \leq TIEMPO\_SERVICIO_c, \quad \forall c \in C_{veV} \quad (4.18)$$

La combinación de las ecuaciones (4.19) y (4.20) determina si un camión fue usado en una ruta o no. Esta combinación da valor a la variable empleada en la función objetivo del modelo para alcanzar el objetivo del problema VRP: minimizar los vehículos.

$$K > K \cdot camion\_asignado_c - \sum_{k \in K_{veV}} (Y_{ck}) \geq 0, \quad \forall c \in C_{veV} \quad (4.19, 4.20)$$

De las ecuaciones (4.21) a la (4.29) se definen las restricciones necesarias para manejar las variantes VRPTW y VRPMTW. En estas restricciones se forman los horarios de visita de los camiones a los clientes, de acuerdo a las ventanas de tiempo establecidas.

Las ecuaciones (4.21, 4.22) determinan, para un camión  $c$  que viaja desde un origen  $i$  a un destino  $m$ , las respectivas horas de salida y llegada.

$$\sum_{t \in T_m} (Llegada_{ctmk}) \geq \sum_{t \in T_m} (Salida_{ctik}) + TT_{cim} \cdot T_{cimk}, \quad (4.21)$$

$$Salida_{ctmk} \geq Llegada_{ctmk} + TM_{cm} \cdot M_{cmk}, \quad \forall t \in T_m, c \in C_{veV}, m \in N_{veV}, k \in K_{veV} \quad (4.22)$$

Con las ecuaciones (4.23) y (4.24) se satisface la restricción de la variante VRPTW donde se pide que los vehículos abastezcan los clientes dentro de las ventanas de tiempo.

$$Llegada_{ctmk} \geq turno_{ctmk} \cdot ENTRADA_{ctm}, \forall t \in T_m, c \in C_{v \in V}, m \in N_{v \in V}, k \in K_{v \in V} \quad (4.23)$$

$$Llegada_{ctmk} + TM_{cm} \cdot M_{cmk} \leq turno_{ctmk} \cdot SALIDA_{ctm}, \quad (4.24)$$

$$\forall t \in T_m, c \in C_{v \in V}, m \in N_{v \in V}, k \in K_{v \in V}$$

Las ecuaciones (4.25) y (4.26) determinan si 2 rutas están asignadas a un mismo camión.

$$-2 < 2 \cdot Mismo_{kk'} - (Y_{ck} + Y_{ck'}) \leq 0, \quad (4.25, 4.26)$$

$$\forall c \in C_{v \in V}, k \text{ y } k' \in K_{v \in V}, k < k'$$

La ecuación (4.27) asegura que las trayectorias de un camión no se traslapen, es decir que un camión haga mas de un viaje al mismo tiempo.

$$MAX_{tiempo} \cdot (1 - Mismo_{kk'}) - \left( \sum_{t \in T_m} (Salida_{ctmk}) + RETORNO_{cm} \cdot nf_{cmk} - \sum_{t \in T_m} (Salida_{ctmk'}) \right) \geq 0, \quad (4.27)$$

$$\forall m \in N_{v \in V}, c \in C_{v \in V}, k \text{ y } k' \in K_{v \in V}, k < k'$$

Las ecuaciones (4.28) y (4.29) aseguran que sólo un turno sea empleado para visitar un cliente  $m$  en una ruta  $k$ .

$$-2 < 2 \cdot \sum_{t \in T_m} (turno_{ctmk}) - \left( y_{ck} + \sum_i X_{imk} \right) \leq 0, \forall c \in C_{v \in V}, m \in N_{v \in V}, k \in K_{v \in V} \quad (4.28, 4.29)$$

El conjunto de ecuaciones (4.30, 4.31 y 4.32) da soporte a la nueva variante VRP propuesta en este trabajo de investigación, CCVRP.

Las restricciones (4.30) y (4.31) determinan si un vehículo  $c$  tuvo empalme con un vehículo  $d$  en el nodo  $m$  en el turno  $t$ .

$$MAX_{tiempo} > MAX_{tiempo} \cdot Empalme_{cdm} - (Salida_{ctmk} - Llegada_{dtmk'}) \geq 0, \quad (4.30, 4.31)$$

$$\forall c \text{ y } d \in C_{v \in V}, k \text{ y } k' \in K_{v \in V}, t \in T_m, m \in N_{v \in V}, k < k', c \neq d$$

La restricción (4.32) asegura que el número de vehículos en un cliente no exceda el límite de atención permitido.

$$1 + \sum_{\substack{d \in C_v \\ d \neq c}} Empalme_{cdm} \leq MaxVehicle_m, \forall c \in C_{v \in V}, t \in T_m, m \in N_{v \in V} \quad (4.32)$$



# Capítulo 5

## Metodología de Solución

---

Para resolver las tres tareas del problema de transportación RoSLoP: definición y asignación de rutas, asignación de horarios y asignación de cargas, se propone una metodología de solución de dos fases. En la primera sección de este capítulo se describen en forma general estos pasos. El resto del capítulo profundiza en la metodología, detallando las técnicas algorítmicas usadas en la solución RoSLoP.

### 5.1 Fases de la Metodología de Solución

La metodología propuesta para dar solución al problema de transporte RoSLoP se muestra en la Figura 5.1. En este diagrama se ven los tres subproblemas de RoSLoP: definición y asignación de rutas; asignación de cargas; y asignación de horarios.

La metodología de solución consta de dos fases. En la primer fase, la definición y asignación de rutas se resuelve con un algoritmo de Sistema de Colonia de Hormigas (ACS, de sus siglas en inglés Ant Colony System) basado en un enfoque Optimizador de Colonias de Hormigas (ACO, Ant Colony Optimization). Dentro de esta fase también se soluciona el

sub-problema de asignación de carga a través del algoritmo DiPro, una heurística determinista que sigue una estrategia round-robin para balancear los bienes distribuidos en el vehículo.

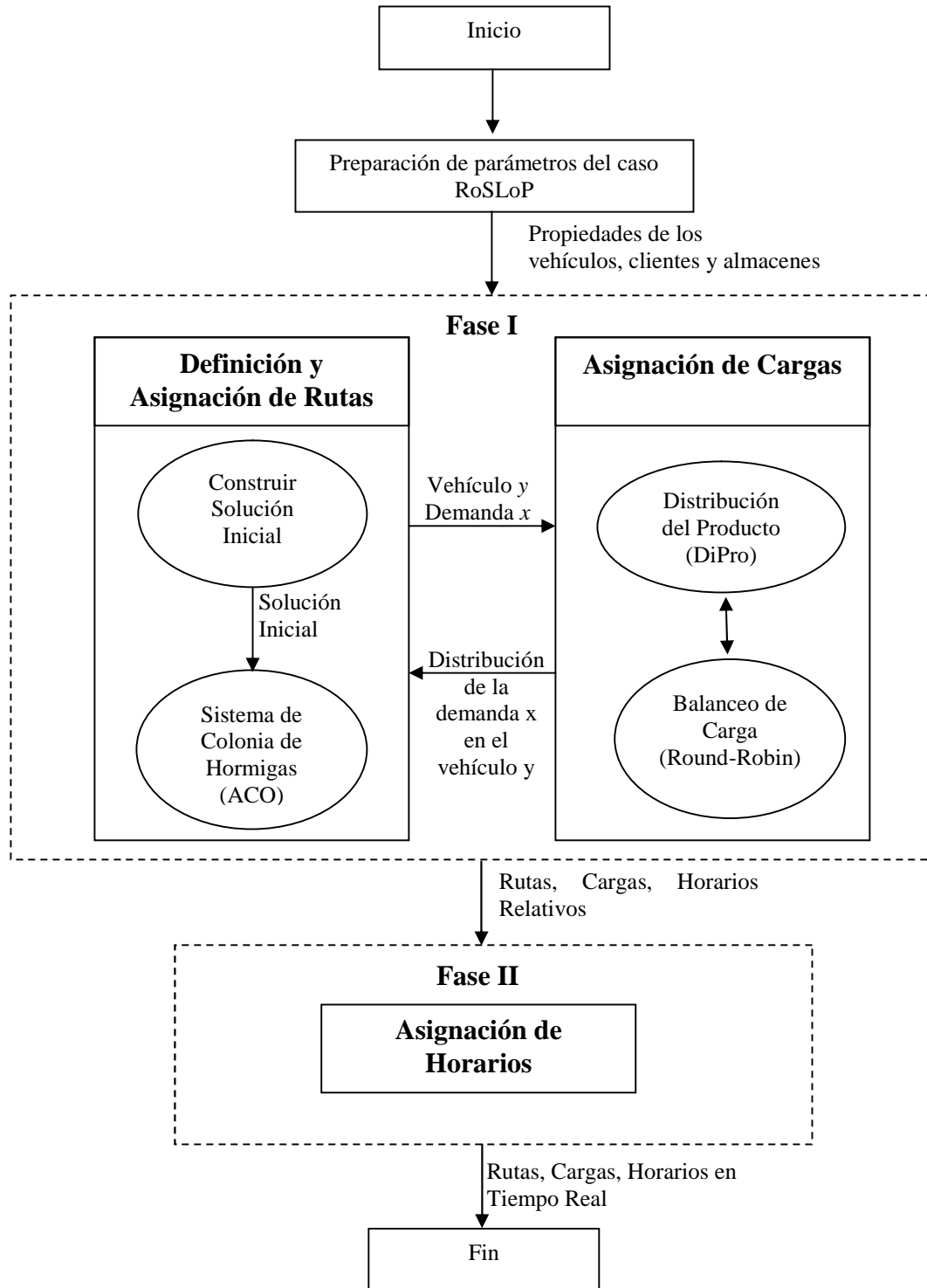


Figura 5.1. Metodología de Solución.

A fin de construir la solución es necesario crear rutas que visiten todos clientes; esta tarea se realiza a través del algoritmo ACS. Cada vez que una unidad de transporte visita un cliente, ACS invoca al algoritmo DiPro, que se encarga de determinar la parte de la demanda que transportará el vehículo. El resultado alcanzado en este primer paso contendrá las rutas y flotilla necesaria para abastecer los clientes.

Una vez que se han resuelto la asignación de rutas, y la asignación de cargas, se procede con el segundo paso de la metodología: la asignación de horarios. Debido a que el primer paso de la metodología ofrece un solución inicial al sub-problema de asignación de horarios (un conjunto de horarios relativos para el caso RoSLoP ), en esta segunda fase solamente es necesario transformar esos horarios estándar a horarios en tiempo real requerido por el caso RoSLoP; lo cual se hace a través de una simple conversión.

En las siguientes subsecciones se analizarán con más detalle las herramientas heurísticas que sirvieron de base para la construcción de la metodología de solución.

## **5.2 Sistema de Colonia de Hormigas (ACS)**

Ciertas hormigas, cuando regresan al nido con comida, dejan un rastro de feromona. Este rastro atrae y guía otras hormigas a la fuente de comida. Esto es continuamente renovado mientras la comida no se agote. Cuando sucede, los rastros dejados comienzan a cesar. La feromona se evapora rápidamente haciendo que las hormigas no se confundan por viejos rastros cuando la comida se encuentra en alguna otra parte.

El comportamiento cooperativo de las hormigas, mostrado en el párrafo anterior, es simulado en un Sistema de Colonia de Hormigas Artificial (ACS, Ant Colony System) y ha sido usado para resolver problemas NP-duros como el TSP en [Gambardella, 1996] o las variantes VRP en [Gambardella, 1999].

El algoritmo ACS diseñado para resolver la tarea de definición y asignación de rutas del problema RoSLoP está basado en los enfoques mostrados en [Gambardella, 1999] y

[Donati, 2003], y su meta es encontrar el mínimo número de vehículos necesarios para satisfacer todas las demandas de los clientes en los casos BPVRP de RoSLoP.

### 5.2.1 Análisis del Problema BPVRP resuelto por ACS

A fin de construir una solución, el algoritmo ACS propuesto usa dos medidas conocidas como cercanía y rastro de feromona. Debido a que el problema BPVRP incluye la variante HVRP, estas medidas miden no solo qué tan bueno es viajar entre un par de clientes (como se hace en [Gambardella, 1999]), sino también que tan adecuado es que un vehículo específico realice ese viaje.

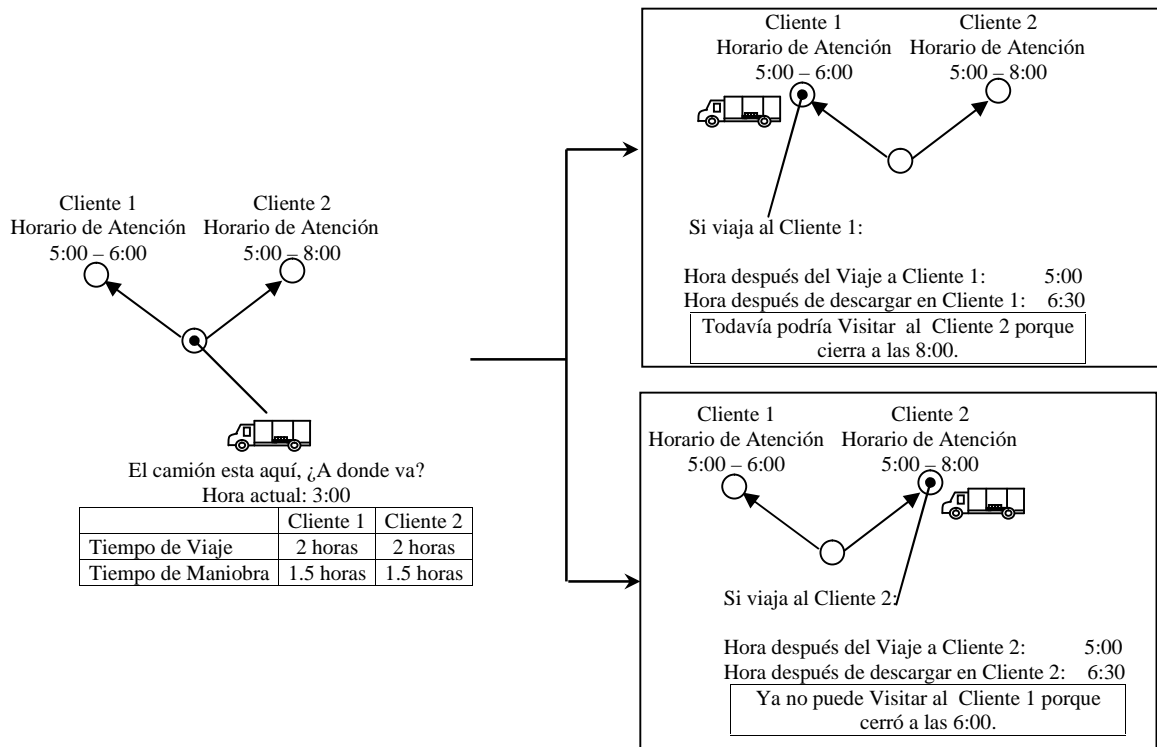
En el enfoque presentado en este trabajo de investigación, la cercanía  $y$  puede ser un valor asociado a clientes o vehículos. Estos valores son usados para indicar que tan bueno es viajar de un cliente a otro usando un vehículo previamente definido.

La cercanía entre dos clientes  $y_{ij}$  se calcula con la ecuación (5.1). En esta expresión, la calidad de un viaje de un cliente a otro depende del tiempo disponible para visitarlo.

$$y_{ij} = \frac{1}{\left( \text{DeliveryTime}_j - \text{Now} \right) \left( \text{EndTimeWindow}_j - \text{Now} \right)} \quad (5.1)$$

donde  $\text{DeliveryTime}_j$  es el tiempo de llegada del vehículo actual al cliente  $j$ ;  $\text{Now}$  es el tiempo en que el vehículo sale del cliente  $i$  para viajar al cliente  $j$ ; y  $\text{EndTimeWindow}_j$  es el tiempo en que termina la ventana de tiempo del cliente  $j$ .

El mejor cliente a visitar, de acuerdo a la ecuación (5.1), es aquel que si no es atendido en el momento actual ya no podría atenderse más tarde, tal vez por que llegaría al límite de su hora de atención. En la Figura 5.2 se ilustra un ejemplo de esta situación y su posible solución.



**Figura 5.2.** Ejemplo de selección del siguiente cliente a visitar. En este ejemplo la mejor opción es el Cliente 1, ya que visitarlo no impediría que el Cliente 2 se visitara después.

La ecuación (5.2) se utiliza para calcular la cercanía de un vehículo  $y_c$ . En otras palabras, esta ecuación hace que sea más atractivo el camión que maximice el número de clientes visitados por dicho vehículo.

$$y_c = \frac{1}{nv_c \cdot (\overline{TM}_c + \overline{TR}_c) \cdot \frac{tr_c}{tt_c}} \quad (5.2)$$

En la Tabla 5.1 se muestran las definiciones de los elementos necesarios para calcular la cercanía de los vehículos.

**Tabla 5.1.** Definición de los parámetros de la función de cercanía para vehículos.

Símbolo	Definición
$y_c$	Cercanía del vehículo $c$ .
$N_k$	Conjunto de clientes con una demanda $d_i$ a ser satisfecha por el almacén $k$ .
$C_k$	Flotilla de vehículos del depósito $k$ .
$c$	Un vehículo específico $c \in C_k$ .

$i$	Un cliente $i \in N_k$
$nv_c$	Viajes requeridos por el vehículo $c \in C_k$ para abastecer todas las demandas $d_i$ , para cada $i \in N_k$ .
$\overline{TM}_c$	Tiempo promedio de Carga/Descarga de un vehículo $c \in C_k$ .
$\overline{TR}_c$	Tiempo promedio de viaje de un vehículo $c \in C_k$ .
$tr_c$	Tiempo de servicio disponible del vehículo $c \in C_k$ .
$tt_c$	Tiempo de servicio total del vehículo $c \in C_k$ .

Para evaluar la calidad de un vehículo, con el fin de ser seleccionado para integrarse a la solución, la ecuación (5.2) combina tres de sus propiedades: tamaño, velocidad y tiempo de servicio. El factor  $nv_c$  hace más atractivo a los camiones grandes, debido a que requieren menos viajes para cubrir todas las demandas. El factor  $\overline{TM}_c + \overline{TR}_c$  favorece las unidades más rápidas, porque podrán cubrir un mayor número de rutas. Por último, el factor  $\frac{tr_c}{tt_c}$  selecciona aquellos camiones que ya hayan consumido parte de su tiempo de servicio cubriendo rutas previamente asignadas, esto se hace así para asegurarse que los vehículos sean empleados de forma exhaustiva. El vehículo que posea el mejor balance entre estas propiedades será el mejor de esta expresión.

El rastro de feromona  $\dagger$  es un valor que mide que tan deseable es incluir un elemento particular dentro de una solución. Como la cercanía  $y$ , la feromona está asociada con un par de clientes y con cada vehículo. En contraste, su valor es modificado por las hormigas durante la construcción de las soluciones.

La actualización global del rastro de feromona para los clientes  $\dagger_{ij}$  se muestra en la ecuación (5.3). La ecuación (5.4) muestra la actualización local de esta medida.

$$\dagger_{ij} = (1 - \dots) \cdot \dagger_{ij} + \dots / J_{\mathbb{E}}^{gb} \quad (5.3)$$

donde  $\dots (0 \leq \dots \leq 1)$  es un parámetro de evaporación y  $J_{\mathbb{E}}^{gb}$  es la longitud de la mejor solución global  $\mathbb{E}^{gb}$  alcanzada por el algoritmo ACS al momento de la actualización.

$$\dagger_{ij} = (1 - \dots) \cdot \dagger_{ij} + \dots \cdot \dagger_0 \quad (5.4)$$

donde:

$\dagger_0$  es el valor inicial del rastro y su valor es igual a  $\frac{1}{n \cdot J_{\mathbb{E}}^{gb}}$ . El valor  $n$  es el número de clientes satisfechos o vehículos empleados, según sea la ecuación donde se emplee.

La actualización local de la feromona de los vehículos  $\dagger_c$  se realiza durante la construcción de una solución con la ecuación (5.5).

La actualización global de la feromona de los vehículos  $\dagger_c$  se muestra en la ecuación (5.6). Los parámetros de las expresiones de actualización de feromonas son los mismos de las ecuaciones (5.3) y (5.4).

$$\dagger_c = (1 - \dots) \cdot \dagger_c + \dots \cdot \dagger_0 \quad (5.5)$$

$$\dagger_c = (1 - \dots) \cdot \dagger_c + \dots \cdot \frac{1}{J_{\mathbb{E}}^{gb}} \quad (5.6)$$

La estrategia que construye una solución combina las estrategias de explotación y exploración tomadas de [Gambardella, 1999]. La explotación combina tanto el rastro de feromona  $\dagger$  como la cercanía  $y$ , para indicar la deseabilidad que un cliente o vehículo tienen para ser incluidos en una solución. En la ecuación (5.7), el elemento escogido  $s$  es el que maximice el valor de la función de explotación.

$$s = \max \{ \dagger \cdot [y]^S \}, \quad s \in N^k \quad (5.7)$$

En la ecuación (5.7),  $s$  pondera la relativa importancia de la cercanía  $y$  en la construcción de una solución y  $N^k$  es un conjunto de elementos factibles que puede ser incorporado a la solución que se está construyendo. Dentro de este conjunto se pueden identificar dos subconjuntos: el conjunto de vehículos factibles  $N_V^k$  y el conjunto de clientes factibles  $N_I^k$  donde  $N_I^k \cup N_V^k = N^k$  y  $N_I^k \cap N_V^k = \emptyset$ . El conjunto  $N_V^k$  contiene todos los

vehículos con tiempo disponible para abastecer a los clientes mientras que  $N_i^k$  contiene los clientes que pueden ser visitados por un vehículo desde el cliente  $i$ .

En la exploración, la solución es construida en forma probabilística. Los elementos de  $N^k$  pueden ser escogidos con una probabilidad  $p$  que es proporcional a la ecuación (5.7). La ecuación (5.8) muestra como calcular la probabilidad para cada elemento  $s$  (clientes o vehículos) que pueden ser incorporados en la solución que se está construyendo.

$$p_s = \begin{cases} \frac{\tau_s \cdot [y_s]^s}{\sum_{e \in N^k} \tau_e \cdot [y_e]^s} & \text{si } s \in N^k \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.8)$$

Para escoger una de las dos estrategias de construcción de soluciones se utiliza el parámetro  $q_0$ , que representa la probabilidad de uso de la técnica de explotación en la construcción de una solución. La probabilidad  $1 - q_0$  se convierte en la oportunidad que tiene la exploración de ser elegida.

Regularmente los parámetros de control del algoritmo ( $\tau_0, s, q_0, \dots$ ) se determinan mediante experimentación.

