

Modelizado para la planeación de la
producción y la logística directa e
inversa de una cadena de suministro
cuyo abastecimiento depende
parcialmente de los materiales de
retorno



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis Doctoral

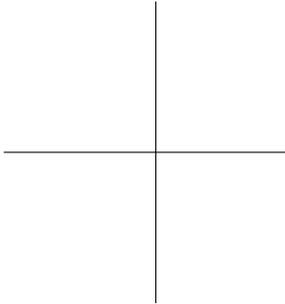
Javier Parra Peña

Dirigida por los doctores
Eduardo Vicens Salort
Ángel Ortiz Bas

Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial
Escuela de Doctorado
Universitat Politècnica de València

Octubre de 2016

Este documento está preparado para ser imprimido a doble cara.



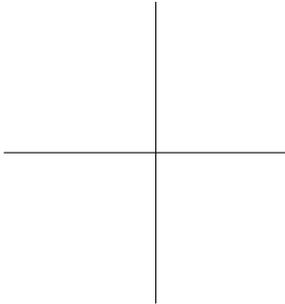
**Modelizado para la planeación de
la producción y la logística directa e
inversa de una cadena de suministro
cuyo abastecimiento depende
parcialmente de los materiales de
retorno**

*Memoria que presenta para optar al título de Doctor en Ingeniería y
Producción Industrial*

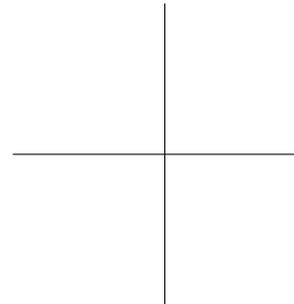
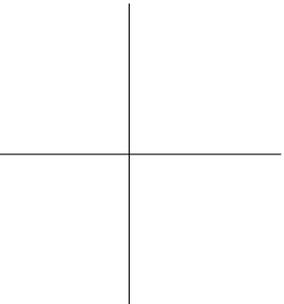
Dirigida por los doctores
Eduardo Vicens Salort
Ángel Ortiz Bas

Doctorado en Ingeniería y Producción Industrial
Escuela de Doctorado
Universitat Politècnica de València

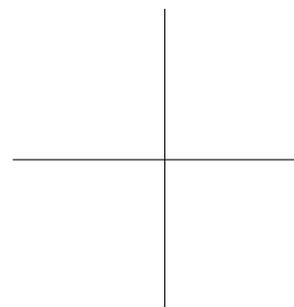
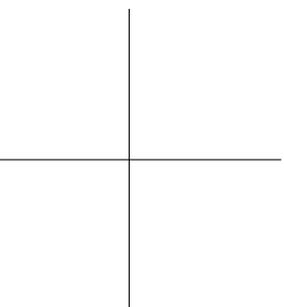
Octubre de 2016

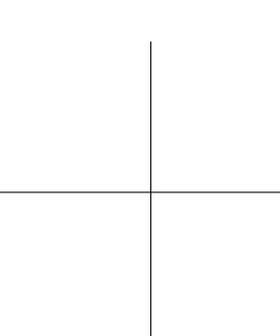
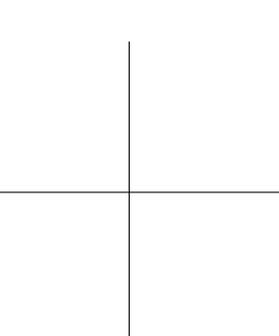


Copyright ©

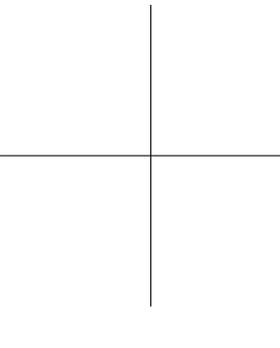
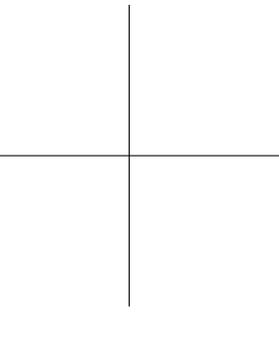


*A Odbulia Santamaria
in memoriam*





*A los que continuamente trabajan en mejorar
las condiciones de vida de la humanidad
a través de la ciencia y la técnica*



Agradecimientos

Gracias a la vida que me ha dado tanto...

Violeta Parra

Agradezco de manera especial a mi familia por su comprensión y su apoyo incondicional en el desarrollo de mis estudios de doctorado.

A mis directores de Tesis, Doctores Eduardo Vicens Salort y Ángel Ortiz Bas, por su apoyo constante, su motivación, su confianza, dedicación, y aportes al desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros del Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de Producción CIGIP, de la Universidad Politécnica de Valencia UPV, por su colaboración y por su acogida.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por su apoyo para la realización de mis estudios de doctorado.

A los amigos que hicieron de mi estancia en Valencia, una experiencia de vida con grandes aprendizajes y vivencias; y a los que me apoyaron desde la distancia en los momentos que así lo ameritaron.

En general, a todas las personas que directa o indirectamente han contribuido a la finalización de esta tesis.

Resumen

A lo largo de esta tesis se analiza un tipo de industria que presenta dos características básicas: sus productos son distribuidos ampliamente a nivel geográfico y emplean elementos que una vez usados regresan al proceso de fabricación para hacer parte de los nuevos productos. Características que plantean de entrada un reto a nivel logístico. Este tipo de cadenas de suministros se caracteriza además por la presencia de varios eslabones que permiten acercar el producto desde las plantas de producción hasta llegar al consumidor final.

En primer lugar se hace un análisis de la estructura de la cadena de suministros, desde la producción, en las plantas de procesamiento hasta su llegada al cliente final por intermedio de los detallistas, en el sentido “aguas abajo”, y desde el consumo del producto y la consecuente liberación de los materiales reutilizables que una vez clasificados deben conducirse “aguas arriba” hasta las plantas de producción, donde son preparados y utilizados una y otra vez, en un ciclo que se repite hasta el final de su vida útil.

El foco de atención y sobre el cual se actúa consiste en la integración de dos funciones fundamentales de la cadena de suministros, en este caso la planeación de la producción y la distribución del producto con la consecuente recolección de los materiales de retorno. Al respecto, se precisa realizar la planeación de la producción de manera que dé satisfacción a la demanda que tiene lugar en los detallistas, y que se abastezca de los materiales de retorno que una vez consumido el producto se reincorporan al proceso.

Se hace una revisión bibliográfica de lo relacionado con los conceptos de planeación de la producción, logística inversa y ruteo de vehículos y; se construyen modelos de programación matemática que soportan la toma de decisiones en la planeación de la producción (en las plantas), de los inventarios (a lo largo y ancho de toda la cadena de suministros), y de los envíos que deben realizarse en uno y otro sentido en las correspondientes rutas.

Como resultado de la investigación se presentan tres modelos de programación lineal entera mixta, MILP (por su abreviatura del inglés *Mixed Integer Linear Programming*), así:

Modelo de planeación de la producción: Modelo matemático en el cual se representa la cadena de suministros a partir de las instalaciones de cada uno de los niveles y su ubicación geográfica, y se determinan los volúmenes a producir, a almacenar y las cantidades que se deben enviar desde cada nodo de la cadena de suministros a los demás, de modo que se satisfaga la demanda en un horizonte de planeación compuesto por varios periodos. Este modelo presenta restricciones de capacidad tanto de producción como de almacenamiento, de demanda, de compatibilidad de productos con las instalaciones, pues no todos los productos suelen estar en todas las instalaciones, y de envíos directos entre determinados nodos de la cadena de suministros (particularmente entre productores y detallistas), entre otros aspectos.

Modelo de ruteo de vehículos: Modelo matemático que representa la forma en que se deben distribuir los productos desde los diferentes nodos fuente a los diferentes nodos destino, haciendo uso de una flota heterogénea de vehículos, en un periodo de tiempo. El modelo se hace bajo el supuesto de que los nodos son o emisores o receptores del producto (plantas y detallistas), aunque en su utilización un nodo intermedio puede asumir uno de estos roles según si es origen o destino de las mercancías. Para este modelo se tienen en cuenta las restricciones asociadas al uso de la flota, a su capacidad tanto en masa como en volumen, los flujos a lo largo de la cadena bajo la premisa de que un vehículo parte de un nodo fuente y puede visitar varios nodos destino antes de regresar, y de que un nodo puede ser visitado por varios vehículos (bien por las condiciones de compatibilidad entre nodos y productos o bien porque resulta más económico abastecer la demanda de esta forma), ante la presencia de ventanas de tiempo tanto rígidas como suaves.

Modelo integrado de gestión de producción y logística: Es un modelo que reúne los dos modelos anteriores, es decir, permite la planeación de la producción, la gestión de los inventarios y el ruteo de vehículos para un horizonte de planeación determinado.

Los tres modelos se proponen con el objetivo de minimizar los costes totales y son evaluados con instancias de prueba, apropiadas.

Los modelos fueron implementados haciendo uso del software de optimización Gurobi 6.5.1 y del lenguaje de programación python2.7. Además, se implementó una heurística constructiva y un algoritmo genético utilizando el lenguaje de programación python y el software Pyevolve, como alternativa a la solución del modelo de ruteo de vehículos, con el fin de reducir el tiempo de ejecución.

Resum

Al llarg d'aquesta tesi s'analitza un tipus d'indústria que presenta dues característiques bàsiques: els seus productes són distribuïts àmpliament a nivell geogràfic i fan ús d'elements que una vegada usats tornen al procés de fabricació per a fer part dels nous productes. Característiques que plantegen d'entrada un repte a nivell logístic. Aquest tipus de cadenes de subministraments es caracteritza a més per la presència de diversos eslavons que permeten acostar el producte des de les plantes de producció fins a arribar al consumidor final.

En primer lloc es fa una anàlisi de l'estructura de la cadena de subministraments, des de la producció, en les plantes de processament fins a la seua arribada al client final per mitjà dels detallistes, en el sentit "aigües a baix", i des del consum del producte i el consegüent alliberament dels materials reutilitzables que una vegada classificats han de conduir-se "aigües a dalt" fins a les plantes de producció, on són preparats i utilitzats una vegada i una altra, en un cicle que es repeteix fins al final de la seua vida útil.

El focus d'atenció i sobre el qual s'actua consisteix en la integració de dues funcions fonamentals de la cadena de subministraments, en aquest cas la planificació de la producció i la distribució del producte amb la consegüent recollida dels materials de tornada. Sobre aquest tema, es precisa realitzar la planificació de la producció de manera que done satisfacció a la demanda que té lloc en els detallistes, i que es proveïska dels materials de tornada que, una vegada consumit el producte, es reincorporen al procés.

Es fa una revisió bibliogràfica del relacionat amb els conceptes de planificació de la producció, logística inversa i enrutament de vehicles i es construeixen models de programació matemàtica que suporten la presa de decisions en la planificació de la producció (en les plantes), dels inventaris (de llarg a llarg de tota la cadena de subministraments), i dels enviaments que han de realitzar-se en un i un altre sentit en les corresponents rutes.

Com a resultat de la recerca es presenten tres models de Programació Lineal Sencera Mixta, MILP (per la seua abreviatura de l'anglès Mixed Integer Linear Programming), així:

Model de planificació de la producció Model matemàtic en el qual es representa la cadena de subministraments a partir de les instal·lacions de cadascun dels nivells i la seua ubicació geogràfica, i es determinen els volums a produir, a emmagatzemar i les quantitats que s'han d'enviar des de cada node de la cadena de subministraments als altres, de manera que se satisfaga la demanda en un horitzó de planificació compost per diversos períodes. Aquest model presenta restriccions de capacitat tant de producció com d'emmagatzematge, de demanda, de compatibilitat de productes amb les instal·lacions, doncs no tots els productes solen estar en totes les instal·lacions, i d'enviaments directes entre determinats nodes de la cadena de subministraments (particularment entre productors i detallistes), entre altres aspectes.

Model de enrutament de vehicles: Model matemàtic que representa la forma en què s'han de distribuir els productes des dels diferents nodes font als diferents nodes destí, fent ús d'una flota heterogènia de vehicles, en un període de temps. El model es fa sota el supòsit que els nodes són o emissors o receptors del producte (plantes i detallistes), encara que en la seua utilització un node intermedi pot assumir un d'aquests rols segons si és origen o destinació de les mercaderies. Per a aquest model es tenen en compte les restriccions associades a l'ús de la flota, a la seua capacitat tant en massa com en volum, els fluxos al llarg de la cadena sota la premissa que un vehicle parteix d'un node font i pot visitar diversos nodes destí abans de tornar, i que un node pot ser visitat per diversos vehicles (bé per les condicions de compatibilitat entre nodes i productes o bé perquè resulta més econòmic proveir la demanda d'aquesta forma), davant la presència de finestres de temps tant rígides com suaus.

Model integrat de gestió de producció i logística: És un model que reuneix els dos models anteriors, és a dir, permet la planificació de la producció, la gestió dels inventaris i el enrutament de vehicles per a un horitzó de planificació determinat.

Els tres models es proposen amb l'objectiu de minimitzar els costos totals i són avaluats amb instàncies de prova, apropiades.

Els models van ser implementats fent ús del programari d'optimització Gurobi 6.5.1 i del llenguatge de programació Python2.7. A més, es va implementar una heurística constructiva i un algoritme genètic utilitzant el llenguatge de programació Python i el programari Pyevolve, com a alternativa a la solució del model de enrutament de vehicles, amb la finalitat de reduir el temps d'execució.

Summary

In this Thesis, we analyze an industry type that has two basic features: Its products are distributed in a geographic level and it reuses material after that is consumed to made new products. Because of these features, it represents a logistics challenge. This kind of supply chains is characterized also by having various stages that permit to carry the products from facility plants to the final customer.