### 5.2.2 Algoritmo

El algoritmo ACS se muestra en la Figura 5.3. Para construir una solución para un caso BPVRP, sigue el siguiente procedimiento general: en la línea 1 crea una solución inicial factible, usando el algoritmo clásico del vecino más cercano, que se tomará como el mejor global  $\mathbb{E}^{gb}$ . En la línea 3 inicio ACS, que concluirá cuando el tiempo programado halla expirado (línea 22). De las líneas 4 a la 18 se encuentra el proceso de minimización de vehículos que creará la colonia un número específico de veces (línea 18). En éste proceso se busca mejorar la solución global y se actualizan las matrices de feromona local y global (líneas 14 a 17). Cuando una solución local ha sido mejorada (línea 9), se termina la colonia actual (línea 12), se compara la solución local con la global (línea 19) y se hacen las actualizaciones necesarias (líneas 19 y 20) para que seguir con el algoritmo.



```

ACS_Algorithm ( s , ... , q0)
1.  $\mathbb{E}^{gb} \leftarrow \text{Initial\_Solution}$  /* Inicializar la solución global con una solución factible o infactible */
2.  $t \leftarrow \#active\_vehicles(\mathbb{E}^{gb}) - 1$  /* Calcula el número de vehículos de la solución global */
3. repeat /* Comienza el algoritmo ACS */
4.   repeat /* Comienza el proceso de minimización de vehículos */
5.      $\mathbb{E}^{lb} \leftarrow \text{Initial\_Solution}$  /* Crea solución local inicial (factible o infactible) */
6.     for each ant  $k \in K$  /* Comienza el proceso de optimización basado en hormigas */
7.        $\mathbb{E}^k \leftarrow \text{new\_ant\_solution}(k, t, IN)$  /* Construye una nueva solución con v vehículos */
8.        $\forall j \notin \mathbb{E}^k: IN_j \leftarrow IN_j + 1$  /* Actualiza vector IN */
9.       if  $\#visited\_customers(\mathbb{E}^k) > \#visited\_customers(\mathbb{E}^{lb})$  then
10.         $\mathbb{E}^{lb} \leftarrow \mathbb{E}^k$ 
11.         $\forall j: IN_j \leftarrow 0$ 
12.      end_repeat proceso de minimización de vehículos
13.    End for each
14.     $\forall c \in \mathbb{E}^{lb}: \tau_c = (1 - \dots) \cdot \tau_c + \dots / J_{\mathbb{E}^{lb}}$  /* Actualiza feromona de vehículos con solución local */
15.     $\forall i, j \in \mathbb{E}^{lb}: \tau_{ij} = (1 - \dots) \cdot \tau_{ij} + \dots / J_{\mathbb{E}^{lb}}$  /* Actualiza feromona de clientes con solución local */
16.     $\forall c \in \mathbb{E}^{gb}: \tau_c = (1 - \dots) \cdot \tau_c + \dots / J_{\mathbb{E}^{gb}}$  /* Actualiza feromona de vehículos con solución global */
17.     $\forall i, j \in \mathbb{E}^{gb}: \tau_{ij} = (1 - \dots) \cdot \tau_{ij} + \dots / J_{\mathbb{E}^{gb}}$  /* Actualiza feromona de clientes con solución global */
18.  Until stop criterion is reached
19.  if  $\mathbb{E}^{lb}$  is feasible and  $\mathbb{E}^{lb}$  improves  $\mathbb{E}^{gb}$  then /* Si se mejora la solución global */
20.     $\mathbb{E}^{gb} \leftarrow \mathbb{E}^{lb}$ 
21.     $T \leftarrow \#active\_vehicles(\mathbb{E}^{gb}) - 1$ 
22. until stop criterion is reached

```

**Figura 5.3.** Algoritmo ACS utilizado para resolver casos RoSLop.

El rastro de feromona se actualiza dos veces durante el desarrollo del algoritmo. Primero se actualiza durante la construcción de la solución por una hormiga y después de que todas las hormigas han construido sus soluciones

En el algoritmo, las funciones *#active\_vehicles* y *#visited\_customers* determinan el número de vehículos usados en una solución y el número de demandas satisfechas, respectivamente. La función *#depot* retorna a qué almacén pertenece el vehículo pasado como parámetro. El vector entero  $IN_j$  contiene el número de veces que un cliente  $j$  no se ha tomado en cuenta para formar una solución.  $IN$  es empleado por el proceso de construcción para favorecer a los clientes que no se incluyen frecuentemente en una solución  $j$ .

### 5.2.3 Proceso de Construcción de Soluciones

El proceso constructivo *new\_ant\_solution* crea la nueva solución con la hormiga  $k$  (ver Figura 5.4); consiste en generar rutas asignadas a un vehículo  $t$  que satisfaga las demandas de los clientes que se encuentran en dicha ruta.

El primer paso para crear una ruta es determinar el conjunto de vehículos disponibles  $N_V^k$  (línea 2), que contendrá los vehículos que todavía pueden ser usados para abastecer clientes. Después, la cercanía de cada vehículo que pertenece a  $N_V^k$  es calculada (líneas 3 a 6) y entonces uno de ellos es seleccionado. Durante este paso se emplean los mecanismos de exploración y explotación.

Una vez que se ha escogido un vehículo (línea 7), el siguiente paso es visitar los clientes y satisfacer sus demandas (líneas 10 a 22). El vehículo sale del almacén para servir a los clientes (línea 9). La decisión de cual cliente debe visitarse primero se toma usando las estrategias de exploración y explotación (líneas 11 a 17). Mientras el conjunto  $N_i^k$  tenga clientes para visitar (línea 22) el vehículo seguirá abasteciéndolos, de otra forma regresará al depósito. Durante el proceso de construcción, la feromona se actualiza localmente.

El procedimiento para la creación de rutas se repite hasta que ya no se puedan incorporar más clientes a la solución o bien ya no puedan utilizarse más vehículos (línea 24).

En la función *new\_ant\_solution* se contempla el manejo de todas las variantes que son resueltas por nuestro algoritmo. En la línea 7 se maneja la variante VRPM; el conjunto  $N_V^k$  incluye aquellos vehículos que todavía tienen tiempo disponible para servir a los clientes, aún si los vehículos han sido asignados a otras rutas. La variante VRPTW está contemplada en el conjunto de clientes factibles  $N_i^k$  en la línea 11; este conjunto contendrá los clientes que pueden ser visitados por un vehículo específico de acuerdo a su ventana de tiempo. sdVRP es manejado en las líneas 7 y 11; el conjunto de clientes factibles  $N_i^k$  se construye

en la línea 11 al agregar aquellos clientes que pueden ser visitados por el vehículo *veh* escogido en la línea 7. La línea 19 contempla a VRPSD debido a que la actualización de la demanda de un cliente *j* significa que es posible que un vehículo que visite a *j* en una determinada ruta podría no satisfacer toda su demanda, dejando un resto a ser satisfecho por otra unidad. Las línea 22 maneja HVRP y CVRP al limitar la capacidad de los vehículos cuando se construye la ruta; la variante HVRP también necesita de la estructura *veh* que contiene las propiedades del vehículo entre las cuales se identifica el valor de su capacidad.

```

new_ant_solution( k, t, IN )
1. Loop
2.   Determine the set of feasible vehicles  $N_v^k$ 
3.   For each vehicle  $w \in N_v^k$ 
4.      $y_w \leftarrow nv_w \cdot (\overline{TM}_w + \overline{TR}_w) \cdot (tr_w / tt_w)$ 
5.      $y_w \leftarrow 1 / y_w$  /* Calcular la cercanía de los vehículos */
6.   End for each
7.   Choose next vehicle  $veh \in N_v^k$  using exploitation and exploration mechanisms
8.    $j \leftarrow j \cup veh$  /* Incorporar vehículo seleccionado a la solución */
9.    $i \leftarrow \#depot(veh)$  /* Establecer al almacén como la primer localidad visitada por veh */
10.  Loop
11.   Determine the set of customers  $N_i^k$  the vehicle veh can visit from I
12.   for each customer  $j \in N_i^k$ 
13.      $y_{ij} \leftarrow (DeliveryTime_j - Now) (EndTimeWindow_j - Now)$ 
14.      $y_{ij} \leftarrow 1 / y_{ij}$  /* Calcular el valor de cercanía para los clientes */
15.      $y_{ij} \leftarrow \max(1.0, y_{ij} - IN_j)$  /* Favorecer clientes poco visitados */
16.   end for each
17.   Choose next customer  $j \in N_i^k$  using exploitation and exploration mechanisms
18.    $j \leftarrow j \cup j$  /* Incorporar clientes elegidos a la solución */
19.   Update demand of customer j.
20.    $\tau_{ij} = (1 - \dots) \cdot \tau_{ij} + \dots \cdot \tau_0$  /* Actualización local de la feromona del clientes */
21.    $i \leftarrow j$  /* Cambiar ubicación del vehículo actual al siguiente nodo */
22.  Until No more customers can be satisfied with veh
23.   $\tau_{veh} = (1 - \dots) \cdot \tau_{veh} + \dots \cdot \tau_0$  /* Actualización local de la feromona del cliente */
24.  Until Satisfy all customer demands or  $\#active\_vehicles(j) > t$ 
25.  Return j

```

**Figura 5.4.** Función *new\_ant\_solution*.

### 5.3 Algoritmo DiPro

Basado en la estrategia Round Robin, la cual es una estrategia muy conocida usada en sistemas operativos, el algoritmo DiPro distribuye el pedido de un cliente en los contenedores de los vehículos. Debido a que la demanda de los clientes está hecha en cajas de productos, el algoritmo usa  $P_c$  para representar el conjunto de productos que son demandados por un cliente  $c$ . Cada  $p \in P_c$  tiene una cantidad  $q_{pc}$  que es la cantidad de producto  $p$  que ha sido pedida por el cliente  $c$ .

Las propiedades asociadas a cada producto son: cajas de producto por cama  $pbb_p$ , que contiene el número de cajas de producto  $p$  necesarias para formar una cama homogénea; camas de producto por tarima  $pbp_p$ , que es el número de camas homogéneas del producto  $p$  necesarias para formar una tarima homogénea; peso soportado  $sw_p$  del producto  $p$ , el peso que puede estar sobre una caja de este producto sin sufrir daño alguno; la altura  $h_p$  de una caja específica de producto  $p$ ; peso  $w_p$  del producto  $p$ ; categoría  $cat_p$  y área de resto  $ra_p$ . Las dos últimas propiedades son empleadas para mostrar la relación de  $p$  con otros productos; los productos compatibles a  $p$  tendrán el mismo valor en estas propiedades.

En la Figura 5.5 se muestra el Algoritmo DiPro. A fin de distribuir la demanda de un cliente  $P_c$  en un vehículo, los productos en  $P_c$  son ordenados por su peso soportado (línea 1). Después de eso, los bienes son organizados en tarimas homogéneas  $hom\_plat_p$  y camas homogéneas  $hom\_bed_p$  (líneas 2 a 7). Así, las cajas de producto restantes de cada producto  $rbp_p$  son usadas para formar camas heterogéneas  $het\_bed_p$  con productos que tienen el mismo valor en las propiedades de categoría y área de restos (líneas 8 a 15). La variable  $het\_bed_p$  contiene el mismo número de cajas que una cama homogénea debido a que de acuerdo a la compatibilidad de productos los bienes compatibles solo difieren en su peso o soporte pero no en dimensiones.

El resto de las camas homogéneas y heterogéneas que no pudieron formar tarimas homogéneas en el proceso previo, son combinadas para formar tarimas mezcladas  $het\_plat_r$  por cada área de restos. La estrategia para formar esas nuevas tarimas tiene dos pasos. El primer paso consiste en calcular el número de tarimas necesarias por área de restos

$needed\_platforms_r$ , para acomodar las camas (líneas 17 a 20). En el segundo se construyen las tarimas mezcladas  $het\_plat_r$ , usando la estrategia Round Robin (línea 21), al combinar las camas homogéneas y heterogéneas, de la misma área de restos.

```

DiProAlgorithm(  $P_c$  )
1. Order  $P_c$  by supported weight  $s_p$ 
2. for each  $p \in P_c$  /* Calcular y construir camas y tarimas homogéneas */
3.    $hom\_bed_p \leftarrow q_{pc} / pbb_p$ 
4.    $hom\_plat_p \leftarrow hom\_bed_p / pbb_p$ 
5.    $hom\_bed_p \leftarrow hom\_bed_p \text{ Mod } pbb_p$  /* Determinar camas restantes de  $p$  */
6.    $rpb_p \leftarrow q_{pc} \text{ Mod } pbb_p$  /* Determinar cajas restantes de  $p$  */
7. end for
8. for each  $p \in P_c$  /* Formar camas heterogéneas usando  $rpb_p$  */
9.   if  $rpb_p \neq 0$  then
10.    loop
11.      search a  $q \in P_c$  such that  $cat_p = cat_q$  and  $ra_p = ra_q$ 
12.       $het\_bed_p \leftarrow$  sumar  $rpb_q$  a  $rpb_p$ 
13.      update  $rpb_p$  y  $rpb_q$ 
14.      while  $het\_bed_p$  be incomplete
15.    end for each
16. for each area de restos  $r$  /* Construir tarimas mezcladas */
17.   for each  $p \in P_c$  such that  $ra_p = r$ 
18.      $total\_beds\_left \leftarrow total\_beds\_left + hom\_bed_p + het\_bed_p$ 
19.   end for each
20.    $needed\_platforms_r \leftarrow total\_beds\_left / pallet\_height$ 
21.    $het\_plat_r \leftarrow RoundRobin(needed\_platforms_r, r)$ 
22. end for each
23.  $Platforms \leftarrow \#DeterminePlatforms(hom\_plat_p) \cup \#DeterminePlatforms(het\_plat_r)$ 
24.  $total\_platforms \leftarrow | Platforms |$  /* Calcula el número total de tarimas a distribuir */
25. Order set  $Platforms$  by weight /* Ordenar las tarimas por peso */
26. for each  $plat \in Platforms$  /* asignar las tarimas al vehículo de forma balanceada */
27.   assign  $plat$  to the vehicle
28.   balance the vehicle load /* balancear los lados del vehículo y ubicar pesados adelante */
29. end for each
30. assign remaining beds to available space /* aprovechar espacios disponibles */

```

**Figura 5.5.** Algoritmo DiPro.

Las función  $\#DeterminePlatforms$  devuelve las tarimas asociadas a un tipo específico. Una vez que todas las tarimas  $Platforms$  han sido construidas e identificadas (línea 23), prosigue su asignación a contenedores (líneas 24 a 29). Para hacer esto, todas las tarimas son ordenadas por peso (línea 25) y después asignadas, tomando en cuenta que los lados,

tanto izquierdo como derecho, del camión estén balanceados en peso y además que las plataformas más pesadas se encuentren al frente y las más ligeras atrás (líneas 26 a 29).

Al terminar de establecer la distribución de las tarimas en el vehículo, se busca asignar los productos que no pudieron ser acomodados (línea 30), en el espacio disponible que no fue ocupado por otros bienes; debido a ciertas restricciones que no se cumplieron, como peso soportado o altura del contenedor.

Como ya se mencionó, el algoritmo DiPro usa la técnica Round Robin para construir las tarimas mezcladas. Un round-robin es un arreglo que se forma escogiendo elementos de un grupo, que se encuentran en un orden racional, normalmente del inicio al fin de la lista y luego volviendo a comenzar desde el principio, siguiendo así hasta haber seleccionado a todos. En DiPro, el arreglo se representa por las camas restantes de producto que no se pudo ubicar en tarimas homogéneas; el orden está dado por el peso soportado. El algoritmo Round Robin usado se muestra en la Figura 5.6. Este algoritmo consiste en crear tarimas vacías *needed\_platforms<sub>r</sub>*, suficientes para ubicar los camas restantes de un área de restos *r* (línea 2). Posteriormente, selecciona una cama a la vez, por orden de peso soportado (línea 4), y se agrega a una de las tarimas creadas (línea 5). Éste proceso se repite sucesivamente, cambiando de tarima en cada movimiento (línea 7) de manera que se repartan las camas equitativamente, hasta terminar de construir las tarimas mezcladas.

```

RoundRobin(needed_platformsr, r)
1. Platform_Counter  $\leftarrow$  1
2. create needed_platformsr, heterogeneous platforms
3. loop /* Construir tarimas mezcladas */
4.   search available bed b that have the greatest supported weight and that belong to r
5.   allocate b in the platform Platform_Counter
6.   mark bed b as no available
7.   Platform_Counter  $\leftarrow$  Next Platform_Counter
8. until no more remaining beds can be allocated in the platforms

```

**Figura 5.6.** Algoritmo Round-Robin.

## 5.4 Conversión de Horarios

De acuerdo con la definición de VRPTW mostrada en [Dorronsoro, 2005], una ventana de tiempo es el horizonte de planeación en el cual un cliente puede ser servido. Una solución

para el VRPTW proporcionado por la primera fase de nuestra metodología incluye un horario relativo al tiempo real exigido por el caso RoSLoP. Debido a esto, el único trabajo requerido, una vez que ha finalizado el paso uno, es la conversión del horario relativo al real establecido por los clientes que se van a abastecer. La conversión consiste en tomar cada uno de los horarios producidos en la solución de VRPTW y transformarlo en el horario real. El número de horarios máximo que se puede transformar en un caso de RoSLoP es equivalente a decir que cada cliente es visitado por todos los vehículos disponibles; es decir, sea  $m$  el número de vehículos y  $n$  el número de clientes, entonces el número de horarios en el peor de los casos es igual a  $m \cdot n$ .

# Capítulo 6

## Experimentación

---

Este capítulo muestra la experimentación realizada para validar la implementación de la metodología propuesta en el capítulo 5. Primero se describe el ambiente donde se llevaron a cabo las pruebas del sistema de transportación. Posteriormente se muestran los casos de prueba y su organización en dos formatos: base de datos y archivo de texto plano. Por último se presentan los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

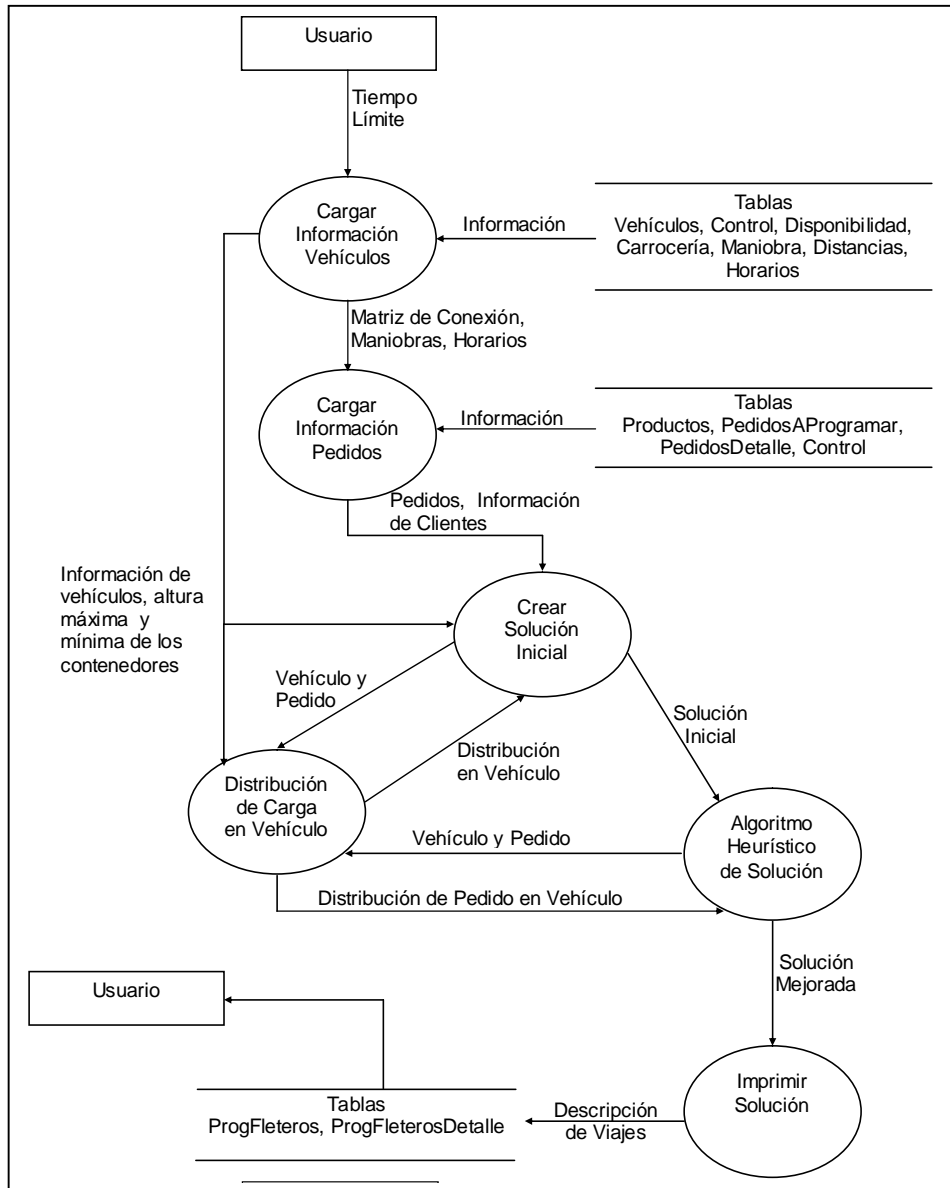
### 6.1 Descripción de la Cama de Prueba

En esta sección se detalla la implementación del Sistema de Transportación desarrollado. También se muestran los elementos que sirvieron de base para la obtención de los casos de prueba y cómo fueron organizados en archivos.

#### 6.1.1 Sistema de Transportación

El Sistema de Transportación desarrollado para resolver casos reales del problema RoSLoP (ver capítulo 2) fue implementado en una embotelladora de productos que por razones de confidencialidad la hemos denominado EMPRO. La Figura 6.1 muestra en forma general su esquema de funcionamiento.





**Figura 6.1.** Diagrama de Flujo del Sistema de Transportación que da solución al Problema ROSLOP

Los datos de los casos de entrada se obtienen de una base de datos de EMPRO, la cuál se carga en estructuras de memoria adecuadas para ser procesadas por el Sistema de Transportación. Una vez leídos los datos de entrada, se genera una solución inicial a través de la heurística del vecino más cercano, que se mejorará posteriormente utilizando el enfoque heurístico del sistema de colonia de hormigas.

El Sistema de Transportación tiene un tiempo límite especificado como condición de paro, el cual es establecido por el usuario del sistema. Una vez que es alcanzada dicha

condición el sistema termina, almacenando los resultados en tablas dentro de la base de datos.

Para la tarea de enrutamiento, el Sistema de Transportación resuelve BPVRP, el cual incluye las variantes VRPTW, HVRP, VRPM, MDVRP, VRPMTW, CVRP, SDVRP, sdVRP y la nueva restricción de la capacidad de atención en los clientes CCVRP (ver capítulo 2).

### 6.1.2 Implantación del Sistema de Transportación

En la primera etapa, EMPRO planteó la implantación del Sistema de Transportación en tres regiones. Cada región representa un área de distribución formada por un conjunto de clientes asociado a uno o más almacenes. En la Figura 6.2 se presenta el grafo de conexión de estas regiones.

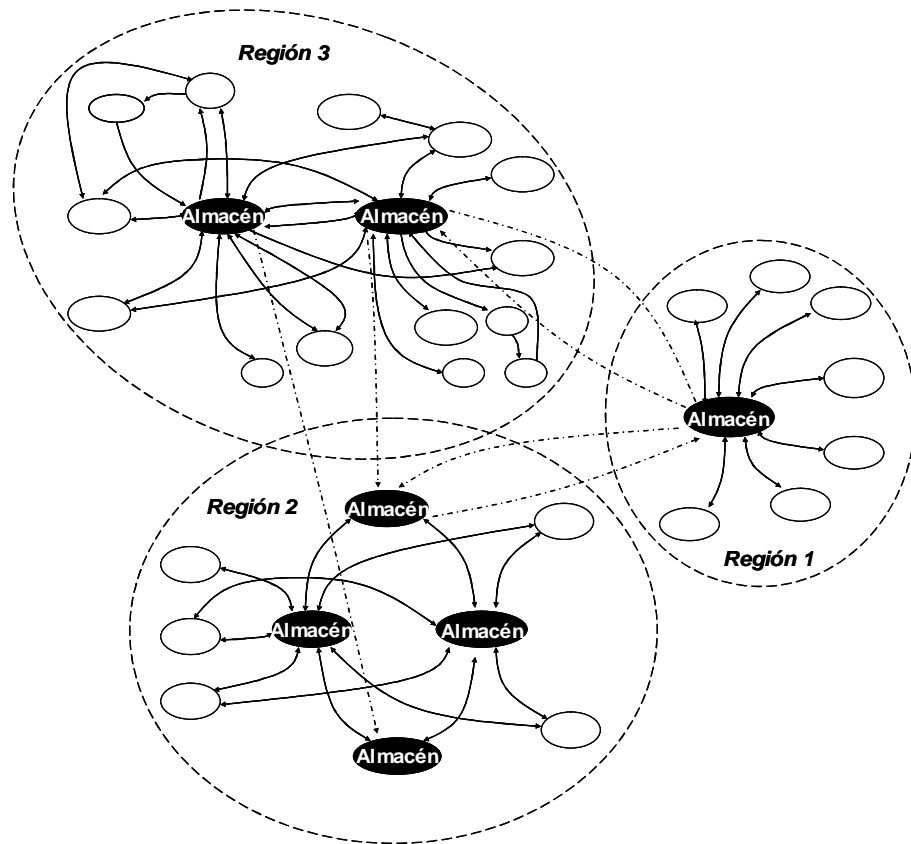


Figura 6.2. Grafo de conexión de las regiones de EMPRO.

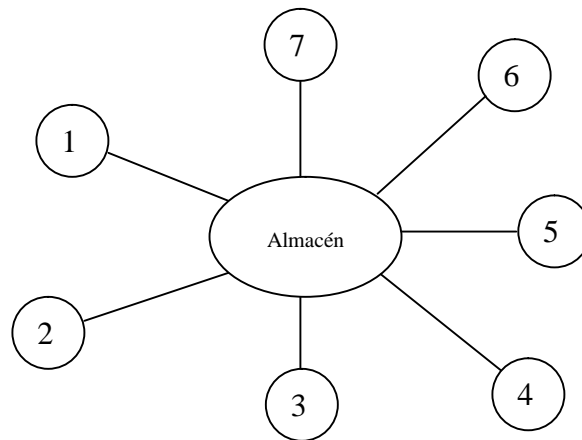
En una segunda etapa, la empresa pretende integrar las tres regiones en una más compleja para compartir recursos entre ellas.

Actualmente el Sistema de Transportación únicamente se ha instalado en la región 1. Por esta razón, aún no se cuenta con datos reales confiables de la operación de las otras regiones, así como de los resultados de la transportación que se realiza de manera manual en dichas regiones.

### 6.1.3 Descripción General de Casos de Prueba y su Complejidad

Los casos de prueba que se usaron para evaluar el Sistema de Transportación desarrollado en esta tesis, corresponden a la Región 1 de la embotelladora de productos EMPRO.

La Figura 6.3 muestra el grafo de conexión de la Región 1 de EMPRO. Como se puede apreciar, la Región 1 presenta el grafo de conexión más sencillo ya que contiene siete clientes enlazados en estrella al único almacén disponible.



**Figura 6.3.** Grafo de conexión de la Región 1 EMPRO.

La aparente sencillez de las conexiones de la Región 1 no disminuye su complejidad, ya que, como se verá líneas abajo, sigue involucrando variantes de VRP complejas. Por esta razón, los casos de prueba de la Región 1 (ver Sección 6.2.2) se consideraron suficientes para determinar si el Sistema de Transportación resuelve, de manera eficiente, situaciones complejas del mundo real.

Los elementos básicos dentro de los casos de prueba son: clientes, pedidos, almacenes y vehículos. Los clientes son las localidades que hacen un pedido. Los pedidos representan la demanda de producto a satisfacer por los almacenes. Los almacenes son las localidades que se encargan de satisfacer la demanda hecha por los clientes usando los vehículos disponibles. El conjunto de restricciones que se puede presentar para poder satisfacer las demandas puede ser diferente, dependiendo del caso que se desee resolver. Las restricciones involucradas se dividen en dos clases: restricciones de rutas y restricciones de cargas.

Las restricciones de rutas se refieren a los requisitos que se deben satisfacer en el diseño de las rutas para poder cubrir las demandas de los clientes. Este tipo de limitaciones se puede encontrar tanto para definición y asignación de rutas como para asignación de horarios. El sistema resolvió casos de prueba que incluyeron las siguientes propiedades:

1. La capacidad de los vehículos está limitada (CVRP);
2. Los vehículos tienen una capacidad heterogénea (HVRP);
3. Los vehículos pueden emplearse más de una vez (VRPM);
4. Los clientes tienen un periodo de tiempo en el cual debe ser satisfecha su demanda (VRPTW);
5. Los pedidos pueden exceder las capacidades de los vehículos por lo cual pueden requerir más de un viaje para poder satisfacer sus demandas (SDVRP);
6. Existe un solo almacén (sdVRP); y
7. Los clientes tienen una capacidad limitada para recibir vehículos simultáneamente (CCVRP).

Las restricciones de cargas manifiestan el orden en que deben ser acomodados los productos en un vehículo, se rigen bajo las propiedades de los bienes a abastecer. Estas restricciones son:

1. Los productos agrupados en camas deben ser de la misma área de restos y categoría;
2. Los productos que se agrupan en tarimas deberán tener la misma área de restos;

3. Se debe respetar el peso soportado de los productos;
4. Las tarimas no deberán exceder su altura límite o la altura de los contenedores donde serán ubicadas dentro de los vehículos;
5. Se debe respetar el peso soportado por el vehículo;
6. No se pueden combinar demandas de diferentes clientes;
7. Las tarimas deben ser acomodadas en el vehículo balanceando la carga entre ambos lados del mismo; y
8. Las tarimas más pesadas irán al frente del vehículo mientras las más ligeras estarán en la parte de atrás.

Una descripción más detallada de éstos dos conjuntos de restricciones se puede encontrar en la descripción del problema de transporte de una embotelladora de productos mostrado en la sección 2.4.

#### **6.1.4 Casos de Prueba del Sistema de Transportación**

Cada caso de prueba se define con un conjunto parámetros que deben ser proporcionados para su solución.

Para definir los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios, los parámetros de la instancia son: número de clientes, número de almacenes, número de vehículos, especificación de los depósitos, clientes y vehículos, demanda de los clientes, capacidad de los vehículos, matriz de conexiones, ventanas de tiempo de los clientes, ventana de tiempo del almacén, ventana de tiempo de los vehículos, tiempos de maniobra de los vehículos, especificación de la dependencia de los clientes, especificación de la dependencia de los vehículos y tipo y número máximos de vehículo que se pueden recibir en los clientes.

Los parámetros del problema de asignación de cargas son: vehículo donde se va a distribuir, demanda a distribuir y propiedades de los productos. El vehículo representa al conjunto de contenedores donde se debe hacer la distribución, mientras que la demanda los objetos que se deben cargar; ambos datos se obtienen como resultado de la transformación

de los parámetros de los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios, durante el proceso de búsqueda de solución. Las propiedades de los productos son las características que se necesitan para respetar las restricciones antes mencionadas.

Los parámetros de los casos de prueba son descritos más adelante, en la sección de especificación de parámetros, junto con la base de datos que se requiere para obtener la información de los casos reales.

### **6.1.5 Obtención de Casos de Prueba**

Las entradas (casos de prueba) del Sistema de Transportación, se obtienen procesando las tablas de base de datos proporcionada por la embotelladora de productos. En las tablas se encuentran todos los datos necesarios para generar la instancia que se desea resolver a través del sistema.

La carga a memoria de los parámetros que definen los problemas de definición y asignación de rutas y asignación de horarios se hace desde un archivo plano intermedio entre la base de datos y los datos en memoria. El archivo plano es compatible con los casos estándar de VRP propuestos por la comunidad científica. El propósito de su estructura es que en futuras versiones del sistema éste pueda ser utilizado para resolver instancias de cualquier variante VRP, y contrastar el comportamiento de los algoritmos de solución con el de otras investigaciones. Actualmente, sólo se han resuelto casos estándar de VRPTW.

Los parámetros del problema de asignación de carga se pasan directamente de la base de datos a memoria, sin hacer uso de un archivo intermedio. En las siguientes secciones se describe la estructura de la base de datos utilizada para formar un caso de prueba, y el archivo intermedio para cargar datos al sistema de manera estandarizada.

#### **6.1.5.1 Descripción de la Base de Datos de una Embotelladora**

Las tablas empleadas por el Sistema de Transportación provienen de una base de datos que ha sido facilitada por EMPRO, las Figuras 6.4 y 6.5 muestran los diagramas descriptivos.

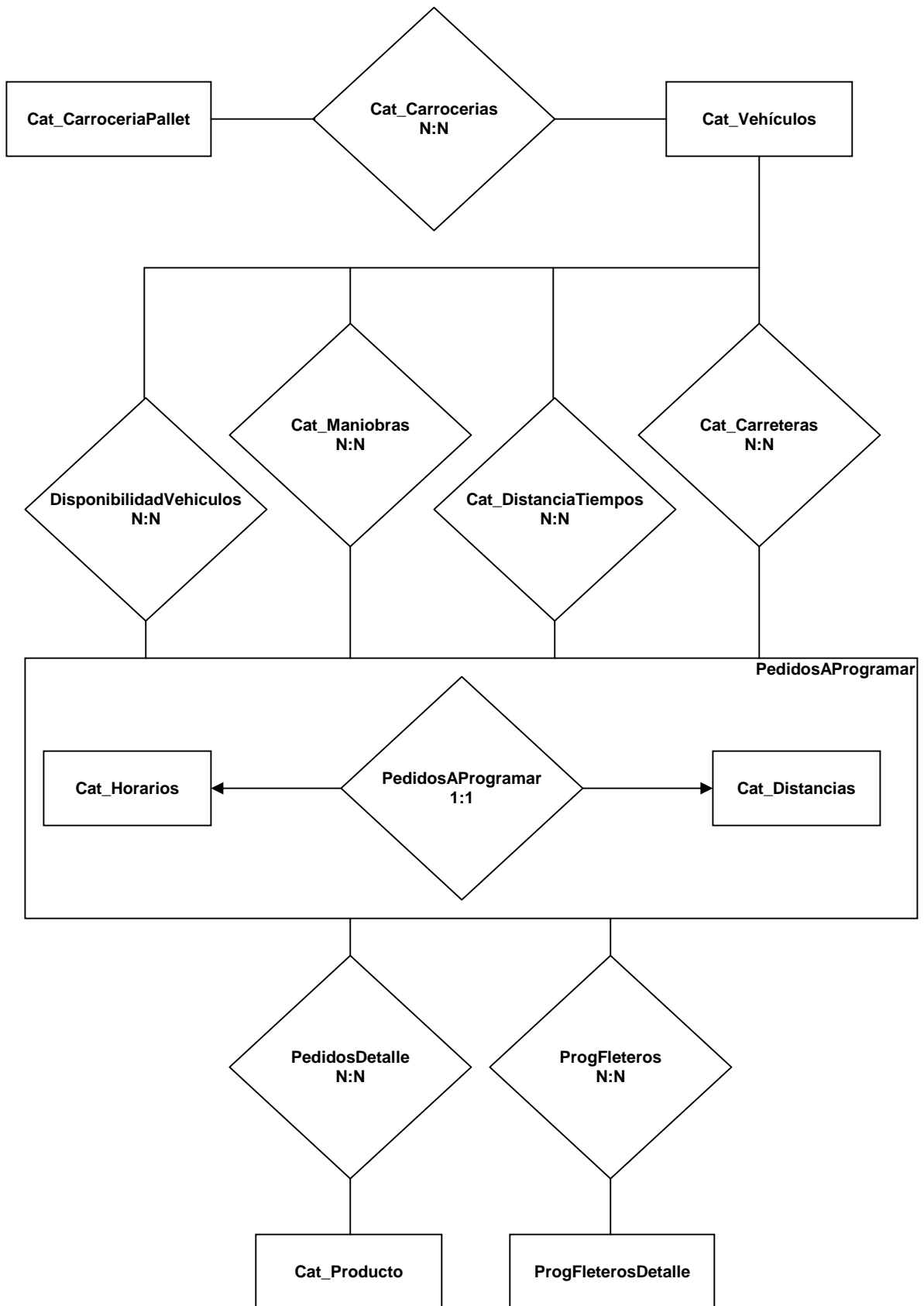


Figura 6.4. Diagrama Entidad – Relación de la Base de Datos EMPRO.

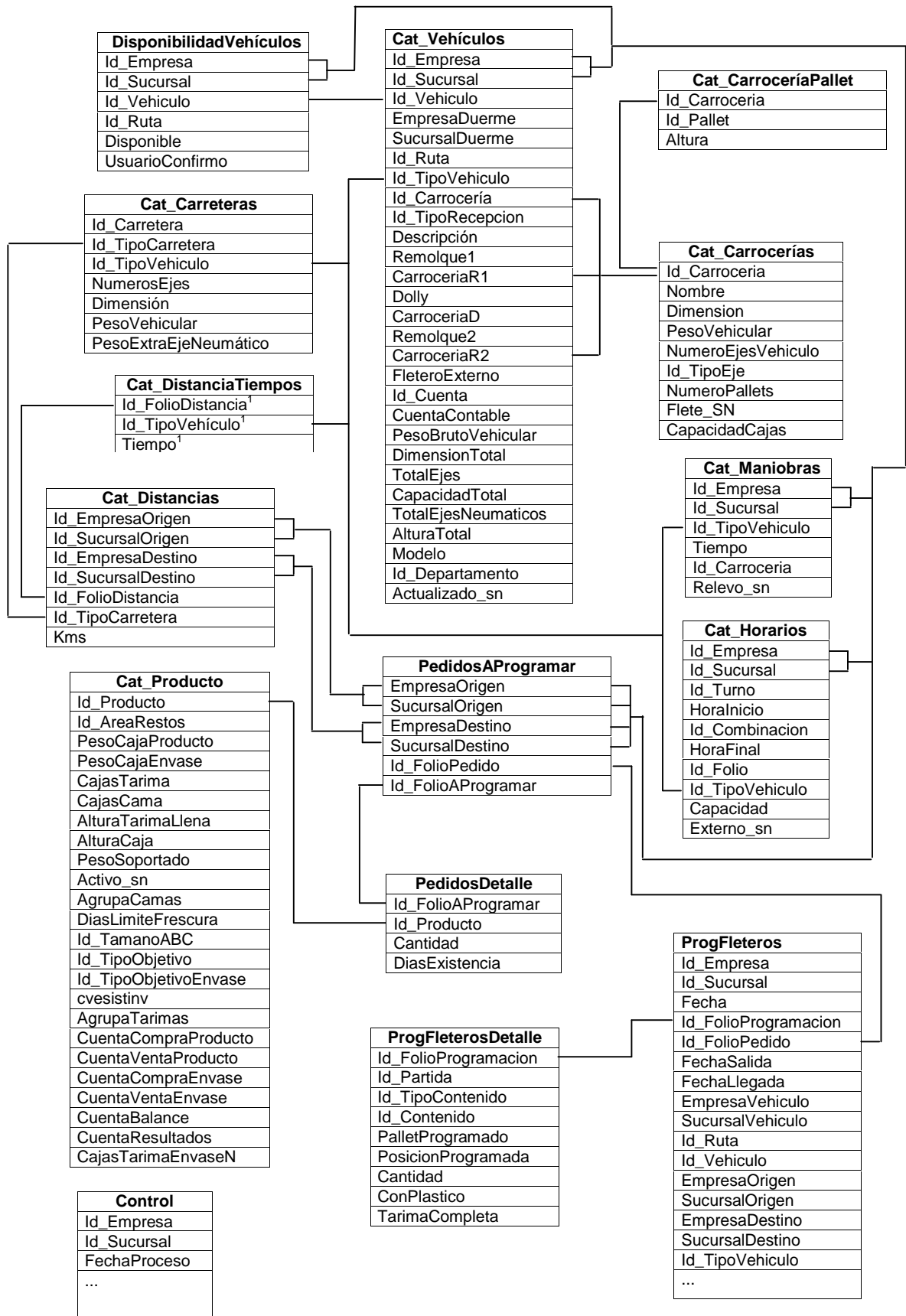


Figura 6.5. Diagrama de Relación de la Base de Datos de EMPRO.



En los siguientes párrafos se describen las tablas necesarias para obtener una instancia RoSLoP, y se indica qué campos participan en la obtención de dicho caso.

La Tabla 6.1 *Cat\_Vehículos* muestra información específica referente a la flotilla como: los tipos de contenedores que maneja, el tipo de vehículo, a que compañía pertenece, su peso, entre otros.

**Tabla 6.1. *Cat\_Vehiculos.***

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Empresa <sup>1</sup>	Identifican el almacén al que pertenece la empresa.
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
Id_Vehiculo <sup>1</sup>	Es el número de identificación del vehículo.
EmpresaDuerme	
SucursalDuerme	
Id_Ruta	
Id_TipoVehiculo <sup>1</sup>	Identifica de que clase es el vehículo.
Id_Carrocería <sup>1</sup>	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
Id_TipoRecepcion	
Descripción	
Remolque1	
CarroceriaR1 <sup>1</sup>	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
Dolly	
CarroceriaD	
Remolque2	
CarroceriaR2 <sup>1</sup>	Hace referencia al tipo de contenedores que el vehículo posee.
FleteroExterno <sup>1</sup>	Identifica si el vehículo es de la compañía o no.
Id_Cuenta	
CuentaContable	
PesoBrutoVehicular <sup>1</sup>	Peso total del vehículo.
DimensionTotal	
TotalEjes <sup>1</sup>	Número de ejes que conforman el vehículo.
CapacidadTotal	
TotalEjesNeumaticos <sup>1</sup>	Número de ejes neumáticos que conforman el vehículo.
AlturaTotal	
Modelo	
Id_Departamento	
Actualizado_sn	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.2 *DisponibilidadVehiculos* permite identificar qué vehículos de *Cat\_Vehiculos* se pueden emplear para satisfacer las demandas.

**Tabla 6.2. *DisponibilidadVehiculos.***

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Empresa <sup>1</sup>	Identifican el almacén donde se va a utilizar el vehículo
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
Id_Vehiculo <sup>1</sup>	Número único de identificación del vehículo.
Id_Ruta	
Disponible <sup>1</sup>	En este campo se indica con el valor de 1 si el vehículo representado por <i>Id_Vehiculo</i> puede ser empleado en la solución del caso de prueba.
UsuarioConfirмо	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La información específica sobre los contenedores de los vehículos se obtiene de las Tablas 6.3 y 6.4 (*Cat\_Carrocería* y *Cat\_CarroceriaPallet*). La tabla *Cat\_Carrocerías* proporciona información sobre el número de contenedores en cada carrocería que se puede asignar al vehículo, los cuales pueden tener a lo más tres tipos de carrocerías diferentes.

**Tabla 6.3. *Cat\_Carrocerías*.**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Carrocería <sup>1</sup>	Sirve para identificar cada tipo carrocería que puede ser asignado a los camiones.
Nombre	
Dimension	
PesoVehicular	
NumeroEjesVehiculo	
Id_TipoEje	
NumeroPallets	Contiene el total de contenedores de esta carrocería.
Flete_SN	
CapacidadCajas	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

En la Tabla 6.4 se almacena datos sobre las características de cada contenedor que compone los diferentes tipos de carrocería.

**Tabla 6.4. *Cat\_CarroceriaPallet***

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Carrocería <sup>1</sup>	Sirve para identificar cada tipo carrocería que puede ser asignado a los camiones.
Id_Pallet <sup>1</sup>	Número que identifica un contenedor dentro de una carrocería.
Altura <sup>1</sup>	Es la altura física del contenedor.

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

Para establecer las conexiones entre las ciudades se muestra la Tabla 6.5 *Cat\_Distancias*. En esta tabla se muestran las carreteras que unen cada una de las localidades que comprende el caso de prueba a formar. La matriz de conexiones es creada a partir de viajes entre un origen y un destino, los cuales no tienen localidades intermedias por visitar.

**Tabla 6.5. *Cat\_Distancias***

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_EmpresaOrigen <sup>1</sup>	Estos dos valores establecen la localidad de origen de un viaje.
Id_SucursalOrigen <sup>1</sup>	
Id_EmpresaDestino <sup>1</sup>	Estos dos valores establecen la localidad de destino de un viaje.
Id_SucursalDestino <sup>1</sup>	
Id_FolioDistancia <sup>1</sup>	Valor numérico identificador de un viaje (origen – destino). Sirve para determinar el costo de la conexión.
Id_TipoCarretera <sup>1</sup>	Clase de carretera por la que se realiza este viaje (A, B, ...).
Kms	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

Los costos de las conexiones entre localidades se proporcionan en la Tabla 6.6 *Cat\_DistanciaTiempos*. Su enlace con la matriz de conexiones especificada en *Cat\_Distancias* lo hace el campo *Id\_FolioDistancia*.

**Tabla 6.6.** *Cat\_DistanciaTiempos*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_FolioDistancia <sup>1</sup>	Valor numérico identificador de un viaje (origen – destino). Sirve para determinar el costo de la conexión en tiempo.
Id_TipoVehículo <sup>1</sup>	Tipo de Vehículo.
Tiempo <sup>1</sup>	Tiempo en que el vehículo de tipo <i>Id_TipoVehículo</i> recorre <i>Id_FolioDistancia</i> .