First, it is analyzed the supply chain structure, from production, in facility plants to the final customer by retailers, downstream; and from the customer, when returnable materials are liberated, classification and transport upstream to facility plants , where are prepared and used many times, until the end of their usable life.

The attention focus is the integration of two fundamental functions of the supply chain management, in this case, production planning and distribution planning including the collection of reusable materials. It is precise to plan the production to satisfy retailers demand and to the procurement of returnable materials which after being consumed return to the process.

It is made a bibliographical review about production planning, reverse logistics and vehicle routing and, it is built mathematical programming models to make decisions in production planning (in facility plants), inventories planning (in all the supply chain), and the deliveries that should be done in both senses in their respective routes.

As a result of this research, there are three models of Mixed Integer Linear Programming:

Production planning model: Mathematical model which represents all the facilities in each one of the levels of the supply chain and their geographical localization. It lets to determine production and stock levels and delivery quantities in order to satisfy the demands in a planning horizon of several periods.

This model has capacity constraints for both production and storage, constraints of demand, compatibility between products and facilities because not all the products can be in all facilities, and constraints of direct deliveries among determinate nodes in the supply chain (particularly between plants and retailers), especially.

Vehicle routing model: mathematical model that represents products distribution from different source nodes to destine nodes, it use a heterogeneous fleet, in a time period.

One of the model assumptions is that a node acts as product emitting or recipient (facility plants or retailers). However, an intermediate node can take one of these roles depending if is the origin or destine of goods. This model has fleet use constraints, volume, and mass capacity vehicle constraints, fluxes in the supply chain. A vehicle can visit several destine nodes after leave from a source node, and a node can be visited by one or more vehicles (because of compatibility conditions between products and nodes or by economical aspects) and there are soft and strong time windows.

Integrated logistics and production management model: It is a model that join the two previous models, because of it, it is possible to plan production, inventories, and vehicle routing for a horizon time of several periods.

Three proposed models have the objective of minimizing the total cost and are evaluated with testing instances.

The Models were built using Gurobi 6.5.1 optimization model and Python2.7 programming language. Moreover, it was built a constructive heuristics and a genetic algorithm using Python programming language and Pyevolve software, as an alternative to solving routing vehicles, to reduce execution time.

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Resum	XIII
Summary	XV
Índice general	XVII
Índice de Tablas	XXI
Índice de Figuras	XXV
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes y estado actual del tema	1
1.1.1 Logística Inversa	1
1.1.2 Ruteo de vehículos	3
1.1.3 Logística inversa y ruteo de vehículos	4
1.2 Objetivos de la investigación	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.2.3 Metodología y plan de trabajo	6
2 Sistema de producción y logística	9
2.1 La cadena de suministros	9
2.1.1 Productos	10
2.1.2 Eslabones de la cadena de suministros	10
2.1.3 Flujo de los productos en la cadena de suministros	12
2.2 Logística de distribución	13
2.2.1 Características de la flota	13
2.2.2 Configuración de la carga	15
2.3 Logística inversa	16
2.4 Ruteo de vehículos	17

2.5	Inventarios	18
2.6	Planificación de la producción	18
2.6.1	DRP	19
2.7	Parámetros y variables de interés	19
2.7.1	Parámetros	20
2.7.2	Variables	21
2.7.3	Reportes para evaluación y control	22
2.7.4	Cálculo de coste total	22
2.8	Descripción del estudio	24
2.9	Conclusiones	27
3	Planeación de la producción, logística inversa y ruteo de vehículos	31
3.1	Planeación de la producción	31
3.2	Lógica inversa	33
3.2.1	Uso estratégico de la logística inversa	36
3.2.2	El sistema de logística inversa	37
3.2.3	Dimensiones de la logística inversa	42
3.2.4	La gestión de operaciones y la logística inversa	50
3.2.5	Modelos de investigación de operaciones para el diseño y configuración de las redes de logística inversa	52
3.2.6	Estructura y diseño de las redes de logística inversa	57
3.2.7	Modelos cuantitativos para el diseño de redes de logística inversa	64
3.2.8	Modelos de inventario en sistemas de logística inversa	67
3.2.9	Ruteo de vehículos en redes de logística inversa	76
3.3	Ruteo de Vehículos	77
3.3.1	Definición del problema y notación básica	81
3.3.2	Modelos básicos para el problema de ruteo de vehículos	84
3.3.3	Métodos usados para el ruteo de vehículos en la industria	85
3.3.4	Trabajos previos relacionados	87
3.4	Conclusiones	108
3.5	Descripción general del enfoque de modelado	111
3.5.1	Articulación de las dos etapas	112
3.6	Etapa I. Modelo para la coordinación de la planeación de la producción y la logística	117
3.6.1	Supuestos	117
3.6.2	Conjuntos	118
3.6.3	Parámetros	120
3.6.4	Variables	121
3.6.5	Función objetivo	122
3.6.6	Restricciones	123
3.7	Etapa II. Modelo para el ruteo de vehículos con entregas y recogidas	126
3.7.1	Supuestos	127
3.7.2	Conjuntos	129

3.7.3	Parámetros	130
3.7.4	Variables	131
3.7.5	Función objetivo	132
3.7.6	Restricciones	133
3.8	Conclusiones	138
4	Modelo para la gestión de la producción y la logística	141
4.1	Descripción general del enfoque de modelado	141
4.2	Modelo Integrado	142
4.2.1	Conjuntos	142
4.2.2	Parámetros	143
4.2.3	Variables de decisión	146
4.2.4	Función objetivo	147
4.2.5	Restricciones	148
4.3	Conclusiones	155
5	Evaluación de los modelos propuestos	157
5.1	Instancia base y estructura de la hoja de cálculo	157
5.2	Primera etapa: planeación de la producción	160
5.3	Segunda etapa: ruteo de vehículos	162
5.3.1	Articulación de las dos etapas como estrategia de solución	163
5.3.2	Heurística constructiva para solucionar el Modelo VRP enriquecido	165
5.3.3	Algoritmo genético para solucionar el Modelo VRP enriquecido	167
5.4	Software utilizado	171
5.4.1	GNU Linear Programming Kit GLPK e interfaz de usuario Gusek	171
5.4.2	Gurobi	172
5.4.3	Lenguaje de programación Python	174
5.4.4	Pyevolve	175
5.5	Conclusiones	175
6	Conclusiones y trabajo futuro	177
6.1	Conclusiones	177
6.2	Trabajo futuro	179
A	Datos instancia de evaluación	181
A.1	Información asociada a las instalaciones	181
A.2	Información relacionada con los productos	183
A.3	Información relacionada con la producción	184
A.4	Información de planes de producción y o distribución previos	184
A.5	Información relacionada con la demanda	185
A.6	Información de inventarios	187
A.7	Información asociada a los vehículos	188

B Resultados instancia de evaluación	191
B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción	191
B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos	223
B.2.1 Instancia uno primer periodo	223
B.2.2 Instancia dos primer periodo	229
B.2.3 Instancia tres segundo periodo	232
B.2.4 Instancia cuatro tercer periodo	238
B.2.5 Instancia cinco, cuarto periodo	241
B.2.6 Instancia seis quinto periodo	247
B.2.7 Instancia siete quinto periodo	253
B.2.8 Instancia ocho sexto periodo	260
Bibliografía	265
Referencias	265
Índice alfabético	281

Índice de tablas

Tabla 3.1	Perspectivas logística inversa	38
Tabla 3.2	Elementos para identificar las dimensiones de la logística inversa	42
Tabla 3.3	Caracterización de ítems en flujos inversos de acuerdo con tipo y origen	50
Tabla 3.4	Comparación de los ambientes de manufactura <i>De recuperación y Tradicional</i>	51
Tabla 3.5	Redes de logística inversa en el contexto de la cadena de suministro	61
Tabla 3.6	Estado del arte	96
Tabla 3.7	Nodos de la cadena de suministros aguas arriba y aguas abajo	119
Tabla 5.1	Información requerida para los modelos presentados	158
Tabla 5.2	Instalaciones en la instancia de evaluación	160
Tabla 5.3	Variables de la etapa 1 cuyos valores son parámetros en la etapa 2	163
Tabla A.1	Información de las Instalaciones	182
Tabla A.2	Lead Time de transporte	182
Tabla A.3	Información de los Productos	183
Tabla A.4	Productos en instalaciones	183
Tabla A.5	Tiempos de procesamiento	184
Tabla A.6	Tiempos de procesamiento	184
Tabla A.7	Llegadas programadas	185
Tabla A.8	Ventas promedio	185
Tabla A.9	Demanda minoristas	185
Tabla A.10	Materiales de retorno devueltos	186
Tabla A.11	Inventario inicial	187
Tabla A.12	Costes de Inventario	187
Tabla A.13	Información de los vehículos	188
Tabla A.14	Información de las ventanas de tiempo de los vehículos . . .	188
Tabla A.15	Información de accesibilidad de los vehículos a los nodos . .	189
Tabla B.1	Resumen de resultados etapa de planeación	191
Tabla B.2	Información de Producción	192

Tabla B.3	Información de Inventarios	193
Tabla B.4	Entrega y recogida de productos y materiales de retorno . .	201
Tabla B.5	Comportamiento plantas	205
Tabla B.6	Comportamiento otros nodos	208
Tabla B.7	Uso de las instalaciones	220
Tabla B.8	Resumen instancia 1	223
Tabla B.9	Informe de Rutas y tiempos instancia 1	224
Tabla B.10	Entregas y recogidas instancia 1	225
Tabla B.11	Resumen por vehículo instancia 1	227
Tabla B.12	Ventanas de tiempo suaves instancia 1	227
Tabla B.13	Resumen instancia 2	229
Tabla B.14	Informe de Rutas y tiempos instancia 2	230
Tabla B.15	Entregas y recogidas instancia 2	230
Tabla B.16	Resumen por vehículo instancia 2	230
Tabla B.17	Ventanas de tiempo suaves instancia 2	232
Tabla B.18	Resumen instancia 3	232
Tabla B.19	Informe de Rutas y tiempos instancia 3	233
Tabla B.20	Entregas y recogidas instancia 3	235
Tabla B.21	Resumen por vehículo instancia 3	236
Tabla B.22	Ventanas de tiempo suaves instancia 3	236
Tabla B.23	Resumen instancia 4	238
Tabla B.24	Informe de Rutas y tiempos instancia 4	238
Tabla B.25	Entregas y recogidas instancia 4	239
Tabla B.26	Resumen por vehículo instancia 4	239
Tabla B.27	Ventanas de tiempo suaves instancia 4	239
Tabla B.28	Resumen instancia 5	241
Tabla B.29	Informe de Rutas y tiempos instancia 5	241
Tabla B.30	Entregas y recogidas instancia 5	244
Tabla B.31	Resumen por vehículo instancia 5	245
Tabla B.32	Ventanas de tiempo suaves instancia 5	245
Tabla B.33	Resumen instancia 6	247
Tabla B.34	Informe de Rutas y tiempos instancia 6	248
Tabla B.35	Entregas y recogidas instancia 6	249
Tabla B.36	Resumen por vehículo instancia 6	250
Tabla B.37	Ventanas de tiempo suaves instancia 6	252
Tabla B.38	Resumen instancia 7	253
Tabla B.39	Informe de Rutas y tiempos instancia 7	254
Tabla B.40	Entregas y recogidas instancia 7	255
Tabla B.41	Resumen por vehículo instancia 7	258
Tabla B.42	Ventanas de tiempo suaves instancia 7	258
Tabla B.43	Resumen instancia 8	260
Tabla B.44	Informe de Rutas y tiempos instancia 8	261
Tabla B.45	Entregas y recogidas instancia 8	262
Tabla B.46	Resumen por vehículo instancia 8	262

Tabla B.47 Ventanas de tiempo suaves instancia 8 263

Índice de figuras

Figura 2.1	Representación simplificada de la cadena de suministros . . .	11
Figura 2.2	Cadena de suministros del sistema.	12
Figura 2.3	Cadena de suministros y flujos de materiales en el tiempo . .	14
Figura 2.4	Tipo de estudio	24
Figura 2.5	Características de la información	24
Figura 2.6	Características de los datos	24
Figura 2.7	Planeación de la producción y el transporte en la cadena de suministros	25
Figura 2.8	Características del sistema	26
Figura 2.9	Características físicas del problema	27
Figura 3.1	Entradas y salidas de información por etapas.	113
Figura 3.2	Procedimiento de ejecución modelo bietapa.	115
Figura 3.3	Articulación de los modelos correspondientes a las dos etapas	116
Figura 3.4	Ventanas de tiempo rígidas	138
Figura 5.1	Algoritmo para la construcción de rutas	166
Figura 5.2	Algoritmo genético para la construcción de rutas	168
Figura 5.3	Decodificado del cromosoma para la construcción de las rutas	170
Figura 5.4	Benchmarking de software de optimización	173
Figura B.1	Informe de rutas por vehículo para la instancia 1	226
Figura B.2	Informe de rutas por vehículo para la instancia 2	231
Figura B.3	Informe de rutas por vehículo para la instancia 3	234
Figura B.4	Informe de rutas por vehículo para la instancia 4	240
Figura B.5	Informe de rutas por vehículo para la instancia 5	243
Figura B.6	Informe de rutas por vehículo para la instancia 6	251
Figura B.7	Informe de rutas por vehículo para la instancia 7	257
Figura B.8	Informe de rutas por vehículo para la instancia 8	262

Capítulo 1

Introducción

Modelo para la planeación de la producción y la logística directa e inversa. Una aplicación a un tipo de empresa que elabora múltiples clases de producto en varias plantas cuya producción depende parcialmente de los retornos, que posee una flota heterogénea de vehículos y que debe cumplir con ventanas de tiempo tanto en la entrega de productos como en la recogida de los materiales de retorno.