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

Dentro de la Tabla 6.7 *Cat\_Carreteras* se encuentra la descripción de los tipos de carreteras por los cuales se transita para visitar los clientes.

**Tabla 6.7.** *Cat\_Carreteras*.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Carretera <sup>1</sup>	Valor numérico único de carretera. Es el identificador que permite describir la matriz de conexiones de la tabla <i>Cat_Distancias</i> .
Id_TipoCarretera <sup>1</sup>	Clase de carretera construida físicamente para llegar al cliente.
Id_TipoVehículo <sup>1</sup>	Clase de vehículo que puede transitar por esta carretera.
NumerosEjes	
Dimensión	
PesoVehicular <sup>1</sup>	Peso máximo soportado del vehículo de tipo <i>Id_TipoVehículo</i> que circula por una carretera de clase <i>Id_TipoCarretera</i> .
PesoExtraEjeNeumático <sup>1</sup>	Peso que se puede adicionar al peso máximo soportado ( <i>PesoVehicular</i> ) por cada unidad de eje neumático que lleve el camión.

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

Las ventanas de tiempo de las localidades y su capacidad de atención se proporcionan en la Tabla 6.8 *Cat\_Horarios*. El horario de servicio de los vehículos se ajusta al horario de atención del almacén al que cada vehículo pertenece.

**Tabla 6.8.** *Cat\_Horarios*.

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Empresa <sup>1</sup>	Estos dos valores establecen a qué empresa se le están asignando las ventanas de tiempo y capacidad de atención.
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
Id_Turno <sup>1</sup>	Este campo es necesario para poder incluir diferentes periodos de atención de las localidades (fragmentos de tiempo).
Horainicio <sup>1</sup>	Es la hora en que comienza el turno <i>Id_Turno</i> .
Id_Combinacion	
HoraFinal <sup>1</sup>	Es la hora en que termina el turno <i>Id_Turno</i> .
Id_Folio	
Id_TipoVehículo <sup>1</sup>	Es la clase de vehículo más grande que puede recibir. Los vehículos disponibles cuyo <i>Id_TipoVehículo</i> sea menor a su valor también serán recibidos por el cliente identificado por <i>Id_Empresa</i> y <i>Id_Sucursal</i> .
Capacidad <sup>1</sup>	Es el número de vehículos que se pueden atender en forma simultánea.
Externo_sn	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.9 muestra el tiempo de carga y descarga de los vehículos por localidad.

**Tabla 6.9. Cat\_Maniobras.**

Campo	Descripción
Id_Empresa <sup>1</sup>	Estos dos valores establecen a qué empresa se le están asignando los tiempos de maniobra.
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
Id_TipoVehiculo <sup>1</sup>	Los tiempos de maniobra son asignados por cliente que se atiende y tipo de vehículo que lo atiende, este campo es el segundo elemento necesario para establecer los tiempos de maniobra.
Tiempo <sup>1</sup>	Es tiempo de carga y descarga de un vehículo de tipo <i>Id_TipoVehiculo</i> en la localidad identificada por <i>Id_Empresa</i> e <i>Id_Sucursal</i> .
Id_Carroceria	
Relevo_sn	Es la hora en que termina el turno <i>Id_Turno</i> .

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.10 contiene las propiedades de los productos que se toman en cuenta para poder hacer la distribución dentro de los contenedores de los vehículos.

**Tabla 6.10. Cat\_Producto.**

Campo	Descripción
Id_Producto <sup>1</sup>	Es el identificador de un producto específico.
Id_AreaRestos <sup>1</sup>	Propiedad: área de restos del producto.
PesoCajaProducto <sup>1</sup>	Es el peso de una caja de producto.
PesoCajaEnvase	
CajasTarima <sup>1</sup>	Es el número de cajas de un producto que se necesitan para formar una tarima homogénea.
CajasCama <sup>1</sup>	Es el número de camas de un producto que se necesitan para formar una cama homogénea.
AlturaTarimaLlena	
AlturaCaja <sup>1</sup>	Altura de la caja de producto
PesoSoportado <sup>1</sup>	Peso soportado por la caja de producto.
Activo_sn	
AgruparCamas <sup>1</sup>	Propiedad: Categoría del producto
DiasLimiteFrescura	
Id_TamanoABC	
Id_TipoObjetivo	
Id_TipoObjetivoEnvase	
cvesistinv	
AgruparTarimas	
CuentaCompraProducto	
CuentaVentaProducto	
CuentaCompraEnvase	
CuentaVentaEnvase	
CuentaBalance	
CuentaResultados	
CajasTarimaEnvaseN	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.11 indica cuáles son los clientes y almacenes del caso de prueba.

**Tabla 6.11. PedidosAProgramar.**

Campo	Descripción
EmpresaOrigen <sup>1</sup>	Este par representa el almacén que abastecerá este pedido.
SucursalOrigen <sup>1</sup>	
EmpresaDestino <sup>1</sup>	Este par representa el cliente con una demanda a ser satisfecha.
SucursalDestino <sup>1</sup>	
Id_FolioPedido	
Id_FolioAProgramar <sup>1</sup>	Folio de la demanda de cliente especificado en la Tabla 6.12.

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La Tabla 6.12 especifica (en número de cajas) el pedido de los clientes al almacén.

**Tabla 6.12. PedidosDetalle.**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_FolioAProgramar <sup>1</sup>	Identifica el cliente al que pertenece el pedido en Tabla 6.11.
Id_Producto <sup>1</sup>	Productos que forman parte de este pedido
Cantidad <sup>1</sup>	Cantidad de este producto a surtir.
DiasExistencia	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

Dentro de la Tabla 6.13 *Control* están las banderas que cambian las condiciones en que se deben resolver las instancias, como por ejemplo que se respeten las restricciones.

**Tabla 6.13. Control**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Empresa <sup>1</sup>	Estos elementos identifican el almacén que está realizando la programación de los horarios.
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
FechaProceso <sup>1</sup>	La fecha donde se va a obtener el caso de prueba a resolver.
FechaMttoSistema	
Id_FolioAlmacen	
Id_FolioPedido	
Id_FolioCompras	
Id_OrdenCompras	
Id_FolioFaltante	
Id_FolioFletero	
EstadoPedidoProducto	
EstadoProgramacionFleteo	
ProgramaFleteoPorPeso <sup>1</sup>	Bandera que indica si se debe existir la restricción de peso.
InventarioFisicoRealizado	
InicioSesion	
VerificacionSalidaRutas	
...	(Campos Innecesarios)
ProductosCompletarCarga	
NormasSCT	
ProgramaTiempovsCarga	
ActualizaCatalogoRemoto	
UsoAreaRestosFleteros	
UsoAreaRestosRutas	
PorcentajeCompletarCarga	
ControlaFrescuraLataMultiproducto	
UsaTarimaVacía	
DistribuyeCarga	
VigilanteUsaTP	
AlturaMaximaTarimaCombinada <sup>1</sup>	Altura máxima para la creación de tarimas mezcladas.
DiasAntesFrescarse	
UsuarioInicioSesion	
FinSalidaRutas	
AlturaMinimaTarimaCombinada <sup>1</sup>	Altura mínima para la creación de tarimas mezcladas.
UsarRestriccionDePeso	
FinSalidaPromotor	
FinSalidaCiel	
TiempoCalculo <sup>1</sup>	Tiempo máximo para buscar la solución.
AlturaTarima <sup>1</sup>	Altura de la tarima de madera donde se colocan las camas de producto para formar las tarimas.
PesoTarima <sup>1</sup>	Peso del tablón de madera donde se coloca el producto.

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

### 6.1.5.2 Descripción del Archivo Plano de Entrada

El archivo de entrada se encuentra estructurado a través de una serie de etiquetas que concentran la información requerida por el sistema, para la descripción de casos de prueba. El valor asignado a cada etiqueta, proveniente de los casos reales, se obtuvo de la base de datos proporcionada por EMPRO. El cálculo de dichos valores se muestra en el Anexo A de este documento. Las etiquetas son:

**VRPTEST** {*double*}. Es el identificador del formato. El valor que seguirá a esta etiqueta deberá ser numérico, expresando la versión del formato de la instancia que se está describiendo en el archivo.

**NAME**: {*string*}. Nombre del problema. Deberá ser una cadena de caracteres y dígitos indicando el nombre de la instancia. Esta cadena deberá ser resultado de una combinación de caracteres alfabéticos, dígitos ó ‘\_’. El nombre no deberá exceder los 254 caracteres.

**COMMENT**: {*string*}. Líneas de comentario utilizadas para aclarar alguna descripción del caso de prueba. Cada línea de comentario no deberá exceder de 254 caracteres.

**NUM\_VISITS**: {*int*}. Es el número de clientes con una demanda a satisfacer. No se deben incluir almacenes que son clientes de otros depósitos.

**NUM\_DEPOTS**: {*int*}. Es el número de almacenes.

**NUM\_VEHICLES**: {*int*}. Es el número máximo de vehículos disponibles.

**NUM\_LOCATIONS**: {*int*}. Es el número de localidades. Se contabiliza sumando el número de clientes más el número de almacenes que intervienen en el caso.

**MAX\_TIME**: {*real*}. Es la longitud máxima (en la unidad de tiempo que se maneje) de un tour (o ruta) simple. En esta sección se puede indicar el tiempo máximo de duración

que puede existir en el periodo de trabajo del caso que manejamos para nuestra variante VRP (p.e. 1 día).

**DATA\_SECTION.** Esta etiqueta separa el área de especificación de datos de la etiqueta de datos.

**DEPOTS**  $\{depot-id\}$  ... Son los identificadores de los almacenes. En nuestro caso estará representado por los números de nodos que representan depósitos.

**DEMAND\_SECTION**  $\{visit-id\}$   $\{quantity-1\}$   $[\{quantity-2\}...]$  -1. Representa las demandas de cada cliente así como la que hacen algunos depósitos a otros depósitos. En esta sección se especifican todas las demandas de los clientes. Más adelante en la etiqueta DEPOT\_COMPAT\_SECTION se especificará el orden de satisfacción de las demandas por almacén. El número de demandas que aparezca en cada cliente será el mismo que el número de veces que el cliente se repita en la sección DEPOT\_COMPAT\_SECTION, donde la primera aparición  $\{cliente, depot1\}$  indicará que el *depot1* deberá satisfacer la primer demanda que aparezca en esta sección para *cliente*, la siguiente  $\{cliente, depot2\}$  hará referencia a la segunda demanda y así sucesivamente. Las demandas son valores de punto flotante y el identificador de la visita es numérico. Deberán aparecer enunciadas todas las localidades (visitas y depots) con sus demandas especificadas, en caso de no tener demanda el valor que seguirá al identificador de la visita será -1.

**VEHICLE\_CAPACITY\_SECTION**  $\{vehicle-id\}$   $\{capacity-1\}$   $[\{capacity-2\}...]$ . En esta sección se muestra de manera explícita la capacidad de los NUM\_VEHICLES existentes.

**VEHICLE\_COST\_SECTION**  $\{vehicle-id\}$   $\{use-cost\}$   $\{distance-cost\}$   $\{time-cost\}$  . En esta sección se define el costo de uso de cada vehículo. Para vehículos de la compañía será 1.0, para vehículos externos será un costo que haga que se utilicen sólo cuando ya no existan vehículos de la compañía disponibles. Los parámetros  $\{distance-cost\}$   $\{time-cost\}$  toman un valor cualquiera ya que no importan para la variantes VRP consideradas.

**EDGE\_WEIGHT\_SECTION.** Es la matriz de adyacencia que indica el costo de viajar de un nodo a otro. El formato en esta sección se modifica puesto que el valor entre nodos dependerá del vehículo que se esté usando. Es una matriz simétrica puesto que representa lo mismo viajar de  $i$  a  $j$  que de  $j$  a  $i$ . Los valores son positivos.

**TIME\_WINDOW\_SECTION**  $\{visit-id\} \{early-1\} \{late-1\} \dots -1$ . Indica las ventanas de tiempo disponibles para todos los clientes. En esta sección se expresarán los turnos de servicio a los vehículos para que hagan operaciones de maniobra. Aquí solamente se incluirán clientes. Las ventanas de tiempo se deben mostrar en orden cronológico por visita, es decir de la que tiene el inicio mas temprano a la que tiene el inicio mas tardío.

**DEPOT\_TIME\_WINDOW\_SECTION**  $\{depot-id\} \{early\} \{late\}$  . Ventana de tiempo para el almacén. Especifica el horario de trabajo de los almacenes, similar al de los clientes.

**VEH\_TIME\_WINDOW\_SECTION**  $\{vehicle-id\} \{early-1\} \{late-1\} \dots -1$ . Tiempo disponible de los vehículos, horarios de trabajo. Indica todos los turnos disponibles que tiene un camión.

**DURATION\_BY\_VEH\_SECTION**  $\{visit-id\} \{veh-1-id\} \{duration-1\} \{veh-2-id\} \{duration-2\} \dots -1$ . Especifica el tiempo de maniobra de cada vehículo en cada localidad.

**DEPOT\_COMPAT\_SECTION**  $\{visit-id\} \{depot-id\} \{sense\} \dots -1$ . En esta sección se especifica que almacén o CEPRO debe satisfacer una demanda de un cliente, esta sección mantiene una relación muy estrecha con la de DEMAND\_SECTION.

**VEH\_DEPOT\_SECTION**  $\{veh-id\} \{depot-id\} \{sense\} \dots -1$ . Indica a que almacén pertenece cada vehículo, y que por lo tanto será el lugar de donde saldrá y a donde deberá llegar.



**MAXIMUM\_ATTENTION\_CAPACITY\_SECTION** {*visit-id*} {*max\_vehicle*}.

Esta es una nueva sección que indica el tipo máximo de vehículo que se puede recibir en el cliente {*visit-id*} especificado.

**MAXIMUM\_VEHICLES\_NUMBER\_SECTION** {*visit-id*} {*number*}. Esta es una nueva sección en la cuál se especifica el número de vehículos máximo que se puede atender al mismo tiempo en un cliente en un horario determinado.

En el Anexo B se muestra un ejemplo completo de una instancia real de RoSLoP, así como las tablas y archivo plano que se utilizaron para obtener dicha instancia.

### 6.1.6 Descripción de la Salida del Sistema

La salida del sistema incluye los siguientes elementos: las rutas seguidas por cada uno de los vehículos, los horarios de visitas a los clientes y la distribución del producto en cada uno de los viajes de la flotilla. En la Tabla 6.14 se despliegan las rutas y horarios seguidos por los vehículos.

**Tabla 6.14.** *ProgFleteros.*

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_Empresa <sup>1</sup>	Identifica al Cliente
Id_Sucursal <sup>1</sup>	
Fecha <sup>1</sup>	Identifica la fecha en que se está corriendo el proceso.
Id_FolioProgramacion <sup>1</sup>	Viaje del vehículo para satisfacer un cliente. También se emplea para especificar la distribución de carga en la Tabla 6.15.
Id_FolioPedido <sup>1</sup>	Número de pedido que se está satisfaciendo
FechaSalida <sup>1</sup>	Hora en que sale de la localidad anterior donde se ubicaba el vehículo.
FechaLlegada <sup>1</sup>	Hora en que llega al cliente especificado por Id_Empresa e Id_Sucursal.
EmpresaVehiculo <sup>1</sup>	Especifica a que almacén pertenece el vehículo que realiza este viaje.
SucursalVehiculo <sup>1</sup>	
Id_Ruta	
Id_Vehiculo <sup>1</sup>	Vehículo utilizado en este viaje.
EmpresaOrigen <sup>1</sup>	Donde inicia el vehículo el viaje.
SucursalOrigen <sup>1</sup>	
EmpresaDestino <sup>1</sup>	Hacia donde se dirige el vehículo en este viaje.
SucursalDestino <sup>1</sup>	
Id_TipoVehiculo <sup>1</sup>	Tipo del vehículo que se está utilizando.
Remolque1	
Dolly	
Remolque2	
enviado_sn	
Cajas	
Envases	
Generado_sn	

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

La distribución de la carga en los vehículos se especifica a detalle en la Tabla 6.15, donde se muestra en que posición de los contenedores va cada uno de los productos.

**Tabla 6.15. ProgFleterosDetalle.**

<b>Campo</b>	<b>Descripción</b>
Id_FolioProgramacion <sup>1</sup>	Viaje para el cual se especifica a detalle la distribución del producto en un vehículo.
Id_Partida	
Id_TipoContenido	
Id_Contenido <sup>1</sup>	Un producto dentro de este viaje.
PalletProgramado <sup>1</sup>	Contenedor donde se ubicará el producto dentro del vehículo especificado en la Tabla 6.14.
PosicionProgramada <sup>1</sup>	Posición dentro del contenedor donde irá el producto.
Cantidad	Número de cajas de producto que irán en ese contenedor, en la posición especificada.
ConPlastico	
TarimaCompleta <sup>1</sup>	Especifica si es una tarima homogénea.

<sup>1</sup> Campo requeridos para construir los casos de prueba

## **6.2 Experimento 1: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra el algoritmo del Vecino más Cercano.**

Este experimento compara la heurística de solución propuesta en la metodología de este trabajo de investigación con una heurística determinista muy conocida, la del vecino más cercano [Solomon, 1987]. El objetivo es demostrar que el vecino más cercano, no es suficiente para alcanzar los estándares de eficiencia requeridos por la embotelladora de productos.

La embotelladora de producto establece que el sistema será eficiente sólo si cumple con las siguientes condiciones: que el pedido de un cliente sea satisfecho por lo menos en un 98%; que el tiempo máximo para proporcionar una solución sea de diez minutos; y que el número de vehículos empleados para cubrir la demanda no sobrepase el número de unidades disponibles.

### **6.2.1 Hipótesis**

“La eficiencia del Algoritmo del Vecino más Cercano, en la solución de casos de prueba reales del problema RoSLoP, es menor a la del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos.”

## 6.2.2 Casos de Prueba

Los casos de prueba empleados en este experimento son casos reales presentados en una embotelladora de productos. La tabla 6.16 muestra la descripción de tales casos. Las columnas uno y dos identifican al caso con la fecha cuando surgió en la embotelladora. Las columnas tres, cuatro y cinco representan los parámetros básicos del caso de prueba. La columna seis representa el número total de conexiones entre ciudades dadas por la matriz de conexiones, se toma como un indicador del tamaño del problema. Las columnas siete y ocho contienen el número de vehículos que puede ser atendido en una localidad (almacén o cliente) en forma simultánea. La última columna es la cantidad de cajas de producto solicitadas por todos los clientes que componen la caso RoSLoP que se describe.

**Tabla 6.16.** Descripción de las instancias RoSLoP Reales.

Instancia		Descripción de los casos RoSLoP Reales						
Caso	Fecha año-mes-día	Clientes	Vehículos	Almacenes	Arcos	Capacidad de los clientes	Capacidad del Almacén	Demanda del Cliente
Caso 01	20050819	5	8	1	10	1	2	8598
Caso 02	20050706	7	8	1	10	1	2	15338
Caso 03	20050713	6	8	1	10	1	2	9654
Caso 04	20050718	5	8	1	10	1	2	7831
Caso 05	20050719	6	8	1	10	1	2	11329
Caso 06	20050708	7	8	1	10	1	2	14607
Caso 07	20050709	7	8	1	10	1	2	15445
Caso 08	20050711	7	8	1	10	1	2	16698
Caso 09	20050712	7	8	1	10	1	2	15375
Caso 10	20050713	6	8	1	10	1	2	9654
Caso 11	20050715	5	8	1	10	1	2	11187
Caso 12	20050716	6	8	1	10	1	2	10777
Caso 13	20050718	5	8	1	10	1	2	7831
Caso 14	20050719	6	8	1	10	1	2	11329
Caso 15	20050720	1	8	1	10	1	2	763
Caso 16	20050721	7	8	1	10	1	2	12810
Caso 17	20050722	7	8	1	10	1	2	15353
Caso 18	20050723	5	8	1	10	1	2	11164
Caso 19	20050726	7	8	1	10	1	2	14929
Caso 20	20050727	6	8	1	10	1	2	11187
Caso 21	20050728	7	8	1	10	1	2	12572
Caso 22	20050729	7	8	1	10	1	2	14523
Caso 23	20050730	5	8	1	10	1	2	8030
Caso 24	20050801	1	8	1	10	1	2	2765
Caso 25	20050806	7	8	1	10	1	2	12624
Caso 26	20050808	4	8	1	10	1	2	8170
Caso 27	20050810	5	8	1	10	1	2	6846
Caso 28	20050811	1	8	1	10	1	2	1008
Caso 29	20050819	5	8	1	10	1	2	8598
Caso 30	20050820	7	8	1	10	1	2	12681

Caso 31	20050822	6	8	1	10	1	2	10953
Caso 32	20050823	7	8	1	10	1	2	15040
Caso 33	20050824	7	8	1	10	1	2	12624
Caso 34	20050825	7	8	1	10	1	2	14262
Caso 35	20050827	6	8	1	10	1	2	10605
Caso 36	20050829	7	8	1	10	1	2	12424
Caso 37	20050830	7	8	1	10	1	2	13600
Caso 38	20050831	7	8	1	10	1	2	12532
Caso 39	20050901	7	8	1	10	1	2	11584

### 6.2.3 Condiciones del Experimento

El algoritmo para resolver las tarea de definición y asignación de rutas, asignación de cargas y asignación de horarios, fue implementado en el lenguaje de programación C#. El sistema de transporte basado en heurísticos (TSHA) se ejecutó durante diez minutos. Las condiciones de la experimentación fueron: procesador AMD Athlon XP, 1.3 Ghz, 192 Mb en RAM, Sistema Operativo Windows XP. Las condiciones del equipo utilizado en la experimentación fueron similares a las de la compañía embotelladora. La configuración de los parámetros del algoritmo implementado se muestra en la Tabla 6.17.

**Tabla 6.17.** Configuración de los parámetros del algoritmo ACS para BPVRP.

Parámetro	Valor
Núm. Hormigas	15
Colonias	5
$q_0$	0.9
S	2
...	0.1

### 6.2.4 Resultados Experimentales

En la Tabla 6.18 se muestran los resultados obtenidos por TSHA y la heurística del vecino más cercano (NN, Nearest Neighborhood). Se muestra el número de vehículos usados en la solución construida, la demanda satisfecha, el porcentaje de demanda satisfecha (demanda satisfecha en la solución entre demanda total a satisfacer) y el tiempo de ejecución. Las columnas dos, cuatro, seis y ocho muestran los resultados de NN, mientras que las columnas tres, cinco, siete y nueve corresponden a los resultados de TSHA.