1.1 Antecedentes y estado actual del tema

La logística de distribución y la logística inversa en una industria que se abastece parcialmente de material de retorno debe ser objeto de una adecuada gestión que permita: minimizar los costes asociados al transporte, garantizar oportunidad en la entrega de los productos a los clientes, obtener economías en el aprovisionamiento de los materiales de retorno, y controlar el flujo y las existencias de estos últimos debido a su impacto en los planes de producción.

1.1.1 Logística Inversa

La logística inversa a la que se hace referencia, implica en un sentido amplio: recolección, inspección, reciclaje, renovación y re-manufactura de productos usados o devueltos. Algunas de las definiciones más comunes al respecto son:

Logística inversa es el proceso de planear, implementar y controlar los flujos de materias primas, inventario en proceso, empaque y bienes finales hacia atrás, desde un punto de uso de manufactura y distribución, a un punto de recuperación o un punto de disposición apropiada (REVLOG, 1998).

La logística inversa es más que reutilizar contenedores y materiales de empaque, si no hay bienes o materiales que están siendo enviados en sentido contrario, la actividad probablemente no es una actividad de logística inversa (Rogers, Tibben-Lembke, University of Nevada, y Reverse Logistics Executive Council, 1999).

A partir de diferentes acepciones del término logística inversa, Fleischmann (2000) propone una definición unificada, teniendo en cuenta la reducción de residuos (Stock, 1998), la dirección en que fluyen los bienes entre los eslabones de la cadena de suministro que envían y reciben (Pohlen y Farris, 1992), y la gestión del flujo de bienes que permite generar un ciclo cerrado en la cadena de suministro con su consecuente recuperación de valor (Rogers y cols., 1999).

La logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y efectivo de los flujos y almacenamientos de bienes secundarios e información relacionada en dirección opuesta a la cadena de suministros tradicional con el propósito de recuperar valor o de disponerlos apropiadamente (Fleischmann, 2000). La gestión de inventarios es un área de la logística inversa y junto con los flujos de retorno de productos usados debe integrarse dentro de la planeación de materiales (Fleischmann y Kuik, 2003).

La logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control de los flujos de materias primas, producto en proceso y bienes finales en sentido contrario desde un punto de fabricación, distribución o de uso a un punto de recuperación o de disposición apropiada (De Brito, Marisa P., 2003).

En adelante se asume que: *La logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y efectivo de los flujos de materias primas, producto en proceso y bienes finales e información en sentido contrario a la cadena de suministros tradicional, desde un punto de fabricación, distribución o de uso a un punto de recuperación de su valor o de disposición apropiada.* En consideración a lo enunciado, y a la naturaleza de la empresa objeto de análisis, la coordinación de la logística de distribución y la logística inversa debe manifestarse en dos aspectos fundamentales: el ruteo de vehículos, de acuerdo con criterios de eficiencia en la utilización de los mismos y sujeto a las condiciones propias del entorno en el cual se lleva a cabo, y el control de los inventarios que para el caso se puede manifestar como determinante de la gestión de manufactura.

1.1.2 Ruteo de vehículos

Respecto del problema de ruteo de vehículos (VRP), éste ha sido estudiado teniendo en cuenta múltiples variantes entre las cuales están el considerar o no límites en la capacidad, relaciones con producción, entregas y recogidas de manera simultánea, ventanas de tiempo, entre otros aspectos.

Bolduc, Laporte, Renaud, y Boctor (2010) proponen un modelo de ruteo de vehículos que tiene en cuenta los calendarios de demanda y de producción (VRPPDC), sin restricciones de capacidad, por medio de búsqueda tabú.

Los problemas que tienen en cuenta ventanas de tiempo han sido bastante estudiados, trabajos como el de X. Li, Leung, y Tian (2012) en el cual se definen subproblemas elementales de ruta más corta con restricciones de recursos y el de Chabrier (2006) en el cual se resuelve este tipo de problema por medio de métodos exactos de generación de columnas, son ejemplo de ello.

Dentro de los problemas que tienen en cuenta la existencia de limitaciones en la hora en la que se realizan las entregas (o recogidas), un problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica, ventanas de tiempo y restricciones de capacidad (CVRPSDTW) es solucionado mediante búsqueda en vecindades en (H. Lei, Laporte, y Guo, 2011).

X. Li y cols. (2012) y Brandão (2011) proponen modelos de ruteo de vehículos considerando una flota fija y heterogénea de vehículos, abierta (HFFOVRP) y cerrada (HFFVRP), respectivamente. El modelo de X. Li y cols. (2012) es resuelto haciendo uso de una heurística adaptativa multi-inicio y búsqueda tabú y el de Brandão (2011) empleando búsqueda tabú.

Por su parte Bräysy, Dullaert, Hasle, Mester, y Gendreau (2008), analizaron un problema de ruteo de vehículos que incluye decisiones de mezcla y tamaño de la flota teniendo en cuenta ventanas de tiempo (FSMVRPTW), a partir del modelo propuesto por Liu y Chen (1999) y lo resuelven utilizando una metaheurística de recocido determinístico con inicio múltiple (MSDA) que resulta bastante eficiente.

Dentro de las variantes de modelos con capacidad heterogénea se encuentran además los modelos de ruteo de camiones y tracto camiones (TTRP) como los presentados por Villegas, Prins, Prodhon, Medaglia, y Velasco (2011) y Lin, Yu, y Chou (2010), los cuales solucionan por GRASP, re-encadenamiento de trayectorias, búsqueda de vecindad variable y recocido simulado; y el modelo de localización y ruteo de dos niveles (LRP-2E) propuesto en el trabajo de Nguyen, Prins, y Prodhon (2012).

La gestión de la logística directa de distribución tiene un grado de desarrollo importante como puede evidenciarse en el trabajo de Kant, Jacks, y Aantjes (2008), en el cual se resuelve el problema para Coca-Cola en algunas regiones de los Estados

Unidos de América, y de Europa, considerando el problema como un problema de ruteo con ventanas de tiempo, para una flota heterogénea (VRPTW) mediante heurísticas de búsqueda local implementadas en el software ORTEC (Kant y cols., 2008).

Un modelo de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP) empleando búsqueda tabú (Renaud, Laporte, y Boctor, 1996), modelos para el problema de ruteo de vehículos con entregas parciales mediante una búsqueda limitada (Feillet, Gendreau, Medaglia, y Walteros, 2010) y mediante ramificación y acotamiento (Jin, Liu, y Eksioglu, 2008), fueron consultados.

Además, una formulación de problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica y restricciones de capacidad, en el cual se presentan además fallos aleatorios (Christiansen y Lysgaard, 2007).

Los modelos mencionados son una muestra del trabajo previo que se ha realizado en lo que respecta a ruteo de vehículos, teniendo en cuenta diferentes contextos y sus particularidades, que sirve como punto de partida para la solución del problema que se plantea.

1.1.3 Logística inversa y ruteo de vehículos

Por su parte no se encuentran trabajos específicos en lo que respecta a la logística inversa, aunque la función de recolección es mencionada en algunos trabajos en los cuales se aborda el problema de ruteo como un sistema integrado en el que se realizan las funciones de entrega y recogida, como un posible desarrollo posterior.

Se estudia el problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega simultáneas, haciendo uso de procedimientos de solución que implican heurísticas con memoria adaptativa, búsqueda Tabú, búsqueda local guiada, búsquedas en vecindad, en los trabajos de Zachariadis, Tarantilis, y Kiranoudis (2009, 2010) y Zachariadis y Kiranoudis (2011), respectivamente. Un problema de esta naturaleza se resuelve mediante un algoritmo de colonia de hormigas (Çatay, 2010) y, un modelo con flota homogénea es resuelto mediante ramificación y acotamiento (Subramanian, Uchoa, Pessoa, y Ochi, 2011).

Una solución específica de logística inversa para botellas de vidrio reutilizables modelando tal sistema como un problema del agente viajero (TSP), que se limita a un solo vehículo y se evalúa empleando simulación ha sido analizada (Cimino, Costantino, Di Gravio, y Longo, 2009).

El uso de metaheurísticas: para modelos de recogida y entrega que incluyen ventanas de tiempo (Hosny, Manar Ibrahim, 2010); y para un problema de distribución en una empresa de bebidas (Privé, Renaud, Boctor, y Laporte, 2006), este último tiene en cuenta los flujos de retorno de materiales cuyo impacto en la función ob-

jetivo se manifiesta como una reducción del coste de logística, tal modelización se realiza como una variante del problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea, ventanas de tiempo y restricciones de capacidad y de volumen.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo para la toma de decisiones relacionadas con la planeación de la producción y de la logística directa (de distribución) e inversa para una cadena de suministros cuyo abastecimiento depende parcialmente de los retornos, haciendo uso de técnicas de optimización propias de la investigación de operaciones.

La cadena de suministros modelizada posee múltiples eslabones que van desde un conjunto de plantas de fabricación a un conjunto de detallistas, múltiples productos, una flota heterogénea de vehículos, ventanas de tiempo (tanto en la entrega como en la recogida de materiales de retorno) y la necesidad de coordinar la logística inversa (como parte de la función de abastecimiento) con el plan de manufactura.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual del sistema de distribución de los diferentes productos y de recolección de los materiales de retorno teniendo en cuenta su influencia en la producción.
- Realizar un análisis de los sistemas de ruteo de vehículos (para la distribución directa e inversa) y de gestión de inventarios de bienes que fluyen *aguas abajo* y *aguas arriba*, teniendo en cuenta la utilización de una flota heterogénea, la existencia de ventanas de tiempo y el manejo de múltiples referencias.
- Analizar y caracterizar el sistema de producción y el sistema de distribución de productos finales, de conformidad con los trabajos encontrados en la revisión del estado del arte.
- Construir un modelo o conjunto de modelos que permitan optimizar la toma de decisiones en la planeación de la producción incluyendo materiales de retorno y en la distribución de bienes finales y en la recolección de materiales de retorno, de acuerdo con el contexto de operación de la cadena de suministros.
- Validar el modelo logístico haciendo uso de la evaluación de escenarios, de acuerdo con la naturaleza de la cadena de suministros objeto de estudio.

1.2.3 Metodología y plan de trabajo

Para el desarrollo del trabajo de tesis se propone utilizar la metodología propia de la investigación de operaciones, la cual puede materializarse en cuatro fases secuenciales y complementarias entre sí:

- FASE I: Análisis del sistema y revisión del estado del arte.
- FASE II: Construcción de un modelo o conjunto de modelos y procedimientos para la toma de decisiones.
- FASE III: Validación de la propuesta presentada.
- FASE IV: Documentación de la solución adoptada.

Para efectos de dar claridad en lo que respecta a la metodología se propone:

FASE I: Análisis del sistema y revisión del estado del arte

Se realizan simultáneamente las actividades relacionadas con la revisión del estado del arte en torno a los tres ejes temáticos fundamentales: planeación de la producción, logística inversa y ruteo de vehículos; y la descripción y caracterización de la cadena de suministros objeto de estudio.

La descripción del sistema objeto de estudio es presentada en el Capítulo 2, el cual concluye con la definición del problema a resolver.

El estado del arte se presenta en el Capítulo 3, en él se presenta una síntesis de la revisión realizada en lo que respecta a la temática de la presente tesis, incluyendo algunas aplicaciones a sistemas similares encontradas.

Esta primera fase tiene por objeto analizar las condiciones en las cuales se presenta la toma de decisiones en el sistema objeto de estudio, la naturaleza de las decisiones adoptadas, las condiciones del sistema que influyen en la toma de decisiones y los objetivos propios de la toma de decisiones.

FASE II: Construcción de modelos y procedimientos para la toma de decisiones

Una vez identificado el comportamiento del sistema de estudio, se realiza la búsqueda y/o construcción de instancias de prueba, susceptibles de ser usadas como punto de partida para la modelización del sistema.

En segundo lugar, se procedió a la construcción de los modelos que permitan dar solución al problema de estudio, tales modelos pueden apreciarse en el Capítu-

lo 4 y el Capítulo 5, en este último se presenta además un algoritmo genético como estrategia de solución que permite obtener buenas respuestas en un tiempo razonable.

FASE III: Validación de la propuesta presentada

La evaluación de la solución propuesta mediante análisis de escenarios del sistema es realizada en el Capítulo 5, y las conclusiones y futuras investigaciones se presentan en el Capítulo 6.

FASE IV: Documentación de la solución adoptada

El trabajo desarrollado es debidamente documentado a lo largo de su desarrollo.

Capítulo 2

Sistema de producción y logística

En este capítulo se presenta la descripción general de un sistema de producción y logística de bienes finales que incluye materiales de retorno. En la sección 2.1 se hace una descripción de la cadena de suministros, la tipología de los productos, y las características de operación del sistema. En las secciones 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 se presentan aspectos relacionados con la logística. En la sección 2.7 se presenta un listado de parámetros y variables claves en el sistema. Finalmente, en la sección 2.8 se presenta una síntesis del problema de acuerdo con una taxonomía que resume sus principales características y en la sección 2.9 una descripción de sus características fundamentales.

2.1 La cadena de suministros

La gestión logística es una parte fundamental de la gestión de manufactura. Hoy por hoy, no es posible pensar en la gestión de la producción de manera aislada a la logística, debido a que esta última juega un papel importante al mediar las relaciones entre proveedores, producción y consumidores, a lo largo de la cadena de suministros.

La integración de la logística con la planeación de la producción se constituye en una oportunidad de mejoramiento global de una industria, al minimizar la posibilidad de caer en óptimos locales que tienen lugar si se consideran por separado. Así, las decisiones de *qué y cuánto producir* en una planta de producción deben tener en cuenta también las decisiones de transporte de los productos a los clientes y la disposición de materiales una vez realizado el consumo de los productos.

En este apartado se realiza la identificación de los diferentes miembros de una cadena de suministros genérica (plantas, almacenes, centros de distribución, detallistas, cliente), los aspectos del sistema que se tendrán en cuenta en el desarrollo de esta tesis (planificación de la producción, logística de distribución, logística inversa, transporte, carga, etc.) y la manera en que se desarrollan. Así, la planeación de la producción detallada se considera en un solo nivel, teniendo en cuenta que hay materiales de retorno que hacen parte del producto final y que el transporte para la distribución y recogida de productos de retorno (como parte de la función de aprovisionamiento) se realiza por carretera.

2.1.1 Productos

Se considera la existencia de una amplia gama de productos, algunos de los cuales incluyen partes provenientes de otros eslabones en niveles inferiores de la cadena de suministros (materiales de retorno). La naturaleza de los productos determina su flujo a lo largo de la cadena de suministros. En esta tesis en particular se va a trabajar con productos que deben utilizar materiales de retorno en su fabricación y esta característica puede influir en que el producto pueda ser elaborado en una o varias fábricas. No necesariamente todas las plantas pueden fabricar todos los tipos de productos y algunos eslabones no trabajan con algunos productos específicos.

Los productos que fluyen a lo largo de la cadena de suministros pueden clasificarse según su naturaleza en diferentes familias, y según su procedencia en: productos de elaboración propia (en sus propias plantas de producción) y productos comprados a terceros.

En esta tesis la tipología de productos que se tratará se clasifica en tres categorías: *productos que incluyen materiales de retorno*, *productos que no incluyen materiales de retorno* y *materiales de retorno*. Se tendrá en cuenta su impacto en la planificación de la producción y la logística.

2.1.2 Eslabones de la cadena de suministros

La cadena de suministros objeto de estudio es una cadena multiescalón (presenta varios niveles) que lleva el producto desde las plantas de fabricación hasta los clientes finales, un ejemplo de los flujos físicos de materiales a través de la cadena de suministros se presenta de manera simplificada en la figura 2.1.

A efectos de particularizar el modelo multiescalón de la cadena de suministro en la figura 2.2 se presenta un ejemplo típico de este tipo de cadenas.

A continuación se describen brevemente, a manera de ejemplo, los niveles en los que se ubican los diferentes eslabones de la cadena de suministros.

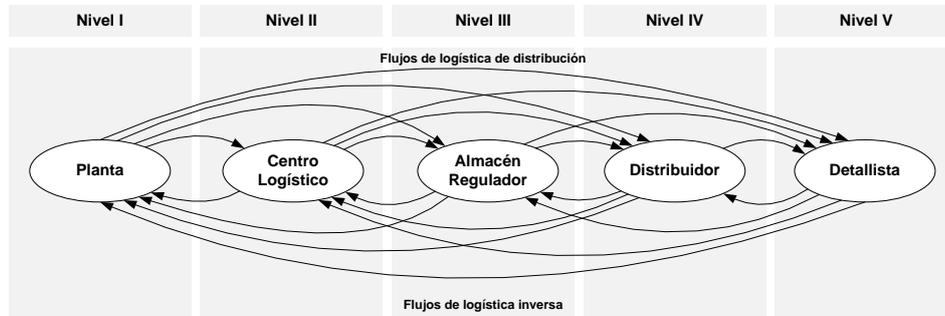


Figura 2.1: Representación simplificada de la cadena de suministros

Nivel I: En el primer nivel de la cadena de suministros están las plantas de fabricación, en las que se lleva a cabo la producción de los productos de fabricación propia y los almacenes en los que se acopian los productos comprados a terceros (cuando por su naturaleza o por razones contractuales no pueden producirse en las plantas). A partir de este nivel se inicia el tránsito de los productos en la cadena de suministros.

Nivel II: Centro logístico, en él se consolidan ciertos productos provenientes de las plantas y almacenes antes de seguir su camino hacia los demás niveles de la cadena de suministros.

Nivel III: Almacenes reguladores, realizan un papel similar al del centro logístico al recibir productos de las diferentes familias de los eslabones anteriores, se da este nombre a los que dependen directamente de la empresa.

Nivel IV: Distribuidores, acercan el producto proveniente de los niveles precedentes a los detallistas, pueden ser operadores logísticos subcontratados.

Nivel V: Detallistas, se encargan de llevar el producto a su consumidor final y de recuperar desde éste los productos de retorno. Son independientes y tienen relación directa con el cliente final, y por ello con la demanda y con los retornos.

Nivel VI: Cliente o consumidor final, es la razón de ser de la cadena de suministros pues esta se hace para satisfacer sus necesidades.

Como puede verse, mediante la logística de avance, cada nivel envía productos “aguas abajo” hacia todos los demás niveles. “Aguas arriba” se presenta un flujo de materiales de retorno que van desde los detallistas hasta las plantas, en las cuales se lleva a cabo su preparación y reutilización. Aunque puede presentarse

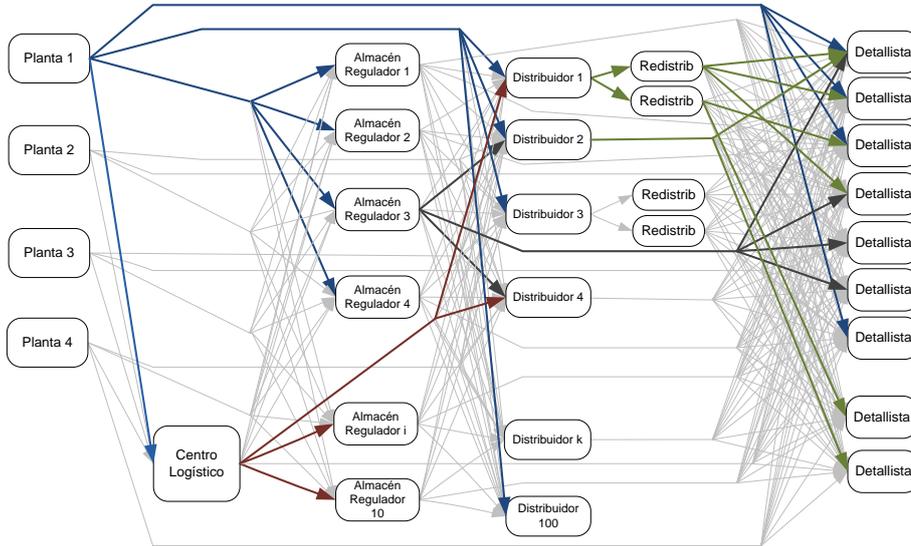


Figura 2.2: Cadena de suministros del sistema.

no se considera la existencia de flujos de productos, o materiales de retorno, entre eslabones del mismo nivel de la cadena de suministros.

2.1.3 Flujo de los productos en la cadena de suministros

En el primer eslabón de la cadena de suministros, las plantas de producción elaboran diferentes tipos de producto, algunos de los cuales utilizan materiales de retorno; el centro logístico sirve para el almacenamiento temporal de algunas referencias, que poseen unas características de almacenamiento o distribución específicas, luego continúan su distribución a lo largo de la cadena de suministros; los demás niveles intermedios de la cadena de suministros se encargan de recibir y enviar todo tipo de productos hacia adelante de modo que se satisfaga la demanda de los detallistas y; los detallistas reciben y comercializan los tipos de productos que corresponden a su naturaleza.

Algunos de los productos pueden ser enviados desde las plantas de fabricación directamente a los detallistas, cuando los volúmenes de la demanda así lo ameriten, como también al centro logístico y demás niveles de la cadena de suministros; los productos comprados a terceros inician en un almacén particular y son enviados de la misma forma hacia adelante.

No se considera una asociación estricta entre un *cliente* y un *proveedor* dentro de la cadena de suministros, como se evidencia en la figura 2.2. En todos los casos, la procedencia de los productos podrá cambiarse hacia otro eslabón en un nivel superior de la cadena de suministros cuando se supera un determinado número de unidades de producto.

Cuando la demanda de un cliente no puede ser satisfecha en su totalidad por un único proveedor, o si por razones de coste conviene hacerlo, un cliente puede ser atendido por varios proveedores pertenecientes a eslabones de los niveles anteriores de la cadena de suministros. En otras palabras se permite la realización de entregas parciales usando varios vehículos.

2.2 Logística de distribución

La logística, tanto de distribución como de aprovisionamiento, resulta de gran importancia pues por una parte debe satisfacer los requerimientos de la demanda y por otra debe proveer de algunos de los materiales que constituyen algunos de los productos. La gestión de la logística tiene en cuenta los flujos físicos de materiales (transporte y distribución) y las existencias (inventarios).

En la figura 2.3 se presenta en forma más detallada la forma en que son llevados los productos finales y los productos de retorno, tanto desde el punto de vista físico como en lo que respecta al tiempo.

En lo que respecta al transporte como parte del sistema logístico, es necesario conocer las características de los operadores logísticos (incluida la empresa misma), en lo relacionado con su flota, capacidad, conductores, horarios, etc.

2.2.1 Características de la flota

La flota a emplear depende de las necesidades de transporte de producto de la empresa. Tanto ella como los operadores logísticos contratados deben adaptarse para dar satisfacción a la demanda por parte de los clientes y a los requerimientos de materiales que, como flujos de retorno, deben ser llevados a las plantas de producción.

Las características de la flota propia y la de los operadores logísticos contratados deben conocerse por constituir uno de los insumos de planeación de rutas: tipo de vehículo, capacidades, velocidades, costes fijos y costes variables de operación, accesibilidad a las diferentes instalaciones, etc. Las rutas deben generarse teniendo en cuenta las restricciones de accesibilidad de los vehículos a ciertos lugares en que se encuentran los correspondientes eslabones de la cadena de suministros.

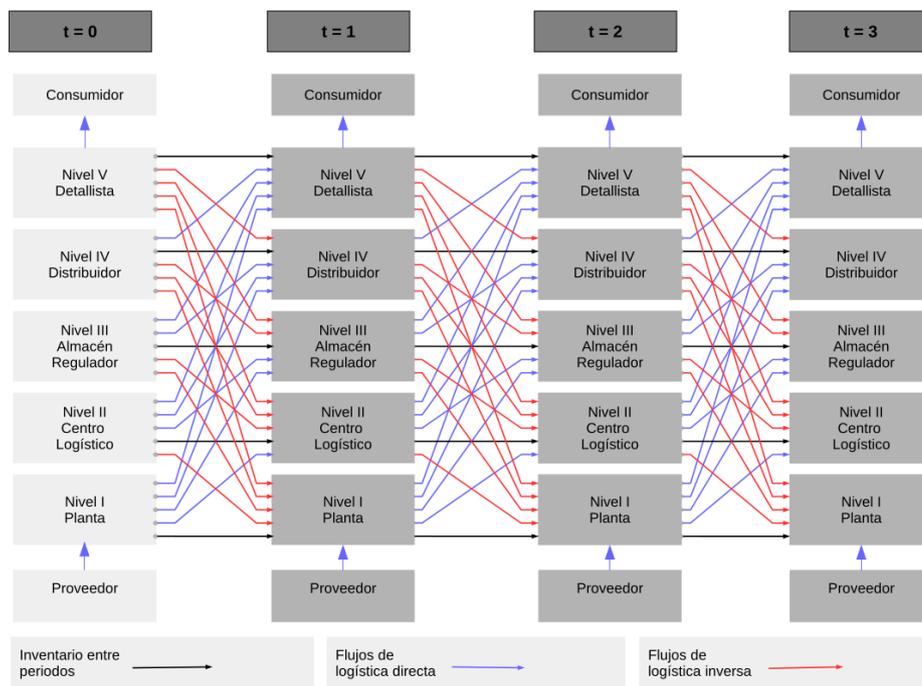


Figura 2.3: Cadena de suministros y flujos de materiales en el tiempo

A manera de ejemplo se considera una flota heterogénea en este tipo de cadena de suministro, si se tiene en cuenta la capacidad:

- Remolque: 24.800 kgs.
- Camión: 14.500 kgs. (70 % coste)
- Preventa: 3.500 a 4.800 kg

Otras categorías que incluyen la disponibilidad, como clasificación ABC, podrían considerarse, por ejemplo:

- Vehículos tipo A: Más de 15 viajes al mes
- Vehículos tipo B: Entre 2 y 15 viajes al mes
- Vehículos tipo C: Menos de 2 viajes al mes

2.2.2 Configuración de la carga

Las primeras limitaciones a la hora de definir la configuración de la carga a transportar están definidas por las dimensiones físicas del vehículo: capacidad en masa y volumen, y la forma en que ésta es colocada.

Al establecer la carga que debe ir en un vehículo determinado, pueden tomarse decisiones como: maximizar la carga hasta llegar al peso o volumen límite autorizado, maximizar la capacidad en los palés, minimizar el número de referencias transportadas por vehículo. Debe considerarse el tipo de vehículo (tráiler, camión, etc.) el acceso de la carga por puerta trasera o lateral, y la accesibilidad a las instalaciones de los proveedores y receptores, entre otras.

Otros condicionamientos en la configuración de la carga pueden obedecer a las políticas de la organización, como por ejemplo:

- Lotes mínimos de reparto,
- Número de referencias por camión,
- Número de referencias por destino,
- Condicionamientos temporales, etc.

En la cadena de suministros objeto de la presente tesis se considera el envío directo de un tipo de producto desde las plantas hasta los detallistas (clientes) a partir de

un número mínimo de palés, mientras que los pedidos de menor tamaño pasan necesariamente por el centro logístico u otro eslabón intermedio de la cadena de suministros. Así, deberá enviarse este tipo de producto al centro logístico para dar cobertura a pedidos menores de pequeños distribuidores, para evitar roturas por disrupción de la producción.