**Tabla 6.18.** Resultados de NN y TSHA.

Instancias	Indicadores de Eficiencia							
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% Demanda Satisfecha		Tiempo de Ejecución	
	NN	TSHA	NN	TSHA	NN	TSHA	NN	TSHA
Caso 01	8	4	8589	8598	99	100	1 seg.	10 min.
Caso 02	8	7	10197	15325	66	99	1 seg.	10 min.
Caso 03	8	4	9639	9639	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 04	8	3	7831	7831	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 05	8	7	5529	11324	48	99	1 seg.	10 min.
Caso 06	8	6	11961	14588	81	99	1 seg.	10 min.
Caso 07	8	8	11322	15441	73	99	1 seg.	10 min.
Caso 08	8	7	6754	16698	40	100	1 seg.	10 min.
Caso 09	8	7	13933	15375	90	100	1 seg.	10 min.
Caso 10	8	4	9639	9639	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 11	8	5	11187	11187	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 12	8	6	10705	10756	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 13	8	3	7831	7831	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 14	8	7	5529	11324	48	99	1 seg.	10 min.
Caso 15	1	1	748	748	98	98	1 seg.	10 min.
Caso 16	8	6	11186	12805	87	99	1 seg.	10 min.
Caso 17	8	7	11020	15348	71	99	1 seg.	10 min.
Caso 18	8	5	11164	11164	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 19	8	7	13261	14908	88	99	1 seg.	10 min.
Caso 20	8	5	9580	11187	85	100	1 seg.	10 min.
Caso 21	8	7	10682	12572	84	100	1 seg.	10 min.
Caso 22	8	7	11125	14518	76	99	1 seg.	10 min.
Caso 23	8	8	8030	8030	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 24	3	3	2765	2765	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 25	8	6	10849	12614	85	99	1 seg.	10 min.
Caso 26	8	3	8091	8165	99	99	1 seg.	10 min.
Caso 27	8	8	6846	6846	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 28	1	1	1008	1008	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 29	8	4	8589	8598	99	100	1 seg.	10 min.
Caso 30	8	7	11077	12681	87	100	1 seg.	10 min.
Caso 31	8	5	10953	10953	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 32	8	7	8019	15040	53	100	1 seg.	10 min.
Caso 33	8	5	11302	12624	89	100	1 seg.	10 min.
Caso 34	8	7	11283	14262	79	100	1 seg.	10 min.
Caso 35	8	5	10605	10605	100	100	1 seg.	10 min.
Caso 36	8	6	11154	12424	89	100	1 seg.	10 min.
Caso 37	8	6	12091	13600	88	100	1 seg.	10 min.
Caso 38	8	6	8407	12532	67	100	1 seg.	10 min.
Caso 39	8	6	11546	11584	99	100	1 seg.	10 min.

En la Tabla 6.19 se muestra una comparación del desempeño del algoritmo TSHA después de 5 segundos y al alcanzar el tiempo límite asignado: 10 minutos.

**Tabla 6.19.** Comparación del desempeño de TSHA con diferentes criterios de parada

Instancias	Indicadores de Eficiencia					
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% de la Demanda Satisfecha	
	TSHA <sup>1</sup>	TSHA <sup>2</sup>	TSHA <sup>1</sup>	TSHA <sup>2</sup>	TSHA <sup>1</sup>	TSHA <sup>2</sup>
Caso 01	5	4	8598	8598	100	100
Caso 02	7	7	15325	15325	99	99
Caso 03	5	4	9639	9639	99	99
Caso 04	5	3	7831	7831	100	100
Caso 05	8	7	11324	11324	99	99
Caso 06	7	6	14588	14588	99	99
Caso 07	8	8	13779	15441	89	99
Caso 08	8	7	16698	16698	100	100
Caso 09	8	7	15375	15375	100	100
Caso 10	6	4	9639	9639	99	99
Caso 11	6	5	11187	11187	100	100
Caso 12	7	6	10756	10756	99	99
Caso 13	4	3	7831	7831	100	100
Caso 14	8	7	11324	11324	99	99
Caso 15	1	1	748	748	98	98
Caso 16	7	6	12805	12805	99	99
Caso 17	8	7	15348	15348	99	99
Caso 18	6	5	11164	11164	100	100
Caso 19	8	7	14908	14908	99	99
Caso 20	6	5	11187	11187	100	100
Caso 21	8	7	12572	12572	100	100
Caso 22	8	7	13046	14518	89	99
Caso 23	8	8	8030	8030	100	100
Caso 24	3	3	2765	2765	100	100
Caso 25	7	6	12614	12614	99	99
Caso 26	4	3	8165	8165	99	99
Caso 27	8	8	6846	6846	100	100
Caso 28	1	1	1008	1008	100	100
Caso 29	5	4	8598	8598	100	100
Caso 30	7	7	12681	12681	100	100
Caso 31	5	5	10953	10953	100	100
Caso 32	7	7	15040	15040	100	100
Caso 33	6	5	12624	12624	100	100
Caso 34	8	7	14262	14262	100	100
Caso 35	5	5	10605	10605	100	100
Caso 36	6	6	12424	12424	100	100
Caso 37	7	6	13600	13600	100	100
Caso 38	7	6	12532	12532	100	100
Caso 39	6	6	11584	11584	100	100

<sup>1</sup> Tiempo de Ejecución 5 segundos.<sup>2</sup> Tiempo de Ejecución 10 minutos

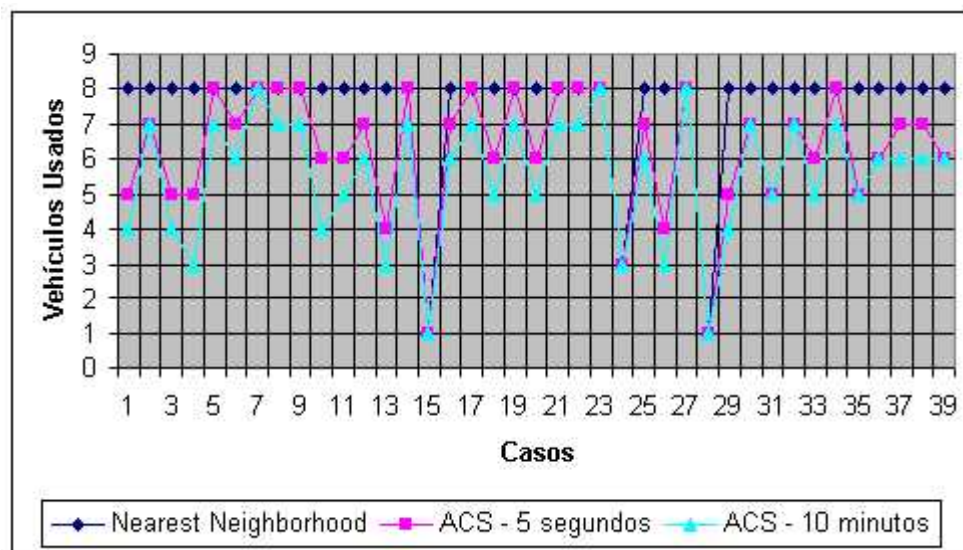
### 6.2.5 Análisis de los Resultados

Se puede ver en la Tabla 6.18, que aún cuando el algoritmo NN es el más veloz, sólo satisfizo en promedio el 46.1% de la demanda de todos los casos, y de ellos sólo en un

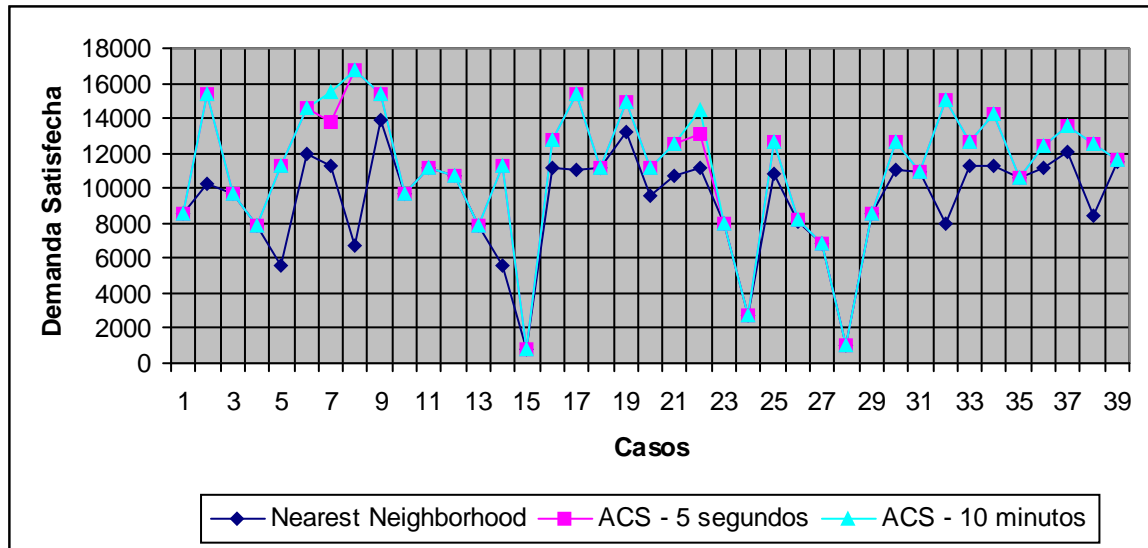
16.6% logró ocupar una cantidad menor de vehículos a la disponible, con lo cual se muestra que su eficiencia está muy por debajo del límite aceptado.

Por otra parte, TSHA mostró un desempeño a la altura de los estándares exigidos, logró satisfacer la demanda del 100% de los casos (se consideran satisfechos aquellos casos cuya demanda fue atendida en el rango del 98% al 100 %, este umbral considera mermas que aún en procedimientos manuales no son enviadas), y en un 92.3% de los casos utilizó un número de vehículos menor al disponible. La Figura 6.5 muestra la comparación del desempeño del NN y el TSHA en cuanto a número de vehículos y demanda satisfecha.

De acuerdo a la Tabla 6.19, el incremento en el parámetro de TSHA que controla el criterio de parada del algoritmo (tiempo) puede afectar de forma considerable la solución. Se puede observar que en los primeros cinco segundos de ejecución del algoritmo se logran mejoras considerables (en comparación con Nearest Neighborhood) y es posible mejorar más la solución si se extiende el tiempo dado. Este comportamiento del algoritmo también se puede apreciar en la Figura 6.5.



a) Comparación de vehículos usados.



b) Comparación de la demanda satisfecha.  
**Figura 6.6.** Comparación del Desempeño de las Heurísticas.

Del análisis de resultados se concluye que el Nearest Neighborhood no es una heurística adecuada para resolver el problema RoSLoP en casos reales. Además, aún cuando el TSHA se desempeña en forma adecuada durante los primeros segundos de su ejecución (alcanza soluciones que cumplen el estándar establecido por la compañía), si se extiende el tiempo, sin pasar del límite establecido, se pueden mejorar las soluciones beneficiando a la embotelladora. Por lo anterior se acepta la hipótesis del experimento.

### 6.3 Experimento 2: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra la Solución Manual.

Este experimento muestra que es posible resolver casos reales del problema RoSLoP, a través de la metodología propuesta en este trabajo de investigación, de tal manera que se obtengan soluciones eficientes que mejoren los resultados de las soluciones manuales.

#### 6.3.1 Hipótesis

La realización de este experimento parte del siguiente supuesto:

“Es posible mejorar el Procedimiento Manual utilizado en la solución de los casos de reales del problema RoSLoP usando el Sistema de Transporte Basado en Heurísticos.”



### 6.3.2 Casos de Prueba

Para este experimento se tomaron cinco casos de prueba del conjunto mostrado en el Experimento 1 (casos 30 a 34 de la Tabla 6.16). Para dichos casos, fue proporcionada la solución que obtiene el procedimiento manual que lleva a cabo la compañía.

### 6.3.3 Condiciones de la Experimentación

Los algoritmos fueron implementados en el lenguaje de programación C#. La comparación del procedimiento manual se hizo con el TSHA con criterio de parada ajustado a diez minutos. Los parámetros de control del algoritmo ACS y las condiciones del equipo fueron similares a los del experimento 1.

### 6.3.4 Resultados Experimentales

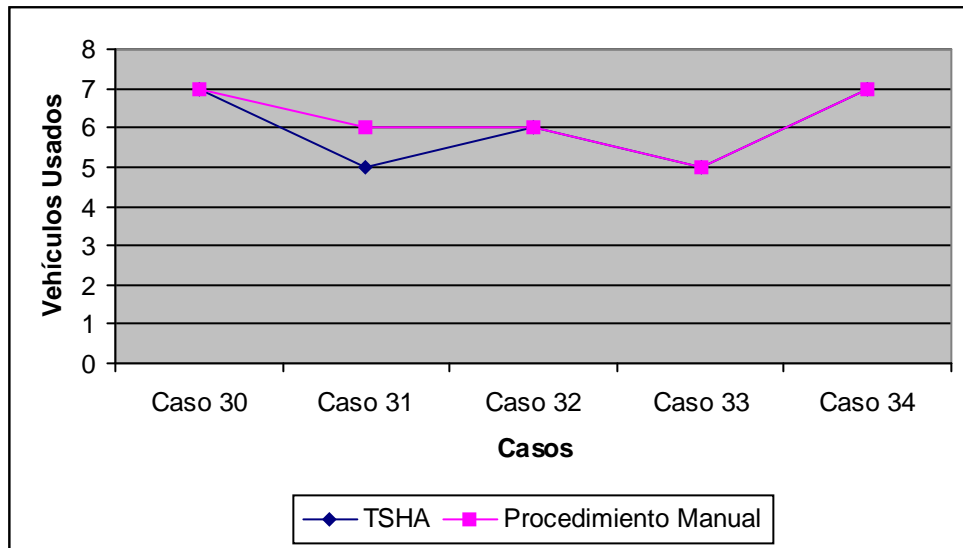
La Tabla 6.20 compara los resultados de ambos procedimientos: manual y TSHA.

**Tabla 6.20.** Comparación de TSHA con el Procedimiento Manual.

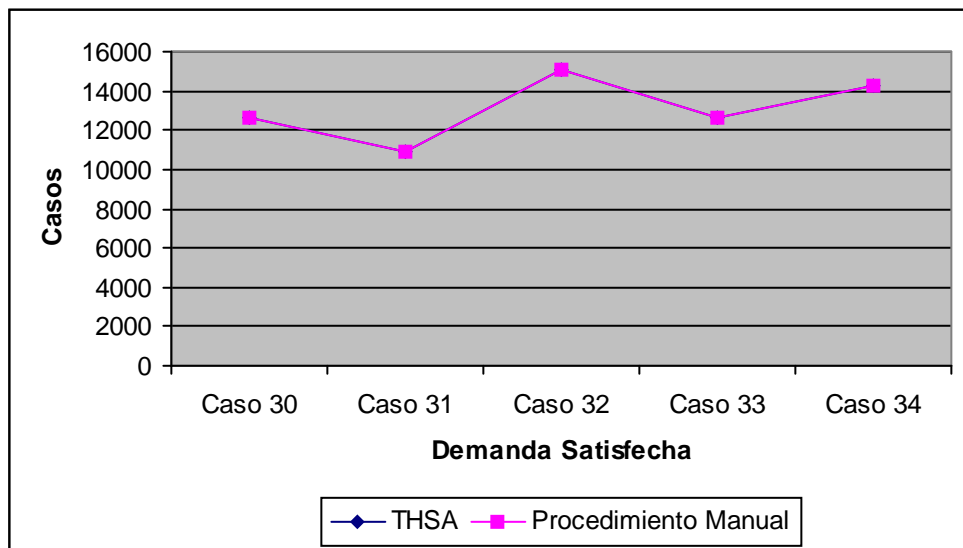
Instancias	Indicadores de Eficiencia							
	Vehículos usados en la solución		Demanda Satisfecha		% de Demanda Satisfecha		Tiempo de Ejecución	
	TSHA	Manual	TSHA	Manual	TSHA	Manual	TSHA	Manual
Case 30	7	7	12681	12681	100	100	10 minutos	16 horas
Case 31	5	6	10953	10953	100	100	10 minutos	16 horas
Case 32	6	6	15040	15040	100	100	10 minutos	16 horas
Case 33	5	5	12624	12624	100	100	10 minutos	16 horas
Case 34	7	7	14262	14262	100	100	10 minutos	16 horas

### 6.3.5 Análisis de los Resultados

Como se muestra en la Tabla 6.20, el desempeño de TSHA en comparación con el procedimiento manual, mejora el tiempo consumido en todos los casos. También mejora el número de vehículos utilizados en un 20% de los casos. En todos los casos, TSHA logra satisfacer las demandas utilizando a lo más el mismo número de vehículos empleado en la solución manual. Una vista gráfica del desempeño de los dos procedimientos comparados en esta sección se presenta en la Figura 6.6.



a) Comparación por vehículos usados.



b) Comparación por demanda satisfecha.

**Figura 6.7.** Comparación del desempeño del Procedimiento Manual contra el sistema TSHA.

En conclusión, los resultados arrojados por este experimento mostraron que el sistema basado en la metodología propuesta en este trabajo de investigación obtiene mejores soluciones que el procedimiento manual utilizado por la compañía que se estudia, por lo que se acepta la hipótesis de este experimento.

# Capítulo 7

## Conclusiones y Trabajos Futuros

---

En este capítulo se presentan las aportaciones de esta investigación y se sugieren direcciones para trabajos futuros.

### 7.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se muestra que es factible resolver el problema de transporte de productos que se presenta en empresas del mundo real, mediante una metodología de solución basada en algoritmos heurísticos. En particular se abordó la gestión de transporte de una compañía de productos embotellados, que por razones de confidencialidad se denomina EMPRO.

Como resultado de la implementación de la metodología se construyó un sistema de transporte (TSHA, Transportation System Based on Heuristic Approaches) que utiliza los algoritmos de sistema de colonias de hormigas (ACS, Ant Colony System) y distribución de productos (DiPro) para resolver las tareas que integran al problema general de transportación (RoSLoP, Routing-Scheduling-Loading). ACS resuelve simultáneamente las tareas de definición de rutas, asignación de rutas a vehículos y asignación de horarios de recorrido a vehículos, como un problema de enrutamiento de vehículos (VRP, Vehicle

Routing Problem). DiPro realiza la asignación de cargas a vehículos con un enfoque similar a la planificación de uso del procesador de una computadora.

Las principales contribuciones de esta tesis en el ámbito científico son:

- J El diseño un marco de solución, para situaciones reales del problema de transporte, que integra el análisis de problemas clásicos que se encuentran en la comunidad científica tales como VRP y la planificación del uso del procesador. La metodología que incorpora este marco de solución se describe en el capítulo 5.
- J La identificación de dos nuevas variantes VRP que no han sido consideradas en ningún otro trabajo de investigación: CCVRP y DDVRP. La primera especifica que los clientes tienen una capacidad limitada para recibir vehículos y la segunda que los almacenes pueden hacer pedidos Una descripción detallada de estas nuevas variantes se puede ver en la sección 2.4.1.
- J La definición de una variante VRP para productos embotellados (BPVRP, Bottled Product Vehicle Routing Problem). En la comunidad científica a este tipo de problemas se les conoce como variante Rich VRP, debido a que involucra un conjunto de variantes básicas VRP. El conjunto de restricciones de transportación que involucra BPVRP no se ha abordado en su totalidad en ningún otro trabajo de investigación. La Tabla 2.1 resume las propiedades de las variantes VRP asociadas a BPVRP: CVRP, OVRP, MDVRP, VRPM, HVRP, PVRP, VRPTW, VRPMTW, sdVRP, SDVRP, CCVRP y DDVRP.
- J La formulación de un modelo matemático de programación lineal entera que describe las tareas de enrutado y programación de horarios del problema RoSLoP. En el capítulo 4 se presenta la función objetivo y restricciones que componen al modelo.
- J El diseño de un algoritmo heurístico (ACS), basado en un enfoque de optimización de colonias de hormigas, que resuelve las tareas de enrutado y asignación de

horarios. De manera incremental, este algoritmo construye las rutas y horarios usando información heurística de vehículos y clientes, y la calidad de la construcción realizada. Las reglas de construcción propuestas y el algoritmo ACS se describen en la sección 5.2.

- ) El diseño un algoritmo de solución que permite resolver la tarea de asignación de carga, empleando la estrategia Round Robin comúnmente usada en planificación del procesador. La sección 5.3 presenta la descripción de este algoritmo proximado determinista.

Por otro lado, a través de los resultados experimentales obtenidos se logró concluir lo siguiente:

- ) Fue posible automatizar la solución de casos reales del problema RoSLoP a través de técnicas heurísticas, conservando el estándar de eficiencia requerido por la compañía EMPRO. Una revisión de los estándares de eficiencia se presenta en la sección 6.2.
- ) En contraste con la solución manual de casos reales RoSLoP, TSHA redujo en el 100% de los casos de prueba, el tiempo requerido para dar una solución. La disminución fue de 16 horas a 10 minutos. Además, TSHA logró reducir el número de vehículos usados en la solución manual, en un 20% de los casos de prueba. La Tabla 6.20 presenta estos resultados.
- ) El algoritmo ACS superó al algoritmo clásico NN al satisfacer en el 100% de los casos de prueba todas las demandas de los clientes, y al emplear en un 92.3% de las instancias una cantidad de vehículos menor a la disponible, dentro del tiempo límite establecido por EMPRO. Las Tablas 6.18 y 6.19 detallan los resultados que permitieron obtener los indicadores de calidad.

- ) El algoritmo NN no satisfizo los estándares de eficiencia requeridos por EMPRO. Las demandas fueron cubiertas en sólo 46.1% de los casos. En la sección 6.2.5 se analizan resultados y se llega a esta conclusión.
- ) La calidad de la solución dada por el algoritmo ACS depende del tiempo de ejecución permitido para la tarea de búsqueda de soluciones, mientras mayor sea existe la posibilidad de mejorar la solución final. La Tabla 6.19 y Figura 6.5 muestran este comportamiento.

## **7.2 Trabajos Futuros**

Para dar continuidad a este trabajo de investigación se sugieren los siguientes proyectos:

- ) Ampliar la descripción de situaciones reales a través del uso de otras variantes no consideradas en el presente trabajo.
- ) Desarrollar métodos que validen los casos de prueba presentados en la comunidad científica, para comparar el desempeño de la metodología desarrollada con lo reportado en otros trabajos de investigación.
- ) Desarrollar un mecanismo heurístico que permita la consecución simultánea de diversos objetivos planteados para definir una solución óptima, entre ellos: minimizar el número de vehículos y minimizar el costo total de los recorridos realizados por los vehículos.
- ) Incorporar un análisis del problema clásico de empaquetado (BPP, BinPacking Problem) para la solución de la tarea de configuración de carga de RoSLoP, con el propósito de mejorar el mecanismo de solución empleado actualmente, el cual se basa en el conocimiento que el usuario experto tiene del problema.
- ) Desarrollar un mecanismo para usar los espacios de los contenedores que quedarán disponibles después de la asignación de cargas. En estos espacios se pueden acomodar los productos que no fueron acomodados por violar restricciones de colocación.