2.3 Logística inversa

Los flujos de materiales *aguas arriba*, como parte de la *logística inversa* en lo que tiene que ver con distribución física, incluyen la reutilización de material de embalaje secundario (utilizado para llevar los productos desde un emisor a un receptor) bien dentro de la planta de producción o a lo largo de la cadena de suministros (Kroon y Vrijens, 1995). Así, además de los materiales de retorno que hacen parte del producto, los palés y las cajas deben regresarse *aguas arriba* para su reutilización en el transporte y manejo de materiales. Los materiales de retorno deben reemplazarse cuando sea necesario en virtud de su deterioro.

Debido a que *algunos productos poseen elementos que se utilizan una y otra vez, su aprovisionamiento tiene lugar mediante los flujos inversos que llegan a las plantas, o mediante la compra a terceros.* Para este tipo de productos la compra a terceros tiene lugar ante su destrucción o deterioro, la no devolución por parte del cliente final, o cuando fuertes variaciones de la demanda lo exigen.

Las actividades de logística inversa que se consideraran en el problema a abordar incluyen las actividades de clasificación o destrucción, traslado a la planta y limpieza. Estas operaciones son necesarias para la reutilización de los elementos en el proceso de producción.

El aprovisionamiento debe realizarse de acuerdo con los planes y programas de producción, lo que implica la necesidad de que exista cierto grado de sincronización entre la gestión de la logística inversa y la gestión de la producción.

Los materiales que retornan para ser reutilizados pueden ser devueltos hacia las plantas por el mismo transportador u operador logístico que hace la distribución o por cualquiera que se designe para tal fin. Pueden existir rutas de entrega y recogida o solamente de entrega o de recogida, dependiendo de las necesidades de producción y de la demanda.

2.4 Ruteo de vehículos

Como decisiones de primer orden en la gestión de la logística de la cadena de suministros se tienen:

- Dimensionamiento de la flota de camiones,
- Planificación de las cargas de los vehículos,
- Establecimiento de rutas.

La entrega de los productos *aguas abajo* y la recolección de los materiales que deben ser llevados de vuelta a las plantas de producción, requiere el establecimiento de rutas, que usualmente poseen varias paradas para carga y descarga.

La duración de las paradas varía dependiendo del tipo de operación (carga o descarga), o del tipo de producto entregado o recogido, entre otros factores. Éstas definen la ruta y deben ajustarse a ventanas de tiempo propias de las instalaciones, pues suelen tener horarios específicos de carga o descarga, bien sea por la naturaleza de la operación, horarios comerciales, o bien por restricciones de carácter gubernamental entre otros motivos. También es posible la existencia de ventanas de tiempo asociadas a los vehículos con el fin de garantizar la duración de las jornadas de trabajo.

Como política de ruteo puede establecerse un número máximo de paradas por ruta; las rutas pueden ser de múltiples paradas, de parada única, con retorno o sin retorno, etc. El tipo de ruta obedece a políticas de la empresa o a criterios objetivos como el coste total de operación, entre otros.

La fragmentación de las entregas (*split*) es esencial en el sistema, pues no siempre es posible satisfacer la demanda de un cliente dentro de la cadena de suministros empleando un solo vehículo. Bien porque los productos requeridos por el cliente (eslabón superior) proceden de diferentes orígenes, porque resulta más económico el abastecimiento haciendo uso de varios vehículos, o bien porque la demanda de ese cliente supera la capacidad de carga de los vehículos asignados.

Las decisiones operativas que tienen lugar tras la generación de la demanda, en lo que respecta a la determinación de una ruta, incluyen: vehículo utilizado y operador con quien se envía, origen y destino del envío, cantidades de cada producto a entregar o recoger, fecha y hora de salida y llegada. Cuando existe más de una entrega o requerimiento de recogida que puedan ser realizados con el mismo vehículo en la misma ruta, la ruta se consolida especificando las paradas adicionales.

Las decisiones asociadas con la generación de una ruta dependen de las distancias (tiempos de desplazamiento) entre los puntos a visitar, el coste del transporte, las ventanas de tiempo, etc.

2.5 Inventarios

Los inventarios sirven para estabilizar el sistema ante las fluctuaciones de la demanda, por lo cual la periodicidad de reaprovisionamiento puede estar condicionada por factores como las fechas de caducidad de los productos, los tamaños de lote mínimos a entregarse, entre otros aspectos.

Con el fin de garantizar la satisfacción de la demanda pueden adoptarse diferentes políticas de reaprovisionamiento, es posible establecer envíos periódicos, envíos a través del sistema de preventa, o cuando sea necesario de acuerdo con una política fija.

Se tienen dos tipos de inventario principales, el de productos terminados y el de productos de retorno.

Inventario de seguridad. Dentro de las políticas consideradas está la existencia de un inventario de seguridad, que permite adaptarse a las fluctuaciones de la demanda, con base en un indicador de cobertura establecido para el sistema y en la demanda de productos para cada centro.

$$Cobertura = \frac{Existencias}{Venta\ media} \quad (2.1)$$

El indicador de cobertura se refiere al número de días que pueden abastecerse únicamente con el inventario de seguridad (ecuación 2.1). Así, para determinar los inventarios de seguridad es preciso conocer la demanda diaria en cada uno de los niveles de la cadena de suministros, a manera de ejemplo para cada nodo (i) de la cadena de suministros puede tenerse un parámetro días de cobertura (d_i) con sus respectivos límites inferior y superior (min_i, max_i).

2.6 Planificación de la producción

La planificación de la producción en el sistema logístico analizado consiste en decidir las cantidades de producto a elaborar, junto con los materiales, mano de obra, maquinaria y demás recursos necesarios para satisfacer una demanda conocida o pronosticada. En vista de ello y teniendo en cuenta la naturaleza del problema de investigación, se considera como tal la definición de las cantidades a producir, y de material que se precisa acopiar en sentido inverso al flujo de la cadena de sumi-

nistros de modo que se satisfaga la demanda (en la medida de lo posible) teniendo en consideración las restricciones de capacidad de fabricación y almacenamiento de las diferentes instalaciones que hacen parte de la cadena de suministros. Se pretende obtener el menor coste posible para ello.

Tratándose de un sistema logístico que incluye varios eslabones es necesario que se realice también la planeación de los requerimientos de distribución (DRP, del inglés *Distribution Requirement Planning*), como una forma de soporte a la toma de decisiones para planear y controlar el inventario en los centros de distribución en el corto plazo. Así, además de los volúmenes de producción se requiere determinar qué, cuánto, y cuándo se debe enviar desde y hacia los diferentes eslabones de la cadena de suministros (tanto productos como materiales de retorno).

2.6.1 DRP

La DRP enlaza los eslabones de la cadena de suministros brindando registros de planeación que llevan la información de la demanda de los puntos receptores a los de suministros y retorna la información de la oferta a los puntos de recepción. Para el caso que nos ocupa se propone un modelado bajo la lógica de los inventarios administrados por el proveedor (VMI, del inglés *Vendor Managed Inventory*), con el cual el reabastecimiento del inventario estaría bajo un control centralizado.

La DRP parte de la información de la demanda independiente, es decir que se deriva de los pronósticos de demanda, cuyo análisis no se incluye en el objeto de la presente tesis. DRP planifica las futuras necesidades de reabastecimiento, estableciendo las bases para mejores decisiones en el despacho vehicular.

2.7 Parámetros y variables de interés

Con el fin de encontrar una solución eficiente en términos de coste y teniendo en cuenta la naturaleza del problema se consideran como objeto de decisión las siguientes variables y parámetros, de las cuales se generan los informes para la evaluación del desempeño del sistema logístico.

2.7.1 Parámetros

A continuación se presenta una lista de los principales parámetros del sistema, los cuales han sido clasificados en varias categorías para facilitar su enumeración.

Productos

- Tipo de cada uno de los productos.
- Tiempo de caducidad.
- Tiempo de respuesta ante un pedido.
- Peso de cada uno de los tipos de producto y de embalaje.
- Volumen de cada uno de los tipos de producto y de embalaje.

Instalaciones de la cadena de suministros

- Tipo de miembro de la cadena de suministros.
- Ubicación geográfica.
- Ventanillas horarias para cada eslabón de la cadena de suministros.
- Capacidad de producción y almacenamiento en las plantas de procesamiento.
- Capacidad de almacenamiento de las demás instalaciones.
- Tiempos de preparación de lotes de producción y tiempos de producción.
- Lotes mínimos de producción
- Referencias que se manejan en cada centro.
- Demanda diaria de producto final o de productos de retorno según corresponda.
- Recepción de productos reutilizables por los detallistas.
- Distancias entre instalaciones.

Vehículos

- Flota de camiones disponible, asociada a cada operador logístico.
- Capacidad de cada uno de los tipos de vehículo (peso, volumen, número de palés).
- Velocidad normal de operación (Tiempos en recorrer una distancia dada).
- Tiempos y costes de parada para carga y descarga, por parada o por tipo de producto, etc.
- Cantidad de viajes máxima y mínima por camión.
- Exigencias debidas al tipo de carga/descarga en plantas e instalaciones de la cadena de suministros (trasera, lateral, tráiler, camión, etc.)
- Costes logísticos de transporte por distancia.

Políticas asociadas con el ruteo

- Tipos de rutas (parada única, múltiples paradas, lanzaderas, etc.)
- Volúmenes máximos o mínimos a partir de los cuales se opera desde un eslabón determinado de la cadena de suministros.
- Lotes mínimos de reparto.
- Número máximo y mínimo de referencias por camión.
- Número máximo y mínimo de referencias por destino.
- Número máximo de paradas.
- Políticas de volumen de transporte de material de retorno.
- Coste de clasificación y separación de material de retorno por referencia.

2.7.2 Variables

Las variables más representativas del sistema logístico, sobre las cuales se ha de intervenir para lograr una gestión exitosa son:

- Volumen de producción (o compra) de cada producto en el primer nivel de la cadena de suministros.
- Inventario de cada producto en cada nivel de la cadena de suministros.

- Asignación y utilización de vehículos.
- Tipos de rutas empleadas.
- Cantidad de los productos de cada tipo enviados a las demás instalaciones de la cadena de suministros y de los recibidos desde estas.
- Origen y destino de los envíos, paradas, vehículo, operador con quien se envía, fecha y hora del envío.
- Configuración de carga.
- Distancia recorrida (Km)

2.7.3 Reportes para evaluación y control

Con el fin de realizar una gestión eficiente del sistema se propone la generación de reportes periódicos de gestión de la producción en cada una de las plantas de producción y centros de compras a terceros, que incluyan la producción (compra de productos a terceros), la utilización de la capacidad, el volumen de inventario de cada uno de los productos en cada uno de los centros, entre otros aspectos básicos.

Es necesario además el establecimiento de reportes, diario y mensual de:

- Utilización de vehículos,
- Tipos de rutas empleadas, por origen y por destino,
- Distancia recorrida (Km),
- Referencias que entran y salen de cada punto,
- Costes de transporte diarios o por unidad transportada,
- Capacidades (real, óptima, ociosa, etc.).

2.7.4 Cálculo de coste total

El coste de total de la producción y de la logística directa e inversa es una medida del desempeño de la gestión de la cadena de suministros. Con el propósito de cuantificar el coste total se precisan sus elementos fundamentales y la manera en que contribuyen a él.

Los costes totales a minimizar incluyen lo relacionado con la producción, la distribución y la recogida. Entre ellos se consideran:

1. Los costes de producción de un lote de producto,
2. Los costes asociados a la gestión y el mantenimiento de inventarios,
3. Los costes asociados al transporte.

Los costes asociados a la producción son los de preparación de un lote y los costes variables de producción. Estos dependen del tipo de producto y de la planta en la cual son elaborados.

Como costes asociados al mantenimiento de inventario se consideran: el coste por unidad de producto por unidad de tiempo, el coste de déficit por rotura de inventarios y el coste de los materiales requeridos para reponer los materiales de retorno faltantes. *El coste de adquirir nuevos materiales reutilizables se considera un coste de déficit que tiene lugar cuando estos son insuficientes para satisfacer los requerimientos de producción.*

Los costes de almacenamiento de productos y de los materiales de retorno, hacen parte de los costes de logística. En el caso de la logística inversa se incluyen también los de separación o clasificación de los mismos, por referencias, antes de ser enviados “aguas arriba”.

Los costes asociados al transporte y distribución de los productos “aguas abajo” y de los materiales de retorno “aguas arriba”, incluyen:

- Coste fijo de transporte asociado al uso de cada vehículo,
- Costes variables de transporte asociados a la operación de cada vehículo en su ruta específica (dependiente de la distancia recorrida o del tiempo empleado),
- Costes de cargue y descargue de las mercancías (costes de parada),
- Costes de espera para descarga o carga cuando se llega a un nodo antes del límite inferior de la ventana de tiempo rígida, y
- Costes de penalización por violación de las ventanas de tiempo suaves (llegada temprana o salida tardía).

Los costes de cargue y descargue se asumen constantes e independientes, pero pueden ser modelizados como parámetros dependientes de la operación, lugar o tipo de vehículo, en trabajos futuros.

2.8 Descripción del estudio

El problema a resolver obedece a dos áreas fundamentales de la empresa: la gestión de la producción y la gestión de la logística. Desde el punto de vista de la gestión de la producción y el transporte, el problema se presenta teniendo en cuenta la clasificación propuesta por Mula, Peidro, Díaz-Madroñero, y Vicens (2010); y, desde el punto de vista del ruteo de vehículos con base en la taxonomía propuesta por Eksioglu, Vural, y Reisman (2009).

Se realiza una clasificación de la cadena de suministros objeto de estudio a partir de los elementos identificados en las mencionadas publicaciones, por lo cual se presentan cuadros sinópticos para cada una de las categorías, en las figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9.

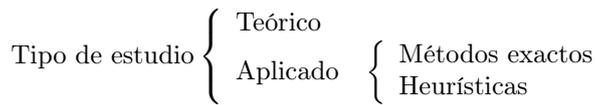


Figura 2.4: Tipo de estudio

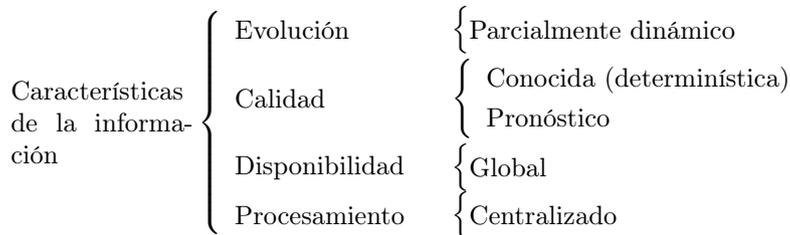


Figura 2.5: Características de la información

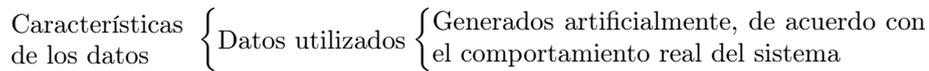


Figura 2.6: Características de los datos

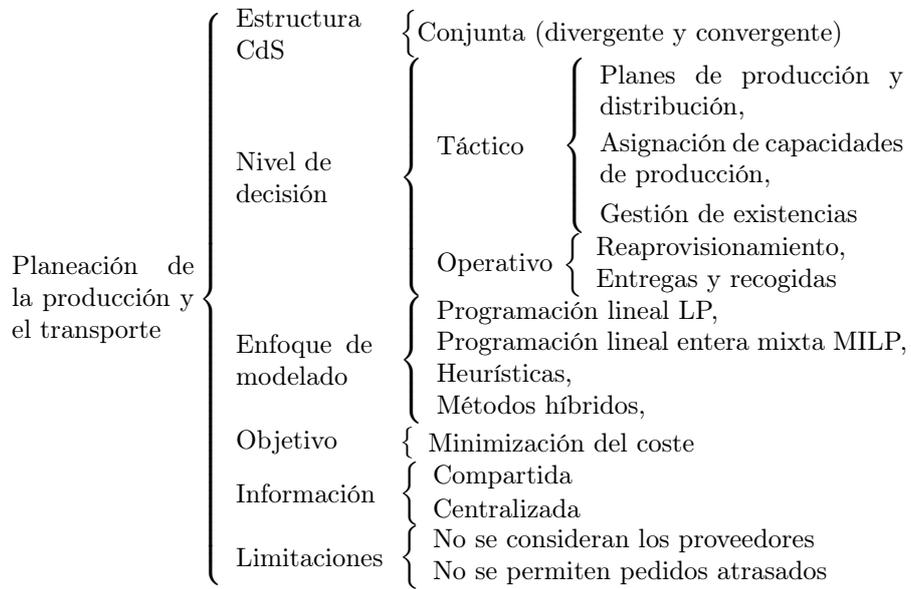


Figura 2.7: Planeación de la producción y el transporte en la cadena de suministros

Características del sistema	{	Número de paradas desconocido	{	Condicionado a la jornada de trabajo, pero puede parametrizarse
		Fragmentación de las entregas		Se pueden fragmentar las entregas a los clientes, a conveniencia
		Cantidad demandada por el cliente		Se asume determinística, su valor puede obedecer a información de preventa o a la aplicación de técnicas de pronóstico
		Tiempos de servicio		Determinísticos, pueden depender del tipo de vehículo o de la magnitud de la carga
		Ventanas de tiempo		Ventanas rígidas Ventanas suaves Mezcla de ambos tipos
		Horizonte de tiempo		Periodo único, o Múltiples periodos
		Viajes de regreso		Se pueden hacer recogidas y entregas en la ida o el regreso a la planta, y de manera simultánea Un vehículo sólo puede visitar un nodo una vez en una ruta

Figura 2.8: Características del sistema

Características físicas del problema	{	Diseño de redes de transporte	{ Dirigidas o no, dependiendo de la simetría de la matriz de distancias
		Localización de clientes	{ En los nodos
		Localización geográfica	{ Mixto, teniendo en cuenta patrones rurales o urbanos
		Puntos de origen	{ Múltiple
		Tipo de ventanas de tiempo	{ En instalaciones En conductores o vehículos
		Número de vehículos	{ Determinado
		Consideraciones de capacidad	{ Restricciones en peso y volumen
		Homogeneidad de la flota	{ Heterogénea, vehículos de diferentes capacidades y costes. Clientes específicos que sólo pueden atenderse con determinados tipos de vehículo.
		Tiempo de viaje	{ Determinístico
		Coste de transporte dependiente de:	{ Tiempo de viaje Distancia Tipo de vehículo Operaciones de cargue y descargue Tardanza o anticipación

Figura 2.9: Características físicas del problema

2.9 Conclusiones

A manera de conclusión, el sistema a modelizar es un sistema de producción, distribución de producto y recogida de materiales de retorno, cuyas características esenciales se resumen a continuación:

- Múltiples productos, algunos de los cuales implican el uso de materiales de retorno.

- Estructura de la cadena de suministros de varios eslabones, con múltiples orígenes y destinos en todos sus eslabones. Cada eslabón actúa como emisor de producto hacia los correspondientes eslabones superiores, y como receptor de productos de retorno que son llevados en sentido contrario.
- Sistema multiplanta, la cadena de suministros inicia en una o varias plantas de producción, de capacidad disponible y de almacenamiento restringidas.
- La cantidad demandada, producida o almacenada en cada uno de los eslabones de la cadena de suministros obedece a una configuración jerárquica flexible y depende de la demanda independiente que se genera en cada uno de los detallistas (como eslabón superior de la cadena).
- La flota de vehículos es determinada, de naturaleza heterogénea debido a que existen diferentes tipos de vehículos disponibles para el transporte, con diferencias en capacidades (volumen y peso) y en costes (fijos y variables), como consecuencia de las características físicas de un nodo de la cadena de suministros o debido a normativas existentes en una localización geográfica, es posible que un cliente no pueda ser atendido por ciertos tipos de vehículo.
- Los vehículos pueden realizar de manera simultánea la entrega de pedidos y la recolección de los productos de retorno siempre que sea factible. También es posible realizar rutas en las cuales sólo se realiza entrega de producto o recogida de productos de retorno con destino de regreso a la planta, cuando por economía y de acuerdo con las restricciones del sistema sea necesario.
- Las rutas pueden ser dirigidas o no, dependiendo de la simetría y los valores de la matriz de distancias entre las instalaciones, los clientes pueden estar ubicados tanto en un entorno rural como en un entorno urbano.
- El número de paradas en una ruta es variable y desconocido, para ajustarse a las jornadas de operación de las instalaciones y los vehículos, aunque puede limitarse dependiendo de las políticas de operación.
- La fragmentación de las entregas (*split*) es esencial, no siempre es posible satisfacer la demanda de un cliente empleando un solo vehículo.
- La demanda se considera determinística para efectos de la modelización. Asimismo, los tiempos de parada por servicio (carga o descarga) se consideran determinísticos e iguales en los diferentes eslabones, aunque es posible expresarlos como una función de la cantidad de productos entregados y de los productos de retorno recogidos, o de las instalaciones en que tienen lugar, etc.
- Existen ventanas de tiempo las cuales se presentan en todos los eslabones de la cadena de suministros, y en los vehículos (conductores) que prestan el

servicio de transporte, entrega y recogida. Existen dos tipos de ventanas de tiempo: ventanas suaves o flexibles y ventanas rígidas, que coexisten en las diferentes instalaciones y/o operadores logísticos.

- Por tratarse de un problema en el que las decisiones obedecen a un horizonte de tiempo puede decirse que la información es dinámica, y determinística.
- La información se considera disponible globalmente y su procesamiento centralizado. Para la evaluación se utilizan datos generados artificialmente con base en comportamientos propios del sistema.
- El estudio realizado es de tipo teórico y de aplicación de métodos exactos y heurísticos.
- Los costes de transporte dependen del tipo de vehículo, del tiempo de viaje o de la distancia y la tardanza o prontitud inherente a las ventanas de tiempo suaves; los de producción, de la planta y el producto a elaborar.

Por otra parte, de acuerdo con la revisión de Mula y cols. (2010) el sistema modelado viene a subsanar vacíos de investigación en lo que respecta a:

1. Optimización de la planificación de la producción y el transporte de manera conjunta, optimizar simultáneamente la planificación del transporte y la producción más allá de considerar los costos y capacidades asociadas con recursos de transporte sin modelar sus propias características.
2. Integración de los niveles de planificación táctico y operativo en el contexto de una cadena de suministros;
3. Consideración de las características del transporte (configuración de las cargas y el ruteo de una flota de vehículos heterogénea) entre los distintos nodos de la cadena de suministros;
4. Planificación centralizada de la cadena de suministros que implica que la información sea compartida entre los nodos de la cadena de suministro;
5. Solución mediante procedimientos que integran programación matemática y algoritmos evolutivos con el fin de optimizar los costes.

Además, se propone la integración de la función de *aprovisionamiento de materiales de retorno* que hacen parte de algunos de los productos elaborados.

En el Capítulo 3 se presenta un análisis del estado del arte en los temas de planeación de la producción, logística inversa y ruteo de vehículos dado que son temas fundamentales a través de los cuales se resuelve el problema objeto de estudio.

Capítulo 3

Planeación de la producción, logística inversa y ruteo de vehículos

En este capítulo se presenta la revisión del estado del arte para los tres ejes temáticos desde los cuales se procederá a la solución del problema objeto de estudio. La sección 3.1 presenta una introducción a la planeación de la producción. En la sección 3.2 se presenta una descripción de la logística inversa como función de la organización, poniendo de manifiesto aquellos aspectos que tienen mayor relevancia para la distribución y recolección asociadas a una cadena de suministros cuyo aprovisionamiento depende parcialmente de los materiales de retorno. Finalmente, en la sección 3.3 se presenta el problema de ruteo de vehículos y con él una caracterización de modelos empleados para sus múltiples versiones y métodos de solución utilizados.

3.1 Planeación de la producción

La planeación de la producción, consiste en la determinación de los aspectos relacionados con la adquisición de recursos y materias primas junto con las actividades de producción requeridas para transformar las materias primas en bienes finales satisfaciendo la demanda de los consumidores en la forma más eficiente o económica posible (Pochet, 2006). Algunas de las decisiones a tomar están relacionadas con el tamaño de los lotes de producción de los diferentes productos a ser manufacturados o procesados, el momento en el que deben ser producidos, la máquina

o planta en la cual tiene lugar la producción o la secuencia en que debe producirse para alcanzar los volúmenes establecidos mediante los pronósticos de demanda de manera económica, en el corto o en el mediano plazo. La planeación de la cadena de suministros (SC, del inglés *Supply Chain*) es similar a la planeación de la producción pero extiende su campo de acción al incorporar las decisiones asociadas con el aprovisionamiento y la distribución.

El propósito de la gestión de la producción es obtener beneficios económicos a la vez que se da satisfacción a las necesidades del cliente, y para alcanzarlo se recurre a sistemas de planeación de manufactura, cada vez más sofisticados, que permiten incrementar la productividad y la flexibilidad conjuntamente.

La planeación suele darse en varias etapas: una primera consiste en la generación del programa maestro de producción (MPS, del inglés *Master Production Schedule*), con el cual se planea la producción a nivel de producto terminado, para satisfacer la demanda y las necesidades de inventario. A continuación, con el plan de requerimiento de materiales (MRP, del inglés *Material requirement Planning*) se determina cuánto y cuándo producir u ordenar de cada producto intermedio o materia prima a lo largo del horizonte de planeación. Finalmente, debe llevarse a cabo la planeación detallada.

Pochet (2006) presenta un modelo de dimensionamiento del lote, multinivel y multiproducto con restricciones de capacidad, cuyo propósito es optimizar simultáneamente la producción y compra de todos los productos, desde las materias primas hasta los bienes finales para satisfacer la demanda externa proveniente de los clientes y la interna dependiente del proceso de producción, en un horizonte de corto plazo.

Öztürk y Ornek (2014) proponen la utilización de Sistemas de programación y planeación avanzada (APS, del inglés *Advanced Planning and Scheduling systems*) como alternativa para superar las debilidades del MRP. Para ello desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta para APS a nivel de fábrica. Primero se desarrolla un modelo básico que considera explícitamente las limitaciones de capacidad, secuencias de operación, tiempos de procesamiento y fechas de vencimiento en un ambiente multi-máquina, multi-orden, multi-producto en que una referencia puede ser procesada en un determinado conjunto de máquinas elegibles. El modelo básico se extiende incluyendo configuraciones dependientes de secuencia y tiempos de transferencia entre máquinas. También muestran una modificación que podría ser utilizada para estimar plazos de entrega para los pedidos, en caso de que no se especifiquen fechas.

Los sistemas de planeación de requerimiento de materiales y de programación de la producción deberían estar integrados, por lo cual los APS se convierten en una muy buena alternativa, los APS tienen cuatro módulos: planeación estratégica,

planeación de la demanda, planeación maestra y planeación de fábrica que les permiten realizar una programación realista.

Un problema de optimización de la planeación de la producción y el control de inventarios en una red de logística integrada que posee una ruta tradicional de logística hacia adelante, dos rutas alternativas de recuperación que incluyen reparación y remanufactura, y una ruta de disposición, es modelizado con un algoritmo entero difuso de dos fases por Niknejad y Petrovic (2014). Tal modelo de optimización es multiperiodo, con múltiples niveles de calidad, múltiples rutas de optimización, con diferentes tiempos de entrega en la red de suministros, se caracteriza por la incertidumbre en la demanda, en las cantidades recogidas y en sus calidades.