# Contenido

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación	2
1.2.1 Vehicle Routing Problem (VRP)	3
1.2.2 Bin-Packing Problem (BPP)	3
1.2.3 Routing-Scheduling-Loading Problem (RoSLoP)	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Justificación	5
1.6 Organización del Documento	6
Capítulo 2. Marco Teórico	8
2.1 El Problema de la Asignación de Rutas a Vehículos (VRP)	8
2.2 Variantes VRP	9
2.2.1 VRP Capacitado	9
2.2.2 VRP Abierto	9
2.2.3 VRP con más de un Almacén	9
2.2.4 VRP con Múltiple uso de Vehículos	10
2.2.5 VRP con Flotilla Heterogénea	10
2.2.6 VRP Periódico	10
2.2.7 VRP con Entrega y Devolución de Bienes	11
2.2.8 VRP con Ventanas de Tiempo	11
2.2.9 VRP con Partición y Entrega	12
2.2.10 VRP con Dependencia de Sitio	12
2.2.11 VRP Dinámico	12
2.2.12 VRP Estocástico	12
2.3 El Problema de Transporte	13
2.4 El Problema de Transporte en una Embotelladora de Productos	16
2.4.1 Definición y Asignación de Rutas en una Embotelladora de Productos	16
2.4.2 Asignación de Horarios en una Embotelladora de Productos	21
2.4.3 La Distribución de Carga en una Embotelladora de Productos	22
2.5 Complejidad del Problema de Transporte	28
2.5.1 Teoría de NP-Completez	28
2.5.2 Complejidad del Enrutamiento	29
2.5.3 Complejidad de la Programación de Horarios y Carga de Vehículos	30
Capítulo 3. Estado del Arte	32
3.1 Problemas de Optimización involucrados	32
3.2 Trabajos relacionados con VRP	33
3.3 Software Comercial Afín	34
3.4 Análisis de Trabajos Relacionados	36

Capítulo 4. Modelo de Programación Lineal Entera para Asignación de Rutas	38
4.1 Trabajos Relacionados	38
4.2 Agentes y Eventos	39
4.3 Parámetros y Variables	40
4.4 Función Objetivo	42
4.5 Restricciones	42
Capítulo 5. Metodología de Solución	49
5.1 Fases de la Metodología de Solución	49
5.2 Sistema de Colonia de Hormigas (ACS)	51
5.2.1 Análisis del Problema BPVRP resuelto por ACS	52
5.2.2 Algoritmo	56
5.2.3 El proceso de Construcción de Soluciones	58
5.3 Algoritmo DiPro	60
5.4 Conversión de Horario	62
Capítulo 6. Experimentación	64
6.1 Descripción de la Cama de Prueba	64
6.1.1 Sistema de Transportación	64
6.1.2 Implantación del Sistema de Transportación	66
6.1.3 Descripción General de Casos de Prueba y su Complejidad	67
6.1.4 Casos de Prueba del Sistema de Transportación	69
6.1.5 Obtención de Casos de Prueba	70
6.1.5.1 Descripción de la Base de Datos de una Embotelladora	70
6.1.5.2 Descripción del Archivo Plano de Entrada	78
6.1.6 Descripción de la Salida del Sistema	81
6.2 Experimento 1: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra el algoritmo del Vecino más Cercano	82
6.2.1 Hipótesis	82
6.2.2 Casos de Prueba	83
6.2.3 Condiciones del Experimento	84
6.2.4 Resultados Experimentales	84
6.2.5 Análisis de Resultados	86
6.3 Experimento 2: Comparación del Sistema de Transporte Basado en Heurísticos contra la Solución Manual.	88
6.3.1 Hipótesis	88
6.3.2 Casos de Prueba	89
6.3.3 Condiciones del Experimento	89
6.3.4 Resultados Experimentales	89
6.3.5 Análisis de Resultados	89
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros	91
7.1 Conclusiones	91
7.2 Trabajos Futuros	94
Anexo A	95
Anexo B	101
Referencias Bibliográficas	117





# Anexo A

## Generación de Casos de Prueba

---

Dentro de este anexo se muestra la forma de obtener los valores que acompañan cada etiqueta que conforma el archivo plano de entrada para el sistema TSHA. Se muestran las etiquetas cuya información se obtuvo de la base de datos de la compañía EMPRO.

**NUM\_VISITS:**  $\{int\}$ . Es el número de clientes. El valor de esta etiqueta será igual al total de pares diferentes (*EmpresaDestino, SucursalDestino*) que se encuentra en la Tabla a1, donde cada par (*EmpresaDestino, SucursalDestino*) representa un cliente con un pedido a satisfacer de EMPRO.

**NUM\_DEPOTS:**  $\{int\}$ . Es el número de almacenes. El valor de esta etiqueta es igual al número de pares diferentes (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*) de la Tabla a1, donde cada par (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*) representa el almacén a quien el cliente (*EmpresaDestino, SucursalDestino*), mostrado en la misma tabla, le está solicitando el pedido.

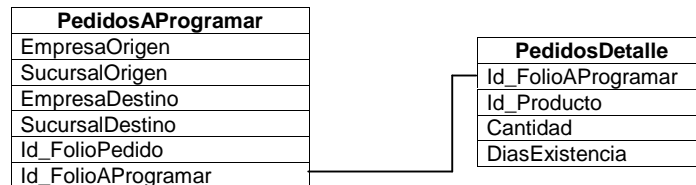
**NUM\_LOCATIONS:**  $\{int\}$ . Es el número de localidades. Se contabiliza sumando los valores obtenidos para NUM\_VISITS y NUM\_DEPOTS.

**DEPOTS**  $\{depot-id\}$  ... Para poder identificar los almacenes se hace uso de la Figura a1. Los almacenes que participen en el caso que se está definiendo serán aquellos identificados por el par (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*) dentro de la misma tabla.

PedidosAProgramar
EmpresaOrigen
SucursalOrigen
EmpresaDestino
SucursalDestino
Id_FolioPedido
Id_FolioAProgramar

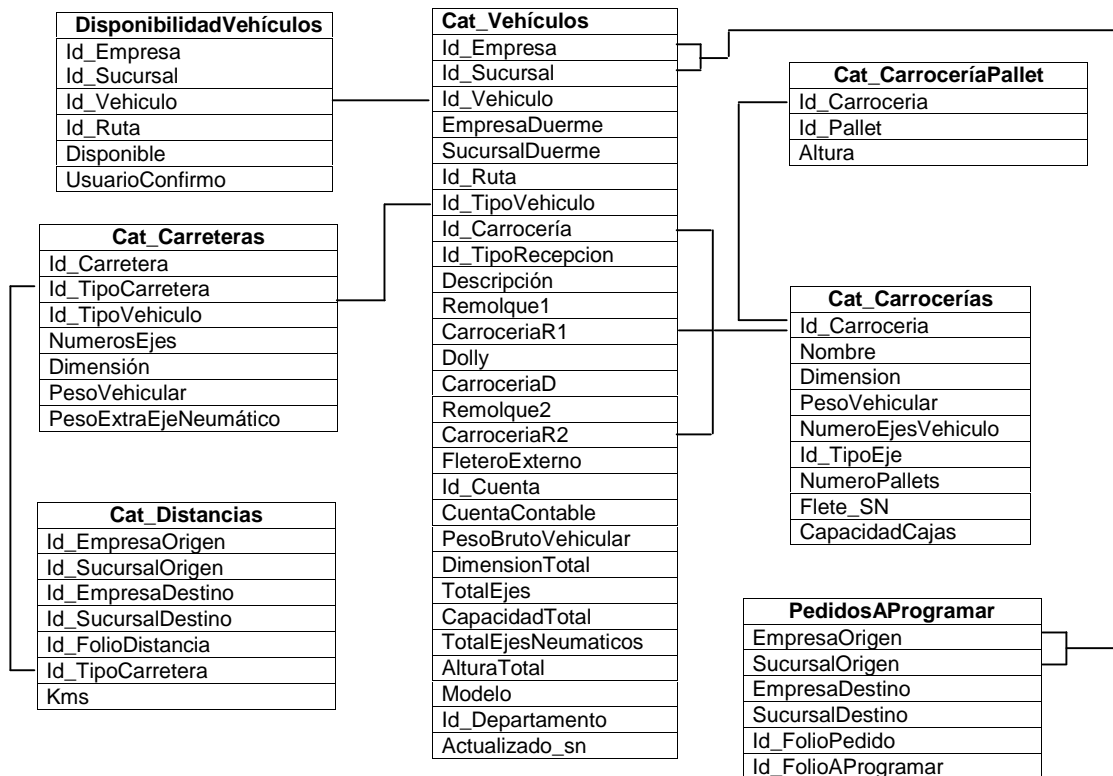
**Figura a1.** Tabla para determinar el número de clientes del caso de prueba.

**DEMAND\_SECTION** {*visit-id*} {*quantity-1*} [{*quantity-2*}...]. -1. Las demandas de cada cliente (*visit-id*) se obtienen a partir de la relación que se muestra en la Figura a2. En dicha figura se muestran dos tablas de la base de datos EMPRO: *PedidosAProgramar* contiene la relación de todos los pedidos de los clientes, cada pedido diferente se identifica por el campo *Id\_FolioAProgramar*; *PedidosDetalle* mantiene los detalles de *Id\_FolioAProgramar*, es decir, precisa cuántas cajas de cada producto se requieren.



**Figura a2.** Relación de Tablas de la Base de Datos EMPRO para calcular demanda de los clientes.

**VEHICLE\_CAPACITY\_SECTION** {*vehicle-id*} {*capacity-1*} [{*capacity-2*}...]. La capacidad de un vehículo se mide de dos formas, a través de la altura de cada uno sus contenedores y mediante el peso que puede soportar el vehículo; esta información se obtiene a través de la tablas mostradas en la Figura a3. La altura de los contenedores se pasa como parámetro al sistema, en archivo plano solo aparece el número de ellos.

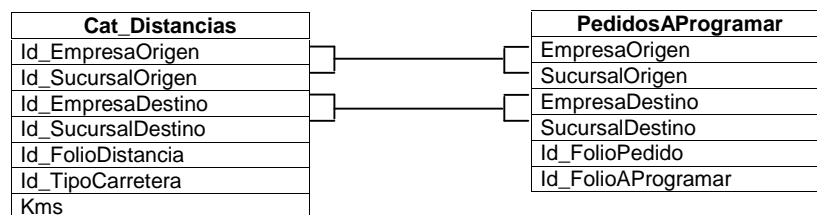


**Figura a3.** Relación de tablas que permiten calcular las capacidades de un vehículo.

Los vehículos *Id\_Vehiculo* están asociados a cada almacén representado por el par (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*) en la tabla *PedidosAProgramar*. Un vehículo que puede utilizarse, para resolver el caso RoSLoP que se está construyendo, estará indicado en la tabla *DisponibilidadVehiculos* al marcar el campo *Disponible* con el valor de 1 (de lo contrario tendrá el valor 0). Cada vehículo puede contener hasta tres carrocerías: *Id\_Carroceria, CarroceriaR1, CarroceriaR2*. Cada carrocería contiene un número determinado de contenedores especificado en *Cat\_CarroceríaPallet* que al sumarse proporcionará el número de contenedores mostrado en el archivo plano. También de esta relación se obtiene la altura especificada de cada pallet.

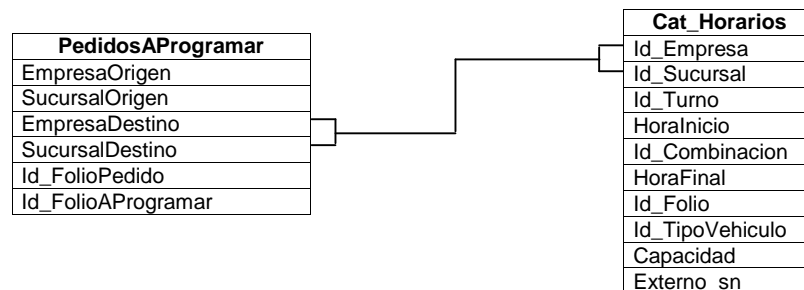
Por otro lado, otro dato importante que se obtiene de la relación mostrada en la Figura a3 es el peso soportado de los vehículos; éste dependerá de la red de carreteras que unen las distintas localidades que forman el caso de prueba (especificada en *Cat\_Distancias*). La tabla *Cat\_Carreteras* contiene el *PesoVehicular* que soporta de acuerdo a un tipo de carretera especificado (*Id\_TipoCarretera*) y al tipo de vehículo que la transite (*TipoVehiculo*). Al peso vehicular soportado se le añade un peso extra (obtenido del campo *PesoExtraEjeNeumático* de la tabla *Cat\_Carreteras*) por cada eje neumático que posea el vehículo (campo *TotalEjesNeumáticos* de la tabla *Cat\_Vehiculos*).

**EDGE\_WEIGHT\_SECTION.** Es el eje de carreteras, el cual se especifica a través de la relación mostrada en la Figura a4. En esta relación la tabla *PedidosAProgramar* contiene la relación de todos los clientes y almacenes del caso, de la tabla *Cat\_Distancia* por lo tanto se toman únicamente los caminos que involucren la conexión de estos clientes ignorándose aquellas localidades que no participen en el caso actual.



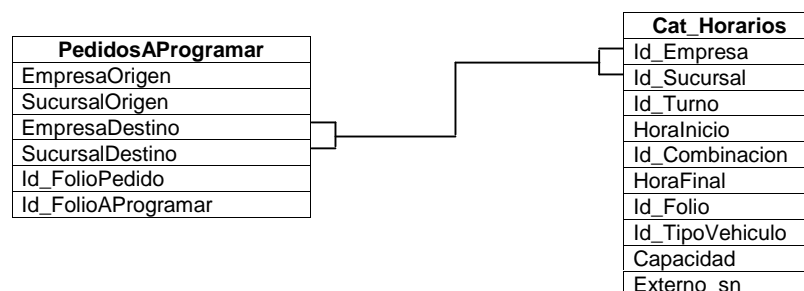
**Figura a4.** Relación que muestra las tablas a partir de las cuales se obtiene la matriz de conexión.

**TIME\_WINDOW\_SECTION** {*visit-id*} {*early-1*} {*late-1*} ... -1. Esta sección contiene los horarios de atención de los clientes. Para construirla se utiliza la relación de tablas mostrada en la Figura a5. En esta relación la tabla *PedidosAProgramar* proporciona el cliente (*EmpresaDestino*, *SucursalDestino*) y la tabla *Cat\_Horarios* los Horarios de Inicio (campo *HorarioInicio*)y Fin (campo *HorarioFinal*) dentro los cuales puede ser atendido.



**Figura a5.** Relación que especifica las ventanas de tiempo para los clientes.

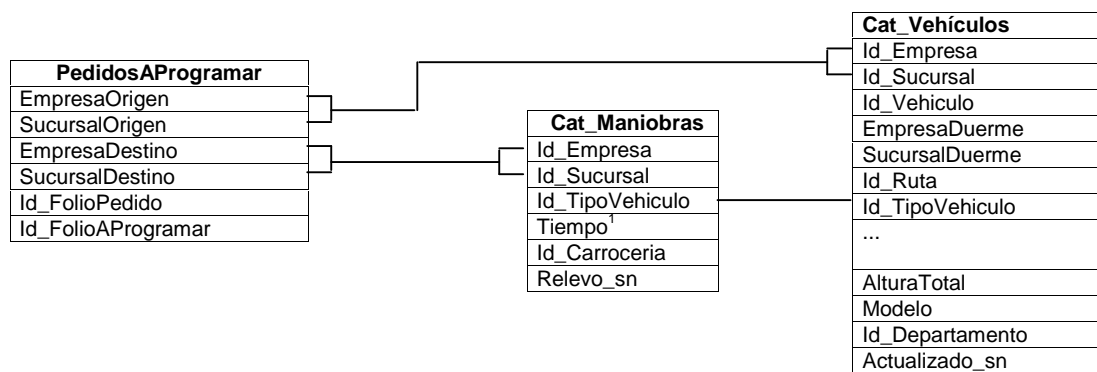
**DEPOT\_TIME\_WINDOW\_SECTION** {*depot-id*} {*early*} {*late*}. Al igual que las ventanas de tiempo de los clientes, las ventanas de tiempo para los almacenes usan las tablas *PedidosAProgramar* y *Cat\_Horarios*, la diferencia radica en que en este caso el almacén se especifica por el par (*EmpresaOrigen*, *SucursalOrgien*). Su horario de atención se especifica en *Cat\_Horarios* por lo campos *HorarioInicio* y *HorarioFinal* indicando entrada y salida, respectivamente. La Figura a6 muestra la relación de las tablas involucradas.



**Figura a6.** Relación que especifica las ventanas de tiempo para los almacenes.

**VEH\_TIME\_WINDOW\_SECTION** {*vehicle-id*} {*early-1*} {*late-1*} ... -1. Las ventanas de servicio de cada vehículo es igual a la ventana de atención del almacén al que pertenece.

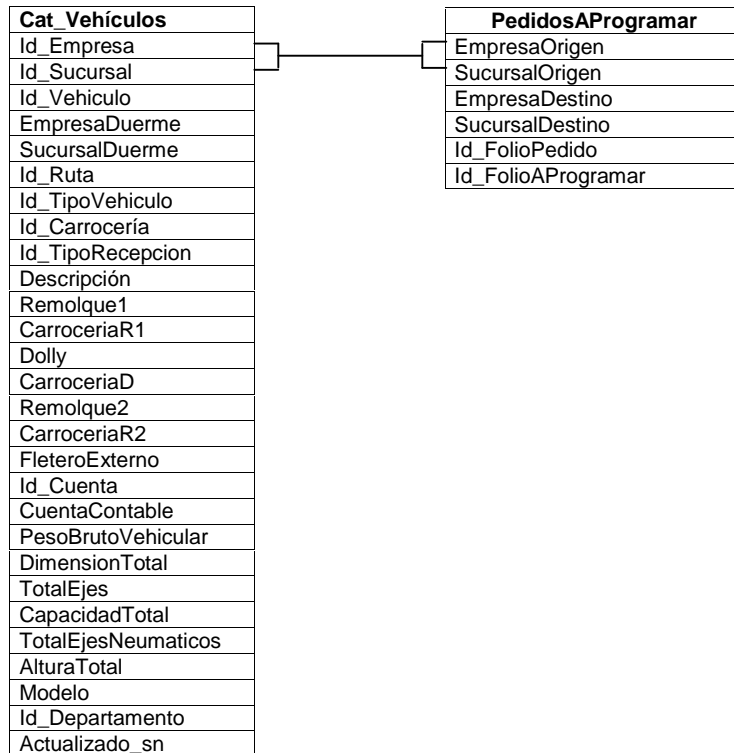
**DURATION\_BY\_VEH\_SECTION** {*visit-id*} {*veh-1-id*} {*duration-1*} {*veh-2-id*} {*duration-2*}... -1. Especifica el tiempo de maniobra de cada vehículo en cada localidad. La tabla *PedidosAProgramar* especifica los vehículos a emplear al identificar los almacenes, par (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*); hay que recordar que cada almacén posee una flotilla propia. Además, la tabla *PedidosAProgramar* también especifica los clientes por medio del par (*EmpresaDestino, SucursalDestino*). Cada tipo diferente de vehículo es asociado con los clientes en la tabla *Cat\_Maniobras* para obtener el tiempo de maniobra en esa localidad (campo *Tiempo*).



**Figura a7.** Relación para determinar el tiempo de maniobra de cada vehículo por localidad.

**DEPOT\_COMPAT\_SECTION** {*visit-id*} {*depot-id*} {*sense*} ... -1. En esta etique se asocian cada demanda de los clientes a un almacén en especial. Para hacer esto se toma en cuenta la relación mostrada en la Figura a1. En esta relación la tabla *PedidosAProgramar* contiene dos pares (*cliente, almacén*) que asocian de forma explícita un pedido *Id\_FolioAProgramar* del cliente (*EmpresaDestino, SucursalDestino*) con el almacén (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*).

**VEH\_DEPOT\_SECTION** {*veh-id*} {*depot-id*} {*sense*} ... -1. Aquí se define a qué almacén pertenece cada vehículo que se puede emplear. Para ello se utiliza la relación mostrada en la Figura a8. En esta relación la tabla *Cat\_Vehículo* identifica un vehículo en particular *Id\_Vehiculo* que se asocia a una localidad (*Id\_Empresa, Id\_Sucursal*), la cual a su vez se asocia con un par (*EmpresaOrigen, SucursalOrigen*) de la tabla *PedidosAProgramar* que identifica un almacén perteneciente al caso.



**Figura a8.** Relación que asocia vehículos a almacenes.

**MAXIMUM\_ATTENTION\_CAPACITY\_SECTION** {visit-id} {max\_vehicle}. La capacidad de atención máxima es el tipo de vehículo más grande que se puede recibir. Para determinarlo se emplea las relaciones mostradas en las Figura a5 y a6, donde el campo *Id\_TipoVehiculo* proporciona este valor. Este valor es ordinal, es decir cualquier camión cuyo *Id\_TipoVehiculo* sea mayor al tipo especificado en la tabla *Cat\_Horarios* como resultado de la relación de la Figura a6 podrá ser recibido también por la localidad asociada.

**MAXIMUM\_VEHICLES\_NUMBER\_SECTION** {visit-id} {number}. Son el número de vehículos que se pueden atender en forma simultánea en una localidad. Las relaciones de las Figuras a5 y a6 determinan este valor. El campo *Capacidad* de la tabla *Cat\_Horarios* contiene su valor.