Asimismo, Ramos, Gomes, y Barbosa-Póvoa (2014) proponen un modelo para la toma de decisiones tácticas y de planeación operacional en sistemas de logística inversa, teniendo en cuenta objetivos económicos, ambientales y sociales. Tales decisiones implican el establecimiento de áreas de servicio para cada depósito y, la definición y programación de rutas para cada vehículo.

Para Watson y Polito (2003), la planeación de requerimientos de distribución (DRP, del inglés *Distribution Requirement Planning*) controla el flujo de bienes entre manufactura, centros de distribución y otras instalaciones con inventario en una forma desfasada en el tiempo, llegando a ser un método efectivo para control de inventarios en un ambiente de distribución física multiproducto, multinivel. Su lógica es que la visibilidad total de los niveles de inventario permite a los fabricantes hacer envíos de sólo lo que es necesario para satisfacer la demanda actual, reduciendo la inversión en inventarios, los requerimientos de stock de seguridad y los costes de transporte. A la vez que presentan beneficios que se deben a la integración de los pronósticos de demanda en la programación de la producción y al balanceo de las necesidades de las instalaciones con las capacidades de ambas plantas y proveedores.

3.2 **Lógica inversa**

La evolución del concepto de logística inversa (RL, del inglés *Reverse logistics*) es analizada a partir del documento propuesto por Carter y Ellram (1998), en el cual se aboga por la necesidad de un cuerpo teórico al respecto, pasando por las definiciones del grupo de investigación RevLog y el consejo ejecutivo de logística inversa (Rogers y cols., 1999), y lo propuesto en las investigaciones de Dowlatsahi (2000), Fleischmann (2000) y De Brito, Marisa P. (2003). Los mencionados documentos construyen la definición actual de lo que se entiende por logística inversa, destacando sus características principales.

Para Carter y Ellram (1998), no se había dado una visión holística y teóricamente fundamentada de la logística inversa, pues entonces la mayoría de los artículos se

publicaban en revistas comerciales más que en revistas académicas. No existía un cuerpo teórico, exceptuando lo propuesto por Drumwright (1994) quien inició un desarrollo incipiente, principalmente basado en los factores internos que afectan los esfuerzos de una empresa en logística inversa. En consecuencia ellos proponían un modelo con base en cuatro elementos: *regulación, clientes, políticas empresariales e incertidumbre*; y cinco restricciones: *calidad de las entradas, coordinación vertical, compromiso de los interesados, apoyo gerencial y sistemas de incentivos* (Carter y Ellram, 1998).

Kroon y Vrijens (1995) definen también la *distribución inversa* que causa el flujo de bienes e información en la dirección opuesta a las actividades normales de logística.

Algunas definiciones de logística inversa, que permiten a Fleischmann (2000) precisar el concepto, son:

“El término logística inversa hace referencia al papel de la logística en reciclaje, disposición de residuos, y gestión de materiales peligrosos; una perspectiva más amplia incluye todos los aspectos relacionados con las actividades logísticas llevadas a cabo en reducción en la fuente, reciclaje, sustitución, reutilización y disposición de materiales” (Stock, 1998).

“Logística inversa es el movimiento de bienes desde un consumidor hacia un productor en un canal de distribución” (Pohlen y Farris, 1992).

“Logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y coste efectivo del flujo de materias primas, inventario en proceso, bienes finales e información relacionada desde el punto de consumo al punto de origen con el propósito de recuperar valor o disponer apropiadamente” (Rogers y cols., 1999).

Las tres definiciones mencionadas obedecen a criterios diferentes que delimitan lo que es la logística inversa. Stock (1998) enfatiza en la reducción de residuos y la coloca en el contexto de gestión ambiental; Pohlen y Farris (1992) hacen referencia a la dirección en la que fluyen los bienes, en relación a las posiciones en la cadena de suministro de quien envía y quien recibe, y Rogers y cols. (1999) la ven como la gestión del flujo de bienes que permite generar un ciclo cerrado en la cadena de suministro, con su consecuente recuperación de valor. Las tres incluyen flujos de bienes usados que regresan al fabricante y aunque son diferentes ninguna implica a las demás, así: la primera, no incluye los productos que regresan sólo por razones comerciales; la segunda, no incluye los flujos generados por partes distintas a los fabricantes, como es el caso de retorno de empaques a detallistas; y la tercera, excluye los flujos de productos usados a compañías especializadas en recuperación, tales como empresas independientes de re-manufactura, incluidas en las otras definiciones (Fleischmann, 2000).

Fleischmann (2000) propone la definición del término, a partir de tres aspectos de la logística inversa: (1) es una forma de sistema logístico en el cual los flujos

de materiales se presentan en las dos direcciones; (2) se ocupa de flujos de bienes secundarios en el sentido que hace referencia a productos cuyo uso ya se ha realizado o es imposible, es decir, tiene que ver con el producto resultante de un uso previo planeado o deseado; (3) su objetivo es maximizar el valor económico de los productos resultantes (disposición o alguna forma de recuperación), *la logística inversa se desarrolla desde la perspectiva de la parte que recibe por lo cual es una especie de logística de aprovisionamiento.*

La logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y efectivo de los flujos y almacenamientos de bienes secundarios e información relacionada en dirección opuesta a la cadena de suministros tradicional con el propósito de recuperar valor o disponer apropiadamente. Esta definición manifiesta acuerdos con Stock (1998) en el contexto de recuperación y disposición del producto, tomándolo en un concepto más amplio como producto secundario; con Pohlen y Farris (1992) comparte el criterio de la dirección del flujo, pero incluyendo los flujos “aguas arriba” en lugar de considerar sólo los flujos del consumidor hacia el productor. Además, generaliza la definición de Rogers y cols. (1999) incluyendo otros flujos que regresan al punto de origen, tales como recuperación de productos por un competidor o en una cadena de suministros alterna (Fleischmann, 2000).

Finalmente, De Brito, Marisa P. (2003) mantiene lo esencial de las definiciones propuestas por Rogers y cols. (1999), y Fleischmann (2000), pero generaliza el hecho de ir de un punto de consumo como un punto de fabricación, distribución o uso a un punto de recuperación o de disposición apropiada. Por lo cual se da un margen a los flujos de retorno no consumidos, asimismo el uso del término *punto de recuperación* permite incluir los flujos de materiales hacia otros puntos de recuperación diferentes al original, estableciendo diferencias con las actividades de gestión de residuos. La distinción flujo en sentido contrario excluye la recuperación hacia adelante.

En adelante se asume que *la logística inversa es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y efectivo de los flujos de materias primas, producto en proceso y bienes finales e información en sentido contrario a la cadena de suministros tradicional, desde un punto de fabricación, distribución o de uso a un punto de recuperación de su valor o de disposición apropiada (De Brito, Marisa P., 2003).*

Actividades como re-fabricación, restauración y devoluciones pueden incluirse en la definición de logística inversa. La logística inversa incluye la devolución de mercancía al proceso debida a daño, inventario de temporada, reposición de existencias, salvamento y exceso de inventario. También incluye programas de reciclaje, programas de eliminación de materiales peligrosos, equipo obsoleto y recuperación de activos (Rogers y cols., 1999).

La gestión de inventarios es una de las áreas de la logística inversa y, junto con los flujos de retorno de productos usados, debe integrarse dentro de la planeación de materiales (Fleischmann y Kuik, 2003).

La logística inversa es más que reutilizar contenedores y materiales de empaque. El rediseño de empaques para usar menos material o reducir el consumo de energía y la contaminación desde el transporte son actividades importantes, pero pueden clasificarse mejor en la logística verde. *Si no hay bienes o materiales que están siendo enviados en sentido contrario, la actividad probablemente no es una actividad de logística inversa* (Rogers y cols., 1999).

Dowlatsahi (2000) resalta que la logística inversa es un concepto nuevo y la mayor parte de los artículos sobre logística inversa se encuentran en revistas relacionadas con la práctica más que en revistas académicas. Dowlatsahi (2000) también establece que: (1) se requieren operaciones de re-manufactura compatibles con los procesos actuales, en lugar de reinventar procesos completos, tales operaciones deben enfocarse a reducir las deficiencias de estos; (2) debe realizarse un análisis coste beneficio; (3) es esencial reestructurar o mejorar la lista de materiales; (4) dirección y procedimientos eficaces de organización deben afrontar las exigencias que trae consigo la logística inversa; (5) modos de transporte y redes deben ser integrados con los existentes; (6) los empaques deben ser menos costosos, fáciles de manipular y ambientalmente amigables.

3.2.1 Uso estratégico de la logística inversa

La logística inversa puede ser considerada como estratégica si se emplea para mantener el producto vigente (fresco) de acuerdo con los intereses del consumidor. La superficie comercial de una tienda es uno de sus principales activos, y el beneficio que genera puede maximizarse si se mantienen los *productos vigentes* visibles. Estratégicamente la logística inversa permite a los participantes de la cadena de suministro, tanto minoristas como mayoristas, reducir el riesgo de comprar productos que pueden dejar de ser atractivos para la venta mediante el rápido retorno de la mercancía defectuosa o no vendida. Inventarios más frescos permiten exigir mejores precios, que a su vez, protegen el margen de ganancia (Rogers y cols., 1999).

Detallistas y fabricantes liberalizan sus políticas de retorno debido a las presiones competitivas, y parte de la satisfacción de los consumidores implica que se retiren del mercado aquellos productos que consideran que ya no cumplen sus expectativas. La logística inversa también se suele utilizar para reducir los inventarios de los clientes, de modo que pueden acceder a más productos nuevos. En la industria automotriz las políticas de devolución son bastante liberales, y una red de logística inversa de gran tamaño les permite traer de regreso piezas y componentes de sus

distribuidores. Estas piezas son a menudo re-manufacturadas, para recuperar su valor o parte de él.

La responsabilidad social empresarial como parte de la estrategia competitiva lleva a las empresas a utilizar sus capacidades de logística inversa con propósitos altruistas, como la filantropía. Tales actividades incrementan el valor de su marca e incentivan la comercialización de sus productos.

Metodologías de modelado empresarial como la llamada ERE-GIO aplicable a la reingeniería e integración de la cadena de suministros permiten la integración de los flujos de logística inversa en la cadena de suministro tradicional, gracias a la modelización de los procesos de negocio y los flujos relacionados. La metodología mencionada se basa en dos grandes fases: una de ingeniería inversa de la cadena de suministro y una de ingeniería hacia adelante (De La Fuente, Ros, y Ortiz, 2010).

3.2.2 El sistema de logística inversa

En esta sección se presenta una visión del sistema de logística inversa a partir de sus componentes esenciales:

Las entradas pueden ser productos usados, materiales reciclados, o partes usadas o nuevas que fluyen a través de un sistema de logística. La naturaleza de los productos que hacen parte de los flujos de retorno suele ser estocástica en términos de calidad y cantidad. Los bienes deben ser recolectados por centros diseñados para ese fin o por los detallistas, e inspeccionados y clasificados de acuerdo con su nivel de calidad.

El proceso hace referencia a las etapas de recolección, inspección, la consolidación para la disposición, el procesamiento menor (pre-procesamiento para re-manufactura) y/o la re-manufactura de los productos. El procesamiento previo a la re-manufactura consiste en el desmontaje y separación de partes en diferentes lotes, algunas de las cuales pueden ser enviadas a un mercado de repuestos. Teniendo en cuenta que para re-manufacturar un producto se requiere de la totalidad de sus componentes (conjuntos y partes) y que los faltantes pueden ser suplidos mediante la adquisición de partes o módulos nuevos o usados, la re-manufactura incluye además la planeación de la cadena de suministros, coordinación, control de inventarios y servicios posventa.

La parte estructural del sistema tiene que ver con la localización de las diferentes partes del proceso, el proceso está condicionado por la localización de los puntos de acopio y por el desarrollo de estrategias para recoger los productos usados por un operador logístico. La optimización del proceso puede hacerse en nuevos procesos de desmontaje y ensamble, procesos de desmantelamiento y ensamble efectivos en coste, y gestión de la producción. La modularidad del producto también influye sobre la logística inversa.

Las salidas del sistema de logística inversa son los flujos de materiales deseados, resultantes de los procesos de re-manufactura y reciclaje, es decir, productos, repuestos y materiales. El precio de tales productos está sujeto a la competencia entre la empresa y los proveedores de productos nuevos y materiales.

En la tabla 3.1 Perspectivas en logística inversa, se presenta una perspectiva de la investigación en logística inversa a partir de las revisiones de la literatura desarrollada por Pokharel y Mutha (2009); Agrawal, Singh, y Murtaza (2015); Govindan, Soleimani, y Kannan (2015).

Lambert, Riopel, y Abdul-Kader (2011) analizan siete importantes elementos de la logística inversa: Coordinación del sistema, admisión (*gatekeeping*), recolección, clasificación, tratamiento, sistema de información y sistema de disposición; desde los niveles niveles estratégico, táctico y operacional. Tales aspectos son revisados en términos de un mapa de procesos genérico, aspectos económicos de decisión y medidas de desempeño. Ellos precisan que Fleischmann subdividió la RL en planeación de la distribución, control de inventarios y planeación de la producción; mientras que Meade, Sarkis y Presley (2007) la dividen en empírica, teórica, conceptual y matemática. Por otra parte, Rubio y Corominas (2008) presentan la RL y la cadena de suministros de ciclo cerrado (CLSC, del inglés *Closed Loop Supply Chain*) como gestión de la recuperación/distribución, producción y gestión de inventarios, gestión de la cadena de suministros (Lambert y cols., 2011).