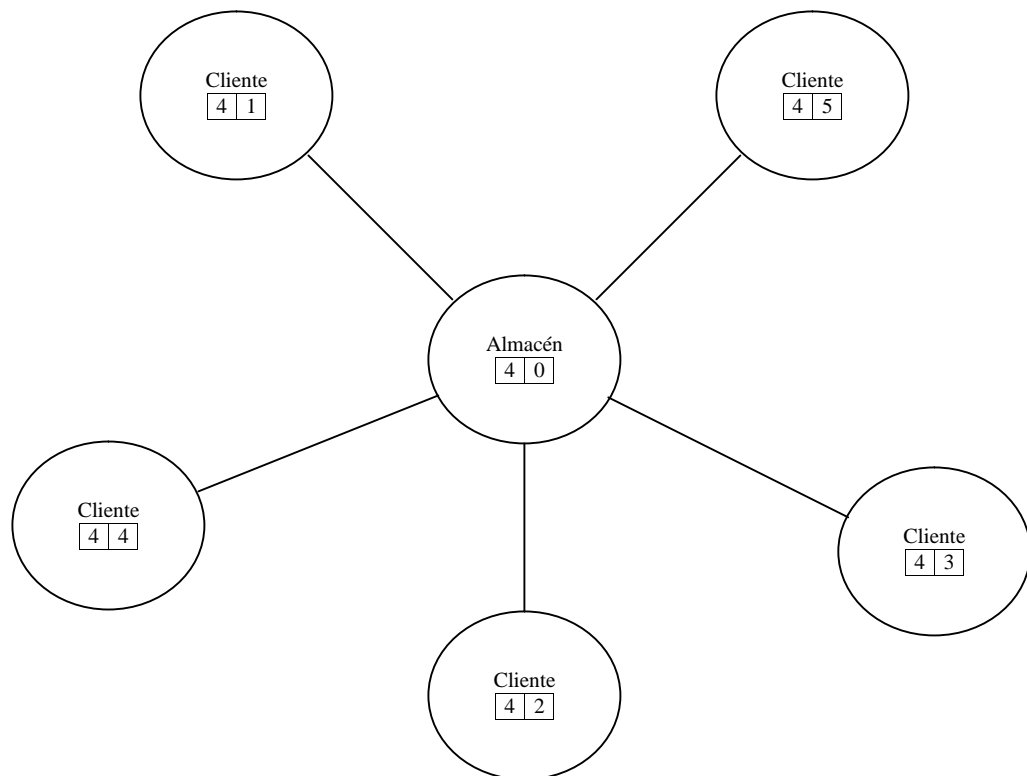
# Anexo B

## Ejemplo de un Caso de Prueba de RoSLoP

---

El propósito de este anexo es mostrar como se llenan las tablas de la base de datos de EMPRO para describir un caso de prueba que se pretende resolver. También se muestra la solución del caso proporcionada por el sistema TSHA.

El caso de estudio que se presenta es el caso de prueba número 27 (Caso 27), del día 10 de Agosto del 2005. Este caso pertenece a la compañía EMPRO, el esquema general de conexiones se presenta se muestra en la Figura b1.



**Figura b1.** Diagrama de conexiones entre los clientes y el almacén del Caso 27.

Como se puede observar en la Figura b1, el caso consta de cinco clientes y un almacén. Los clientes están conectados únicamente al almacén. A continuación se muestran los campos de las tablas de EMPRO que describen al caso 27.



La Tabla b1 muestra todos los pedidos de los clientes, los detalles de la cantidad de producto que se está pidiendo se especifica en la Tabla b2.

**Tabla b1.** Tabla *PedidosAProgramar* para el caso 27.

Id_FolioAProgramar	EmpresaOrigen	SucursalOrigen	EmpresaDestino	SucursalDestino	Id_FolioPedido
1344	4	0	4	1	26
1345	4	0	4	2	31
1346	4	0	4	3	24
1347	4	0	4	4	20
1348	4	0	4	5	24

**Tabla b2.** Tabla *PedidosDetalle* para el caso 27.

(Parte a de la Tabla)			(Parte b de la Tabla)		
Id_FolioAProgramar	Id_Producto	Cantidad	Id_FolioAProgramar	Id_Producto	Cantidad
1344	4	96	1346	801	5
1344	5	60	1346	802	5
1344	12	350	1346	803	5
1344	23	88	1346	806	102
1344	24	30	1346	843	70
1344	44	44	1346	856	27
1344	95	44	1347	4	480
1344	97	6	1347	28	11
1344	99	52	1347	45	30
1344	101	44	1347	50	50
1344	123	200	1347	80	30
1344	126	50	1347	85	50
1344	127	50	1347	95	44
1344	146	52	1347	99	26
1344	176	50	1347	101	44
1344	203	52	1347	103	50
1344	806	102	1347	107	50
1344	858	27	1347	122	20
1345	4	96	1347	123	100
1345	5	60	1347	126	20
1345	10	240	1347	127	20
1345	12	100	1347	138	26
1345	23	44	1347	145	44
1345	95	22	1347	203	52
1345	101	44	1347	806	204
1345	102	60	1348	4	396
1345	103	30	1348	12	150
1345	108	22	1348	23	44
1345	123	550	1348	45	30
1345	176	56	1348	85	30
1345	806	102	1348	99	104
1345	858	27	1348	108	22
1345	860	27	1348	123	200
1346	4	144	1348	127	50
1346	10	120	1348	145	77
1346	11	15	1348	155	11
1346	12	200	1348	165	11
1346	23	132	1348	174	11
1346	50	30	1348	203	104
1346	96	30	1348	800	5
1346	99	52	1348	801	5
1346	101	33	1348	802	5
1346	123	160	1348	803	5
1346	126	50	1348	856	27
1346	127	50	1348	857	27
1346	157	15	1348	858	27
1346	800	5	1348	859	27

La Tabla b3 muestra qué vehículos están disponibles, la Tabla b4 proporciona propiedades de estos vehículos como: a qué empresa pertenece, peso bruto vehicular, entre otras, que aparecen en la tabla *Cat\_Vehiculos*.

**Tabla b3.** Tabla *DisponibilidadVehiculos* para el caso 27

Id_Empresa	Id_Sucursal	Id_Vehiculo	Disponibilidad
4	0	1000	0
4	0	1001	1
4	0	1002	1
4	0	1003	1
4	0	1004	1
4	0	1005	1
4	0	1007	1
4	0	1008	1
4	0	1009	0
4	0	1010	1

**Tabla b4.** Tabla *Cat\_Vehiculos* para el caso 27

Id_Empresa	Id_Sucursal	Id_Vehiculo	Id_TipoVehiculo	Id_Carrocería	CarroceriaR1	CarroceriaR2	PesoBrutoVehicular
4	0	1001	41	20	34	0	19780
4	0	1002	41	20	7	0	18780
4	0	1003	41	20	35	0	19780
4	0	1004	41	20	10	0	20360
4	0	1005	41	20	10	0	20050
4	0	1007	41	20	10	0	18990
4	0	1008	41	10	10	0	20360
4	0	1009	42	25	0	0	0
4	0	1010	41	20	10	0	19780

La Tabla b5 muestra la matriz de conexiones, mientras que la tabla b6 las condiciones de peso de carreteras. La Tabla b7 proporciona el tiempo de viaje entre localidades.

**Tabla b5.** Tabla *Cat\_Distancias* para el caso 27.

EmpresaOrigen	SucursalOrigen	EmpresaDestino	SucursalDestino	Id_FolioDistancia	Id_TipoCarretera
4	0	4	1	1	1
4	0	4	2	2	1
4	0	4	3	3	1
4	0	4	4	4	1
4	0	4	5	5	1

**Tabla b6.** Tabla *Cat\_Carreteras* para el caso 27.

Id_Carretera	Id_TipoCarretera	Id_TipoVehiculo	PesoVehicular	PesoExtraEjeNeumatico
2	1	41	48500	0
4	1	42	26000	0

**Tabla b7.** Tabla *Cat\_DistanciaTiempo* para el caso 27.

Id_FolioDistancia	Id_TipoVehiculo	Tiempo
1	41	1.50
2	41	3.30
3	41	3.30
4	41	1.30
5	41	1.30

La Tabla b8 muestra todas las distintas carrocerías asociadas a los vehículos disponibles, la Tabla b9 contiene el número de carrocerías por vehículos y las dimensiones de cada una de ellas. Si no se encontrase un *Id\_Carrocería* en la especificación del tamaño de una carrocería, que se encuentra en la Tabla b9, el sistema toma como cero el valor de su altura.

**Tabla b8.** Tabla *Id\_Carrocería* para el caso 27.

Id_Carrocería
7
10
20
25
34
35

**Tabla b9.** Tabla *Cat\_CarroceríasPallet* para el caso 27.

(Parte a de la Tabla)			(Parte b de la Tabla)		
Id_Carrocería	Id_Pallet	Altura	Id_Carrocería	Id_Pallet	Altura
7	1	2.40	34	1	2.43
7	2	2.40	34	2	2.43
7	3	3.16	34	3	3.20
7	4	3.16	34	4	3.20
7	5	2.66	34	5	3.20
7	6	2.66	34	6	2.70
7	7	2.66	34	7	2.70
7	8	2.66	34	8	2.70
7	9	2.66	34	9	2.70
7	10	2.66	34	10	2.70
7	11	3.16	34	11	2.70
7	12	3.16	34	12	3.20
7	13	2.40	34	13	3.20
7	14	2.40	34	14	3.20
10	1	2.58	34	15	2.43
10	2	2.58	34	16	2.43
10	3	3.03	35	1	2.35
10	4	3.03	35	2	2.35
10	5	3.03	35	3	2.75
10	6	3.03	35	4	2.75
10	7	3.03	35	5	2.75
10	8	3.03	35	6	2.75
10	9	3.03	35	7	2.75
10	10	3.03	35	8	2.75
10	11	3.03	35	9	2.75
10	12	3.03	35	10	2.75
10	13	3.03	35	11	2.75
10	14	3.03	35	12	2.75
10	15	2.58	35	13	2.35
10	16	2.58	35	14	2.35

En la Tabla b10 se muestran los tiempos de carga y descarga de los vehículos en los clientes, mientras que la Tabla b11 muestra las ventanas de tiempos de los clientes y almacenes.

**Tabla b10.** Tabla *Cat\_Maniobras* para el caso 27.

Id_Empresa	Id_Sucursal	Id_TipoVehiculo	Tiempo
4	0	41	1.20
4	1	41	1.25
4	2	41	1.30
4	3	41	1.45
4	4	41	1.25
4	5	41	1.40
4	6	41	1.30
4	7	41	1.20

**Tabla b11.** Tabla *Cat\_Horarios* para el caso 27.

Id_Empresa	Id_Sucursal	Id_Turno	HoraInicio	HoraFinal	Id_TipoVehiculo	Capacidad
4	0	1	07.00	20.30	41	3
4	1	1	07.00	17.00	41	1
4	2	1	07.00	17.00	41	1
4	3	1	08.30	17.00	41	1
4	4	1	07.00	17.00	41	1
4	5	1	07.00	17.00	41	1
4	6	1	07.30	17.00	41	1
4	7	1	08.00	17.00	41	1
6	1	1	7.00	14	41	1
6	8	1	7	14	41	1
6	9	1	7	14	41	1

Con esta información, el archivo plano resultante contiene la siguiente información:

```

VRPTEST 1
NAME: BD000X
COMMENT: Caso de Prueba 27 de la Base de Datos EMPRO
NUM_VISITS: 10
NUM_DEPOTS: 1
NUM_VEHICLES: 8
NUM_LOCATIONS: 11
MAX_TIME: 1440
DATA_SECTION
DEPOTS
1
DEMAND_SECTION
1 -1
2 1397 -1
3 1480 -1
4 1250 -1
5 1351 -1
6 1368 -1
7 -1
8 -1
9 -1
10 -1
11 -1
VEHICLE_CAPACITY_SECTION
1 16
2 14
3 14
4 16

```

```

5 16
6 16
7 16
8 16
VEHICLE_COST_SECTION
1 1.0
2 1.0
3 1.0
4 1.0
5 1.0
6 1.0
7 1.0
8 1.0
EDGE_WEIGHT_SECTION
1 1 2 110
1 1 3 210
1 1 4 210
1 1 5 90
1 1 6 90
1 1 7 150
1 1 8 160
1 1 9 300
1 1 10 300
1 1 11 120
1 2 1 110
1 3 1 210
1 4 1 210
1 5 1 90
1 6 1 100
1 7 1 150
1 8 1 160
1 9 1 300
1 10 1 300
1 11 1 120
-1
2 1 2 110
2 1 3 210
2 1 4 210
2 1 5 90
2 1 6 90
2 1 7 150
2 1 8 160
2 1 9 300
2 1 10 300
2 1 11 120
2 2 1 110
2 3 1 210
2 4 1 210
2 5 1 90
2 6 1 100
2 7 1 150
2 8 1 160
2 9 1 300
2 10 1 300
2 11 1 120
-1
3 1 2 110
3 1 3 210
3 1 4 210
3 1 5 90
3 1 6 90
3 1 7 150
3 1 8 160
3 1 9 300
3 1 10 300
3 1 11 120
3 2 1 110
3 3 1 210
3 4 1 210

```

3	5	1	90
3	6	1	100
3	7	1	150
3	8	1	160
3	9	1	300
3	10	1	300
3	11	1	120
-1			
4	1	2	110
4	1	3	210
4	1	4	210
4	1	5	90
4	1	6	90
4	1	7	150
4	1	8	160
4	1	9	300
4	1	10	300
4	1	11	120
4	2	1	110
4	3	1	210
4	4	1	210
4	5	1	90
4	6	1	100
4	7	1	150
4	8	1	160
4	9	1	300
4	10	1	300
4	11	1	120
-1			
5	1	2	110
5	1	3	210
5	1	4	210
5	1	5	90
5	1	6	90
5	1	7	150
5	1	8	160
5	1	9	300
5	1	10	300
5	1	11	120
5	2	1	110
5	3	1	210
5	4	1	210
5	5	1	90
5	6	1	100
5	7	1	150
5	8	1	160
5	9	1	300
5	10	1	300
5	11	1	120
-1			
6	1	2	110
6	1	3	210
6	1	4	210
6	1	5	90
6	1	6	90
6	1	7	150
6	1	8	160
6	1	9	300
6	1	10	300
6	1	11	120
6	2	1	110
6	3	1	210
6	4	1	210
6	5	1	90
6	6	1	100
6	7	1	150
6	8	1	160
6	9	1	300
6	10	1	300
6	11	1	120

```

-1
|
| 7 1 2 110
| 7 1 3 210
| 7 1 4 210
| 7 1 5 90
| 7 1 6 90
| 7 1 7 150
| 7 1 8 160
| 7 1 9 300
| 7 1 10 300
| 7 1 11 120
| 7 2 1 110
| 7 3 1 210
| 7 4 1 210
| 7 5 1 90
| 7 6 1 100
| 7 7 1 150
| 7 8 1 160
| 7 9 1 300
| 7 10 1 300
| 7 11 1 120
-1
|
| 8 1 2 110
| 8 1 3 210
| 8 1 4 210
| 8 1 5 90
| 8 1 6 90
| 8 1 7 150
| 8 1 8 160
| 8 1 9 300
| 8 1 10 300
| 8 1 11 120
| 8 2 1 110
| 8 3 1 210
| 8 4 1 210
| 8 5 1 90
| 8 6 1 100
| 8 7 1 150
| 8 8 1 160
| 8 9 1 300
| 8 10 1 300
| 8 11 1 120
-1
|
| TIME_WINDOW_SECTION
| 2 420 1020 -1
| 3 420 1020 -1
| 4 510 1020 -1
| 5 420 1020 -1
| 6 420 1020 -1
| 7 449 1020 -1
| 8 480 1020 -1
| 9 420 840 -1
| 10 420 840 -1
| 11 0 0 -1
|
| DEPOT_TIME_WINDOW_SECTION
| 1 420 1230 -1
|
| VEHICLE_TIME_WINDOW_SECTION
| 1 420 1230 -1
| 2 420 1230 -1
| 3 420 1230 -1
| 4 420 1230 -1
| 5 420 1230 -1
| 6 420 1230 -1
| 7 420 1230 -1
| 8 420 1230 -1
|
| DURATION_BY_VEH_SECTION
| 1

```

	1	80
	2	80
	3	80
	4	80
	5	80
	6	80
	7	80
	8	80
		-1
	2	
	1	85
	2	85
	3	85
	4	85
	5	85
	6	85
	7	85
	8	85
		-1
	3	
	1	90
	2	90
	3	90
	4	90
	5	90
	6	90
	7	90
	8	90
		-1
	4	
	1	105
	2	105
	3	105
	4	105
	5	105
	6	105
	7	105
	8	105
		-1
	5	
	1	85
	2	85
	3	85
	4	85
	5	85
	6	85
	7	85
	8	85
		-1
	6	
	1	100
	2	100
	3	100
	4	100
	5	100
	6	100
	7	100
	8	100
		-1
	7	
	1	90
	2	90
	3	90
	4	90
	5	90
	6	90
	7	90



8	90
	-1
8	
1	80
2	80
3	80
4	80
5	80
6	80
7	80
8	80
	-1
9	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
	-1
10	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
	-1
11	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
	-1
DEPOT_COMPAT_SECTION	
1	-1
2	1 -1
3	1 -1
4	1 -1
5	1 -1
6	1 -1
7	-1
8	-1
9	-1
10	-1
11	-1
VEH_DEPOT_SECTION	
1	1 -1
2	1 -1
3	1 -1
4	1 -1
5	1 -1
6	1 -1
7	1 -1
8	1 -1
MAXIMUM_ATTENTION_CAPACITY_SECTION	
1	41
2	41

3	41
4	41
5	41
6	41
7	41
8	41
9	41
10	41
11	0
MAXIMUM_VEHICLES_NUMBER_SECTION	
1	3
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	0

Con la información proveniente de las tablas y la del archivo plano, el sistema está listo para resolver el caso de prueba 27. Una vez que TSHA a encontrado la solución la escribe en las Tablas b12 y b13. La Tabla b12 contiene la relación de las visitas a los clientes por los camiones, mientras que la Tabla b13 contiene el detalle de la carga de cada visita.

**Tabla b12.** Tabla *ProgFleteros* para el caso 27.

Id_FolioProgramacion	Id_Vehiculo	EmpOrigen	SucursalOrigen	EmpDestino	SucursalDestino	FechaSalida	FechaLlegada
2	1001	4	4	4	0	08:25:00.000	09:55:00.000
4	1004	4	5	4	0	08:40:00.000	10:20:00.000
6	1005	4	5	4	0	10:21:00.000	12:01:00.000
8	1007	4	1	4	0	08:25:00.000	10:15:00.000
10	1008	4	2	4	0	08:30:00.000	12:00:00.000
12	1010	4	2	4	0	10:01:00.000	13:31:00.000
14	1002	4	3	4	0	10:15:00.000	13:45:00.000
16	1003	4	3	4	0	12:01:00.000	15:31:00.000
7	1007	4	0	4	1	05:10:00.000	07:00:00.000
11	1010	4	0	4	2	05:01:00.000	08:31:00.000
9	1008	4	0	4	2	03:30:00.000	07:00:00.000
15	1003	4	0	4	3	06:46:00.000	10:16:00.000
13	1002	4	0	4	3	05:00:00.000	08:30:00.000
1	1001	4	0	4	4	05:30:00.000	07:00:00.000
3	1004	4	0	4	5	05:20:00.000	07:00:00.000
5	1005	4	0	4	5	07:01:00.000	08:41:00.000

**Tabla b13.** Tabla *ProgFleterosDetalle* para el caso 27.

Id_FolioProgramacion	Id_Contenido	PalletProgramado	PosicionProgramada	TarimaCompleta
1	50	1	1	1
1	99	1	2	0
1	103	2	1	1
1	28	2	2	0
1	122	2	2	0
1	45	3	1	0
1	80	3	1	0
1	123	3	2	1
1	4	4	1	1
1	95	4	2	1
1	4	5	1	1

**Tabla b13.** Tabla *ProgFleterosDetalle* (Cont...)

Id_FolioProgramacion	Id_Contenido	PalletProgramado	PosicionProgramada	TarimaCompleta
1	806	5	2	1
1	4	6	1	1
1	4	7	1	1
1	4	8	1	1
1	806	9	1	1
1	4	10	1	1
1	4	11	1	1
1	4	12	1	1
1	4	13	1	1
1	203	13	2	1
1	4	14	1	1
1	101	14	2	1
1	107	15	1	1
1	123	15	2	1
1	85	16	1	1
1	145	16	2	0
1	95	6	2	0
1	101	6	2	0
1	126	7	2	0
1	138	11	2	0
1	123	12	2	0
1	127	12	2	0
3	85	1	1	0
3	45	1	1	0
3	859	1	2	1
3	12	2	1	1
3	857	2	2	1
3	4	3	1	1
3	155	3	2	0
3	174	3	2	0
3	123	3	2	0
3	800	3	2	0
3	801	3	2	0
3	802	3	2	0
3	803	3	2	0
3	4	4	1	1
3	99	4	2	1
3	4	5	1	1
3	145	5	2	0
3	165	5	2	0
3	123	5	2	0
3	4	6	1	1
3	123	6	2	1
3	203	7	1	1
3	123	7	2	1
3	23	8	1	1
3	123	9	1	1
3	203	10	1	1
3	4	11	1	1
3	123	11	2	1
3	4	12	1	1
3	127	12	2	1
3	4	13	1	1
3	4	13	2	0
3	108	13	2	0
3	4	14	1	1
3	99	14	2	1
3	12	15	1	1
3	856	15	2	1
3	12	16	1	1
3	858	16	2	1
3	857	10	2	0
3	859	10	2	0
5	856	1	1	0
5	858	1	1	0
5	127	16	1	0

**Tabla b13.** Tabla *ProgFleterosDetalle* (Cont...)

Id_FolioProgramacion	Id_Contenido	PalletProgramado	PosicionProgramada	TarimaCompleta
7	12	1	1	1
7	858	1	2	1
7	12	2	1	1
7	146	2	2	1
7	12	3	1	1
7	127	3	2	1
7	12	4	1	1
7	123	4	2	1
7	4	5	1	1
7	123	5	2	1
7	97	6	1	0
7	176	6	1	0
7	5	6	2	1
7	23	7	1	1
7	44	8	1	1
7	95	9	1	1
7	23	10	1	1
7	203	11	1	1
7	101	11	2	1
7	806	12	1	1
7	123	12	2	1
7	4	13	1	1
7	123	13	2	1
7	12	14	1	1
7	126	14	2	1
7	12	15	1	1
7	99	15	2	1
7	12	16	1	1
7	24	16	2	0
7	99	7	2	0
7	146	7	2	0
7	101	8	2	0
7	123	10	2	0
7	858	9	2	0
9	12	1	1	1
9	860	1	2	1
9	10	2	1	1
9	103	2	2	0
9	10	3	1	1
9	123	3	2	1
9	102	4	1	1
9	123	4	2	1
9	4	5	1	1
9	123	5	2	1
9	176	6	1	1
9	123	6	2	1
9	23	7	1	1
9	123	7	2	1
9	5	8	1	1
9	123	9	1	1
9	101	10	1	1
9	95	11	1	0
9	108	11	1	0
9	123	11	2	1
9	806	12	1	1
9	123	12	2	1
9	4	13	1	1
9	123	13	2	1
9	10	14	1	1
9	123	14	2	1
9	10	15	1	1
9	123	15	2	1
9	12	16	1	1
9	858	16	2	1
9	123	8	2	0
9	123	10	2	1

**Tabla b13.** Tabla *ProgFleterosDetalle* (Cont...)

Id_FolioProgramacion	Id_Contenido	PalletProgramado	PosicionProgramada	TarimaCompleta
11	123	1	1	0
11	103	2	1	0
11	858	16	1	0
11	860	16	1	0
13	50	1	1	0
13	96	1	1	0
13	856	1	2	1
13	12	2	1	1
13	99	2	2	1
13	12	3	1	1
13	127	3	2	1
13	10	4	1	1
13	123	4	2	1
13	4	5	1	1
13	123	5	2	1
13	843	6	1	1
13	23	7	1	1
13	23	8	1	1
13	806	9	1	1
13	4	10	1	1
13	23	10	2	1
13	4	11	1	1
13	123	11	2	1
13	10	12	1	1
13	126	12	2	1
13	12	13	1	1
13	123	13	2	0
13	11	13	2	0
13	157	13	2	0
13	12	14	1	1
13	101	14	2	0
13	23	6	2	0
13	99	7	2	0
13	123	9	2	0
13	800	9	2	0
13	801	9	2	0
13	802	9	2	0
13	803	9	2	0
13	101	8	2	0
15	856	1	1	0

La información tanto de salida como de entrada del caso 27, presentada anteriormente a través de las tablas de la base de datos EMPRO y el archivo plano, se puede resumir a través de la Figuras b2 y b3. La Figura b2 muestra la descripción general del caso de entrada, mientras que la Figura b3 la solución del caso de prueba. Es importante mencionar que, en cualquier caso, los camiones están cargados al comienzo de la programación; debido a esto pueden empezar a trabajar desde cualquier localidad, ahorrándose los tiempo de carga y viaje de su primer viaje (p.e. la localidad 6 en un caso de prueba abre sus puertas a las 8:00 a.m.; si el vehículo 1 fuese a realizar su primer viaje a esa localidad, su hora de llegada sería a las 8:00 a.m.).

Almacenes							
Empresa	Sucursal	Vehículos Disponibles	Tiempo de Maniobra	Hora de Apertura	Hora de Cierre	Tipo de Vehículo mas grande que recibe	Número de Vehículos que puede atender al mismo tiempo
4	0	8	80 minutos	07:00	20:30	41	3

Clientes							
Empresa	Sucursal	Demanda	Tiempo de Maniobra	Hora de Apertura	Hora de Cierre	Tipo de Vehículo mas grande que recibe	Número de Vehículos que puede atender al mismo tiempo
4	1	1397	85 minutos	07:00	17:00	41	1
4	2	1480	90 minutos	07:00	17:00	41	1
4	3	1250	105 minutos	08:30	17:00	41	1
4	4	1351	85 minutos	07:00	17:00	41	1
4	5	1368	100 minutos	07:00	17:00	41	1

Vehículos							
Pertenece a		Identificador	Tipo de Vehículo	Numero de Pallets	Inicio Hora de Servicio	Fin Hora de Servicio	Peso Vehicular
Empresa	Sucursal						
4	0	1001	41	16	07:00	20:30	19780
4	0	1002	41	14	07:00	20:30	18780
4	0	1003	41	14	07:00	20:30	19780
4	0	1004	41	16	07:00	20:30	20360
4	0	1005	41	16	07:00	20:30	20050
4	0	1007	41	16	07:00	20:30	18990
4	0	1008	41	16	07:00	20:30	20360
4	0	1010	41	16	07:00	20:30	19780

Tiempo de Maniobra de las localidades			
Localidad		Tipo de Vehículo	Tiempo (minutos)
Empresa	Sucursal		
4	0	41	80
4	1	41	85
4	2	41	90
4	3	41	105
4	4	41	85
4	5	41	100

Tiempo de Viaje entre localidades (matriz de conexiones)					
Viaje Desde		Viaje Hasta		Tipo de Vehículo usado	Tiempo (minutos)
Empresa	Sucursal	Empresa	Sucursal		
4	0	4	1	41	110
4	0	4	2	41	210
4	0	4	3	41	210
4	0	4	4	41	90
4	0	4	5	41	90

Figura b2. Descripción general de la entrada del caso de prueba 27.

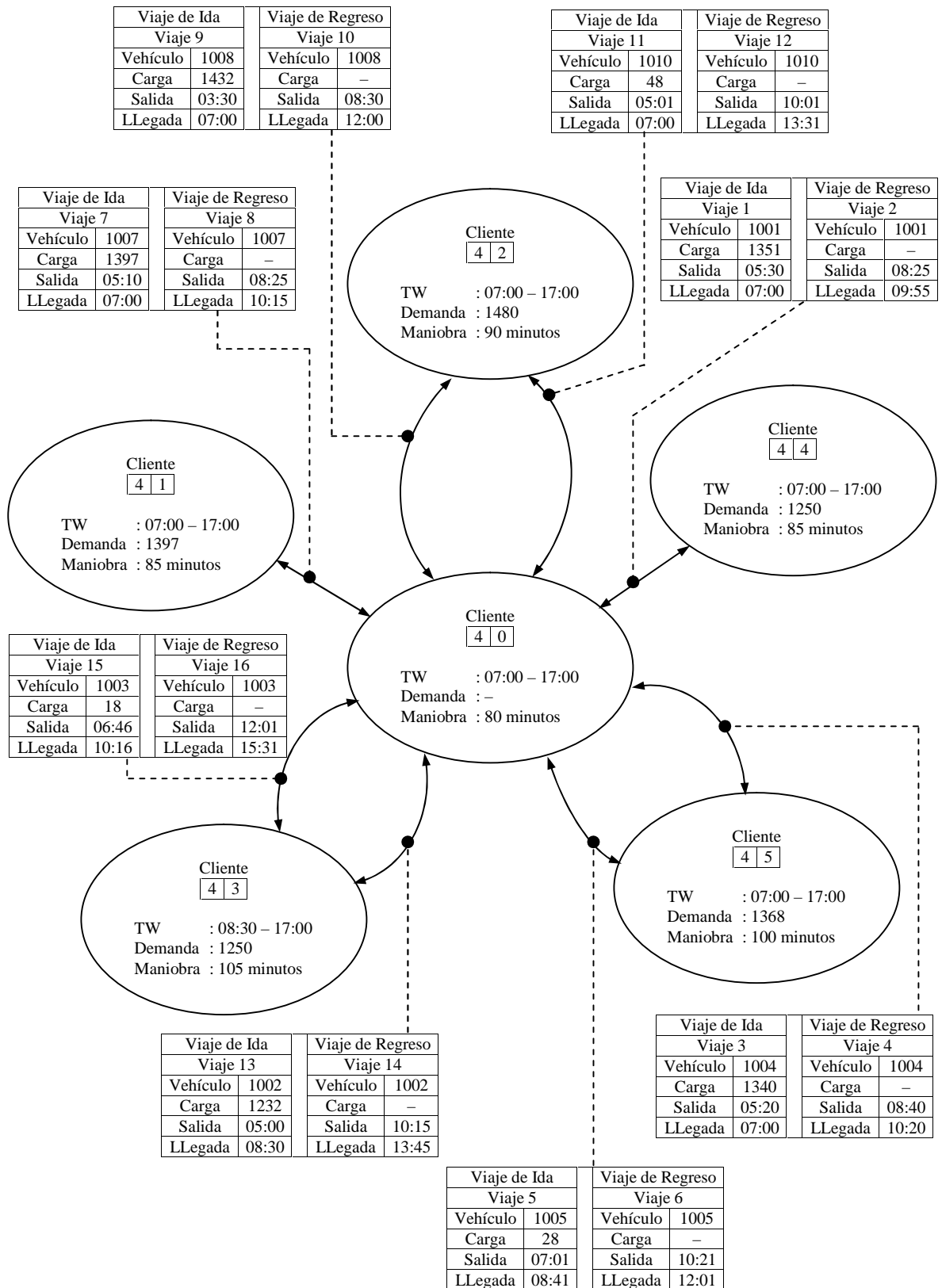


Figura b3. Solución al caso de prueba 27 dada por TSHA.

# Referencias Bibliográficas

---

- [Archetti, 2001] Archetti, C., Mansini, R., Speranza, M. *The Vehicle Routing Problem with capacity 2 and 3, General Distances and Multiple Customer visits*. ORP 2001, PARIS, SEPTEMBER 26-29. 2001.
- [Berger, 2001] Berger, J., Barkaoui, M., Bräysy, O. 2001. *A Parallel Hybrid Genetic Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*, Working Paper, Defence Research Establishment Valcartier, Canada.
- [Bianchi, 2000] Bianchi, Leonora. 2000. *Notes on Dynamic Vehicle Routing*. Technical Report IDSIA-05-01. IDSIA – Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Switzerland.
- [Blasum, 2002] Blasum, U., Hochstätter, W. *Application of the Branch and Cut Method to the Vehicle Routing Problem*. Universität zu Köln, BTU Cotbus. May 15, 2002.
- [Bräysy, 2001a] Bräysy, O. 2001. *A Reactive Variable Neighborhood Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Working paper, SINTEF Applied Mathematics, Department of Optimization, Norway.
- [Bräysy, 2001b] Bräysy, O., Gendreau, M. 2001. *Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Report, SINTEF Applied Mathematics, Department of Optimization, Norway.
- [Coffman 2002] Coffman, J.E.G., Courboubetis, C., Garey, M.R., Johnson, D.S., Shor, P.W., Weber, R.R.: *Perfect Packing Theorems and the Average Case Behavior of Optimal and Online Bin Packing*. SIAM Review Vol. 44 (2002) 95-108
- [Danzig, 1959] Dantzig, G. B., Ramser, J. H. *The truck dispatching problem*. Mgmt Sci. 6(1):80–91. 1959.



- [Donati, 2003] Donati, A., Roberto, M., Casagrande, N., Rizzoli, A., Gambardella, L. *Time Dependent Vehicle Routing Problem with a Multi Ant Colony System*. IDSIA. Switzerland. 2003.
- [Dondo, 2003] Dondo, R., Méndez, C.A. Cerdá, J. *An Optimizar approach to the Multiple-Depot Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Window and Capacity Constraints*. INTEC, Santa Fe, Arg., 2003.
- [Dorigo, 1996] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorini, A. *The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agent*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, part B, vol. 26, no. 1., 29-41, (1996).
- [Dorigo, 1997a] Dorigo, M., Gambardella, L.M., *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1997a. 53 – 56.
- [Dorigo, 1997b] Dorigo, M., Gambardella, L.M. *Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem*. BioSystems 43. 1997b. 73 – 81.
- [Dorransoro, 2005] Dorransoro, B. The VRP Web. AUREN. Language and Computation Sciences of the University of Málaga. March, 2005. <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/index.html?links.html>.
- [Dror, 1994] M. Dror, G. Laporte, P. Trudeau, "Vehicle routing with split deliveries", Discrete Appl. Math. 50, 239-254 (1994).
- [Feillet, 2002] Feillet, D. *Vehicle Routing with Time Windows and Split Deliveries*. Laboratoire d'Informatique d'Avignon, Université d'Avignon, France. 2002.
- [Fleischmann, 1990] Fleischmann, B., The Vehicle routing problem with multiple use of vehicles. Working paper, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Hamburg.
- [Gambardella, 1999] Gambardella, L., Tailliar, E., Agazzi, G. *MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows*. Technical Report IDSIA. IDSIA-06-99. Lugano, Switzerland. 1999.
- [Gambardella, 1996] Gambardella, L.M., Dorigo, M. *Solving Symmetric and Asymmetric TSPs by Ant Colonies*. Proceedings of the IEEE Conference of Evolutionary Computation. ICEC96, IEEE Press. 1996, 622 – 627.
- [Fleischmann, 1990] Fleischmann, B., The Vehicle routing problem with multiple use of vehicles. Working paper, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Universität Hamburg.
- [Garey, 1997] Garey, M. R., Johnson, D. S. *Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Editorial: W.H. Freeman and Company. 1997.

- [Gendreau, 1998] Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C., Taillar, E. *A Tabu Search Heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*. PERGAMON, Computer & Operations Research 26 (1999) 1153 – 1173. Received in Revised form on October 1998.
- [Gribkovskala, 2005] Gribkovskala, I., Halskau, Ø., Bugge, K., *Models for Pick-Up and Deliveries from Depots with Lasso Solutions.*, Molde Univesity College. 2005.
- [Hajri, 2003] Hajri-Gabouj, S., Darmoul, S. *A Hybrid Evolutionary Approach for a Vehicle Routing Problem with Double Time Windows for the Depot and Multiple Use of Vehicles*. INSAT, LARA. 2003.
- [Hall, 2004] Hall, R. *On the road to recovery*. ORMS Today. A publication of INFORMS. Agosto, 2000.
- [Hombberger, 1999] Hombberger, J., Gehring, H. 1999. *Two Evolutionary Meta-heuristics for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Infor. 37, 297–318.
- [Jin, 2004] Jin, T., Guo, S., Wang, F., Lim, A. DCS of Zhongshan University, China. DIEEM of Hong Kong University. 446-129. 2004.
- [Jong, 1996] Jong, C., Kant, G., Vliet, A. *On Finding Minimal Route Duration in the Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows*. ESPRIT Long Term Research Project 20244 (project ALCOM). 1996.
- [Marinakis, 2002] Marinakis, Y., Migdalas, A. *Combinatorial and Global Optimization, 1st Edition. World Scientific Publishing Company, Ch. Heuristic Solutions of Vehicle Routing Problems in Supply Chain Management*, ISBN: 9810248024. 2002.
- [Martello, 1990] Martello, S., Toth. P. *Knapsack Problems-Algorithms and Computer Implementations*. Wiley, Chichester, 1990.
- [Mingozzi, 2003] Mingozzi, A., Vallet, A. *An exact Algorithm for Period and Multi-Depot Vehicle Routing Problems*. Department of Mathematics, University of Bologna, Bolonga, Italy. 2003.
- [Pisinger, 2005] Pisinger, D., Ropke, S. *A general Heuristic for Vehicle Routing Problems*. DIKU, University of Copenhagen.. February 25<sup>th</sup>, 2005.
- [Ralphs, 2004] Ralphs, T., Kopman, L., Pulleyblank W., Trotter L. Jr. *On the Capacitated Vehicle Routing Problem*. NSF-Grant 9527124, Texas APT-Grant 97-3604-010. Revision. December 17, 2004.
- [Reimann, 2003] Reimann, M., Doerner, K., Hartl, R. *Analyzing a Unified Ant System for the VRP and some of Its Variants*. Institute of Management Science, University of Vienna, Vienna, Austria. 2003

- [Rochat, 1995] Rochat, Y., Taillard, É. D. 1995. *Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing*. Journal of Heuristics 1, 147-167.
- [Shaw, 1998] P. Shaw, Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems, *Proceedings of the Fourth International Luca Gambardella - IDSIA - MetaHeuristics Network – Vehicle Routing 40 Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP'98)*, M. Maher and J.-F. Puget (eds.), Springer-Verlag, 1998, 417-431.
- [Solomon,1987] Solomon, M., *Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints*. Operations Research, 35(2): 254 – 265, 1987.
- [Taillar, 1995] Taillar, E., Laport, G., Gendreau, M. *Vehicle Routing Problem with Multiple Use of Vehicles*. Centre de Recherche sur les transports. Publicación CRT-95-19. March, 1995.
- [Taillard, 1996] Taillard, E. *A Heuristic Column Generation Method For the Heterogeneous Fleet VRP*. Istituto Dalle Moli di Studi sull Inteligenza Artificiale, Switzerland. CRI-96-03. Mayo, 1996.
- [Taillard, 1997] Taillard, É. D., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J. Y. 1997. *A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows*. Transportation Science 31, 170-186.
- [Thangiah, 1994] Thangiah, S. R., Osman, I. H., Sun, T. 1994. *Hybrid Genetic Algorithm Simulated Annealing and Tabu Search Methods for Vehicle Routing Problem with Time Windows*. Technical Report 27, Computer Science Department, Slippery Rock University.
- [Thangiah, 2003] Thangiah, S. *A Site Dependent Vehicle Routing Problem with Complex Road Constraints*. Artificial Intelligence and Robotics Laboratory, Slippery Rock University, U.S.A. December 2003.
- [Toth, 2001] Toth P., Vigo D. *The Vehicle Routing Problem*. Monographs on Discrete Mathematics and Applications. SIAM, Philadelphia. 2001.

# Índice de Figuras

Figura 1.1	Ejemplo de definición de rutas en VRP .....	3
Figura 2.1	Problema VRP Clásico .....	8
Figura 2.2	El Problema de Transporte .....	14
Figura 2.3	Ejemplo de Rutas .....	14
Figura 2.4	Ejemplo de Asignación de Rutas .....	15
Figura 2.5	Importancia de la selección de conexiones en la minimización del costo de enrutamiento .....	18
Figura 2.6	Beneficio en el costo de la solución al usar de forma inteligente la capacidad del camión para satisfacer las demandas .....	19
Figura 2.7	Diseño de una ruta tomando en cuenta Límites de Horarios .....	21
Figura 2.8	Descripción de las unidades de asignación del vehículo .....	22
Figura 2.9	Descripción de las cajas de producto y sus propiedades .....	23
Figura 2.10	Áreas de Restos de los Almacenes. Área de donde se extrae parte del producto para satisfacer la demanda .....	24
Figura 2.11	Cama Mezclada de producto; varias cajas forman esta unidad de asignación .....	25
Figura 2.12	Tarima Mezclada .....	27
Figura 2.13	Procedimiento General para Distribuir la carga en el Vehículo .....	27
Figura 2.14	Organización del balance de la carga en vehículos .....	28
Figura 3.1	Relación de los problemas que participan en el Problema RoSLoP .....	33
Figura 5.1	Metodología de Solución .....	50
Figura 5.2	Ejemplo de selección del siguiente cliente a visitar. En este ejemplo la mejor opción es el Cliente 1, ya que visitarlo no impediría que el Cliente 2 se visitara después .....	53
Figure 5.3	Algoritmo ACS utilizado para resolver casos RoSLoP .....	57
Figura 5.4	Función <i>new_ant_solution</i> .....	59
Figure 5.5	Algoritmo DiPro .....	61
Figure 5.6	Algoritmo Round-Robin .....	62
Figura 6.1	Diagrama de Flujo del Sistema de Transportación que da solución al Problema ROSLOP .....	65
Figura 6.2	Grafo de conexión de las regiones de EMPRO .....	66
Figura 6.3	Grafo de conexión de la Región 1 EMPRO .....	67
Figura 6.4	Diagrama Entidad – Relación de la Base de Datos EMPRO .....	71
Figura 6.5	Diagrama de Relación de la Base de Datos de EMPRO .....	72
Figura 6.6	Comparación del Desempeño de las Heurísticas .....	88
Figura 6.7	Comparación del desempeño del Procedimiento Manual contra la metodología .....	90
Figura a1	Tabla para determinar el número de clientes del caso de prueba .....	95
Figura a2	Relación de Tablas de la Base de Datos EMPRO para calcular demanda de los clientes .....	96
Figura a3	Relación de tablas que permiten calcular las capacidades de un vehículo .....	96
Figura a4	Relación que muestra las tablas a partir de las cuales se obtiene la matriz de conexión .....	97

Figura a5	Relación que especifica las ventanas de tiempo para los clientes .....	98
Figura a6	Relación que especifica las ventanas de tiempo para los almacenes .....	98
Figura a7	Relación para determinar el tiempo de maniobra de cada vehículo por localidad .....	99
Figura a8	Relación que asocia vehículos a almacenes .....	100
Figura b1	Diagrama de conexiones entre los clientes y el almacén del Caso 27 ...	101
Figura b2	Descripción general de la entrada del caso de prueba 27 .....	115
Figura b3	Solución al caso de prueba 27 dada por TSHA .....	116

# Índice de Tablas

Tabla 2.1	Propiedades de BPVRP .....	17
Tabla 3.1	Estado del Arte de las variantes del VRP .....	34
Tabla 3.2	Estado del Arte de software comercial afín .....	35
Tabla 3.3	Análisis de trabajos de investigación sobre variantes Rich VRP .....	36
Tabla 4.1	Modelos Matemáticos de diferentes problemas VRP .....	39
Tabla 4.2	Conjuntos del Modelo ILP de la tarea de Asignación de Rutas .....	40
Tabla 4.3	Definición de Parámetros .....	40
Tabla 4.4	Variables Binarias .....	41
Tabla 4.5	Definición de variables enteras .....	42
Tabla 5.1	Definición de los parámetros de la función de cercanía para vehículos	53
Tabla 6.1	Cat_Vehiculos .....	73
Tabla 6.2	DisponibilidadVehículos .....	73
Tabla 6.3	Cat_Carrocerías .....	74
Tabla 6.4	Cat_CarroceriaPallet .....	74
Tabla 6.5	Cat_Distancias .....	74
Tabla 6.6	Cat_DistanciaTiempos .....	75
Tabla 6.7	Cat_Carreteras .....	75
Tabla 6.8	Cat_Horarios .....	75
Tabla 6.9	Cat_Maniobras .....	76
Tabla 6.10	Cat_Producto .....	76
Tabla 6.11	PedidosAProgramar .....	76
Tabla 6.12	PedidosDetalle .....	77
Tabla 6.13	Control .....	77
Tabla 6.14	ProgFleteros .....	81
Tabla 6.15	ProgFleterosDetalle .....	82
Tabla 6.16	Descripción de las instancias RoSLoP Reales .....	83
Tabla 6.17	Configuración de los parámetros del algoritmo ACS para BPVRP .....	84
Tabla 6.18	Resultados de NN y TSHA .....	85
Tabla 6.19	Comparación del desempeño de TSHA con diferentes criterios de parada .....	86
Tabla 6.20	Comparación de TSHA con el Procedimiento Manual .....	89
Tabla b1	Tabla <i>PedidosAPrograma</i> para el caso 27 .....	102
Tabla b2	Tabla <i>PedidosDetalle</i> para el caso 27 .....	102
Tabla b3	Tabla <i>DisponibilidadVehiculos</i> para el caso 27 .....	103
Tabla b4	Tabla <i>Cat_Vehiculos</i> para el caso 27 .....	103
Tabla b5	Tabla <i>Cat_Distancias</i> para el caso 27 .....	103
Tabla b6	Tabla <i>Cat_Carreteras</i> para el caso 27 .....	103
Tabla b7	Tabla <i>Cat_DistanciaTiempo</i> para el caso 27 .....	103
Tabla b8	Tabla <i>Id_Carrocería</i> para el caso 28 .....	104
Tabla b9	Tabla <i>Cat_CarroceríasPallet</i> para el caso 27 .....	104
Tabla b10	Tabla <i>Cat_Maniobras</i> para el caso 27 .....	105
Tabla b11	Tabla <i>Cat_Horarios</i> para el caso 27 .....	105
Tabla b12	Tabla <i>ProgFleteros</i> para el caso 27 .....	111
Tabla b13	Tabla <i>ProgFleterosDetalle</i> para el caso 27 .....	111