Tabla 3.1: Perspectivas en logística inversa

Aspectos	Temas de interés	Áreas de estudios e investigación
Materiales y formas de recolección		
Entradas	Partes o Productos nuevos o usados Materiales reciclados.	Pronósticos del retorno de productos. Incentivos para motivar la devolución de productos una vez usados a un lugar. Depósitos reembolsables para la devolución de los productos. Métodos para calcular precios óptimos de adquisición y/o de venta para productos re-manufacturados.
Recolección	Localización de centros de acopio. Operadores y responsables. Transporte.	Localización geográfica de los centros de acopio de productos usados. Participación de los detallistas en el acopio de productos usados. Redes de transporte.
Estructura del sistema		
Adquisición del producto	Principal entrada de RL	Prácticas para identificar si un producto es permitido en el sistema o si se debe regresar al cliente.

Continúa en la página siguiente...

Aspectos	Temas de interés	Áreas de estudios e investigación
Recolección	Forma en que se adquiere el producto.	La recolección puede hacerse en el cliente, por medio de detallistas o a través de terceros.
Inspección y consolidación	Inspección y clasificación	Integración de acopio, inspección y consolidación de productos usados con actividades de la logística hacia adelante. Los productos son clasificados de acuerdo con una evaluación de su estado.
	Consolidación Logística hacia adelante	Subcontratación del acopio y la consolidación. Categorización de los retornos de acuerdo con su calidad.
Disposición	Decisión para futuro aprovechamiento	Vender como nuevo, reparar o reempacar para vender como nuevo, reparar o reempacar para vender como usado, revender a un valor más bajo (salvamento) o vender por peso para aprovechamiento de materiales.
Integración	Manufactura	Realineamiento de los procesos de manufactura.
	Re-manufactura	Sistemas de información y manejo de retornos. Integración con el diseño del producto. Retorno de los productos e incentivos a la cadena de suministros. Gestión de inventarios en un sistema integrado.
Modularidad del producto	Estructura modular del producto	Necesidad de ver la RL de acuerdo con la modularidad en la estructura del producto. Implicaciones de la modularidad de un producto sobre las cadenas de suministro de lazo cerrado. Modelizado de múltiples productos en un sistema de RL.
Desmontaje	Facilidad	Procesamiento de productos usados para fácil desmontaje
	Disponibilidad	Mecanismos de liberación de los productos desmontados para mejor coordinación en la planificación y control en re-manufactura.
	Confiablez	Evaluación de la vida media de componentes.
Coordinación	Comunicación	Importancia de la comunicación para la disposición rápida y temprana de los productos devueltos y para la planeación de re-manufactura.
	Sistemas de información	Sistemas de información como soporte en la coordinación.
Cadena de suministros	Cadena de suministros inversa	Programación de llegada de nuevos módulos, almacenamiento o disposición del exceso de módulos recuperados. Análisis de las técnicas de planeación de la capacidad.

Continúa en la página siguiente...

Aspectos	Temas de interés	Áreas de estudios e investigación
		Sistemas de planeación de materiales en un ambiente de re-manufactura. Planeación de suministros para productos de estructura modular.
Inventario	Partes	Manipulación de partes heterogéneas para producción. Manejo de gran variedad de inventarios.
	Productos	Estrategias alternativas de adquisición y control de inventarios. Políticas de inventarios en sistemas híbridos de manufactura.
	Materiales	Degradación y venta de productos nuevos ante la escasez de productos re-manufacturados. Políticas de manejo de la demanda y suministro de productos usados.
Reparación y servicio postventa	Reparación	Capacidad para proveer reparación y servicios postventa.
	Servicio postventa	Localización de bodegas y centros de servicio. Logística de garantías
Resultados		
Precios y competencia	Fijación de Precios	Estudio de las relaciones entre mercado y productos.
	Competencia	Modelos para determinar precios de venta óptimos para productos y partes re-manufacturados. Impacto de la competencia entre fabricantes de equipo original (OEM) y re-manufactura local en suministro y precio de los productos re-manufacturados.
Relación con los clientes	Retención	Los beneficios de la logística inversa sobre las relaciones con el cliente.
	Satisfacción	Mejora en la retención y en la satisfacción del cliente a través de políticas de retorno.
Futuras oportunidades de investigación		
Adopción de RL	Factores	Factores a través de los diferentes sectores y demografía, evaluación del riesgo.
Subcontratación	Subcontratación en RL	Selección de operadores logísticos y aplicación de varios modelos analíticos y métodos de toma de decisiones multicriterio.
Redes de RL	Mercados secundarios	Sistemas de costes para la gestión de flujos inversos.
Disposición	Toma de decisiones	Desarrollo de modelos de decisión integrales para identificar alternativas de recuperación en RL.

Continúa en la página siguiente...

Aspectos	Temas de interés	Áreas de estudios e investigación
Interrelaciones	Sostenibilidad, logística verde, RL y CLSC	Consideración de aspectos ambientales y de sostenibilidad en RL y CLSC.
Integralidad	Enfoque sistémico	Tener en cuenta las interrelaciones puede permitir una toma de decisiones más apropiada.
Incertidumbre	Enfoques no deterministas	Lógica difusa, enfoque de intervalos y teoría del caos.
	Optimización robusta Pronósticos	Enfoques estocásticos de dos etapas y optimización robusta. Pronósticos de retorno de productos, efecto Bullwhip en RL y CLSC, métodos de pronóstico de varios parámetros (como redes neuronales y lógica difusa). Medidas de desempeño de los pronósticos de los retornos.
Enfoque de modelado	Parámetros inciertos	Precio, demanda y costos, vistos como parámetros no determinísticos e interrelacionados.
	Otros enfoques	Teoría de colas, teoría de grafos, procesos markovianos de decisión, modelos de regresión dinámica, programación no lineal y convexa, etc.
Métodos de solución	Métodos exactos vs. heurísticos	De acuerdo con el tamaño y la complejidad de los problemas.
Variables de decisión	Nuevas reglas	Consideración de nuevas alternativas.
	Integración	Nuevas consideraciones en la integración de variables estratégicas, tácticas y operacionales.
Objetivos	Nuevas variables	Consideración de variables de decisión ambientales, de transporte, etc., no tenidas en cuenta hasta ahora.
	Múltiples objetivos y nuevos enfoques	Encontrar balances entre varios objetivos.
	Aspectos verdes, sostenibles y ambientales	Extensión de los problemas considerando objetivos verdes, sostenibles, etc.

Fuente: Elaboración propia con base en Pokharel y Mutha (2009); Agrawal y cols. (2015); Govindan y cols. (2015)

La *logística inversa* es multifacética y se diferencia de la logística hacia adelante. A través de un análisis para mostrar una perspectiva holística del sistema de logística inversa desde las entradas hasta las salidas se observa que éste debe cubrir tanto redes e inventario como acopio de productos usados, precio, uso, reventa, y re-manufactura. El reto en cuanto a decisiones va más allá de establecer una red eficiente económicamente, se requiere diseñar el sistema de tal forma que los productos usados sean recibidos en el tiempo esperado, al precio esperado y en la

Tabla 3.2: Elementos para identificar las dimensiones de la logística inversa

Elementos	Preguntas	Dimensiones de la logística inversa
Tipos de ítems	¿Qué recuperar?	Tipos de bienes (productos o empaques)
Conductores (motivación o fuerzas ambientales)	¿Por qué hay que recuperar?	Motivación para recuperar
	¿Por qué hay que retornar?	Motivación para devolver
Opciones de recuperación	¿Cómo recuperar?	Formas de reutilización
Actores	¿Quién realiza la recuperación?	Actores

Fuente: El autor con base en De Brito, Marisa P. (2003)

cantidad esperada. La re-manufactura puede ser más eficiente, económicamente y ambientalmente comparada con la producción de nuevos productos, aunque puede requerir un cambio en el diseño de producto desde un diseño para el mercado a un diseño para desmontaje, para re-manufactura y reutilización (Pokharel y Mutha, 2009).

3.2.3 Dimensiones de la logística inversa

Son diversas las categorías que se proponen para el estudio de los problemas de logística inversa, en este caso se parte de la clasificación dada por De Brito, Marisa P. (2003) por ser una de las estructuras de análisis más completas al respecto. Tal clasificación incorpora lo expuesto por muchos de sus predecesores, e incluye entre otros elementos los siguientes: *Motivación para su realización, elementos conductores, fuerzas ambientales, tipos de elementos, opciones de recuperación, opciones genéricas (recuperación), formas de reutilización, actores, sistemas de reciclaje clasificados de acuerdo con los actores en el sistema* (De Brito, Marisa P., 2003). Tales elementos pueden agruparse en varias categorías (con sus respectivas preguntas) como se presenta en la tabla 3.2. Las respuestas a las preguntas planteadas por De Brito constituyen un marco de referencia en lo que respecta a tales dimensiones.

Es importante identificar los efectos de las interacciones entre los diferentes factores en la recuperación de un producto. El tipo de producto y el motivo de la devolución son entradas de información que condicionan cómo recuperar el producto y quién es el responsable de cada actividad, las decisiones están influenciadas por las motivaciones para recuperar. *Los elementos relacionados como dimensio-*

nes de entrada, tales como el porqué de los retornos, están relacionados tanto con las dimensiones de salida como las opciones de recuperación.

La rentabilidad de la remanufactura está subordinada de la calidad y la cantidad de los productos de retorno y la demanda de los bienes remanufacturados. Los precios de venta pueden influir sobre los volúmenes de producto demandado y los precios de compra sobre la calidad de los retornos por parte de los usuarios. Se presenta un marco de referencia para determinar precios óptimos para generar rentabilidad. Los re-manufacturadores tienen ventaja competitiva cuando logran obtener los productos justos en el precio adecuado que les permita maximizar las ganancias (V. Daniel R. Guide, Teunter, y Wassenhove, 2003).

Tipos y características de los productos: ¿Qué recuperar?

Es importante considerar que es lo que está siendo desechado o devuelto. Las propiedades del producto como el tamaño, el peso, el valor, la facilidad de transporte etcétera, juegan un papel importante dentro de la logística inversa. Las características del producto que suelen ser importantes en lo relacionado con la organización y la rentabilidad de los sistemas de logística inversa son, básicamente: composición (homogeneidad, facilidad de desmontaje, facilidad de ser probado), deterioro (económico, físico) y patrón de uso (ubicación, intensidad, duración, uso a granel versus uso individual).

Composición: La composición del producto en términos del número de componentes y de materiales es uno de los aspectos a considerar al diseñar productos recuperables. Tanto la cantidad como la forma en que se agrupan los materiales y componentes, afectan la facilidad de desmontaje, y su reproceso, y por ende las actividades de logística inversa. La facilidad de prueba, la presencia de materiales peligrosos, la heterogeneidad del material y el tamaño del producto afectan la economía de la recuperación del producto.

Deterioro: Los productos y materiales están sometidos a procesos de deterioro físico y económico que afectan la opción de recuperarlos. Se deben considerar varios aspectos para evaluar el potencial de recuperación de un producto: los efectos de la edad sobre el producto (deterioro intrínseco), la forma en que envejecen las diferentes piezas (homogeneidad de deterioro); la rapidez con la cual disminuye el valor del producto (deterioro económico). El deterioro, aunque provoca carencias en el funcionamiento del producto, permite determinar si hay suficiente funcionalidad de cara a hacer un mayor uso del producto, bien en su totalidad o en algunas de sus partes.

Los productos pueden llegar a ser obsoletos ante la introducción de nuevos productos (estándares) en el mercado, lo cual reduce las opciones de recuperación económicamente viables. Si un producto se consume totalmente durante el uso o si se envejece rápido o posee partes muy sensibles al dete-

rioro, la reutilización del producto no es viable. Pero, si sólo una parte del producto se deteriora, existen opciones de recuperación como la reparación, o sustitución de partes.

Patrón de uso: La forma de uso del producto, con respecto a la ubicación, intensidad y duración del mismo incide en la fase de recolección. Se hará una diferencia si el usuario final es un individuo o una institución (uso a granel), exigiendo diferentes lugares para la recolección o diferentes grados de esfuerzo por parte del usuario final. El uso también puede ser más o menos intensivo, en tiempo y grado de consumo.

Fleischmann y cols. (1997) distinguen los tipos: repuestos, embalajes, y bienes de consumo, a los que se adicionan los productos industriales, más complejos y con un patrón de uso diferente a los bienes de consumo. Además, en la clasificación de productos establecida por la Organización de Naciones Unidas (ONU), teniendo en cuenta las características relevantes de la logística inversa, se discriminan unas cuantas clases más, como: minerales, aceites, productos químicos, objetos civiles, y otros materiales transportables.

Motivación para recuperar: ¿Por qué recuperar?

Muchos autores señalan como factores orientadores: el económico, la legislación ambiental y la conciencia ambiental de los clientes. Las compañías se han involucrado en la logística inversa porque consideran que pueden obtener beneficios, porque lo tienen que hacer o porque se sienten obligados socialmente. Luego las fuerzas que orientan la logística inversa son: Económica, legislativa y responsabilidad social.

Motivación económica: Un programa de logística inversa puede traer beneficios directos a empresas, como a los fabricantes de equipo original OEMs (*Original Equipment Manufactures*), por disminución en el consumo de materias primas, por valor añadido en la recuperación, y por reducción en los gastos de disposición. Empresas independientes han incursionado en la logística inversa, debido a oportunidades financieras en el mercado disperso de bienes desechados y materiales, muchos productos tienen un ciclo de vida corto, pero al final de vida conservan un alto valor económico intrínseco.

También es posible vincularse a programas de logística inversa a la espera de beneficios indirectos debidos al marketing, la competencia, y otros aspectos estratégicos. De cara a la competencia, como una forma de prevenir que otros obtengan acceso a una tecnología o frenar su acceso a los mercados, o para influir sobre la imagen que perciben los clientes.

Los beneficios directos se relacionan con materiales, reducción de costes, valor añadido en el producto; y como beneficios indirectos la anticipación a

las normas, la protección del mercado, la imagen, la mejora de las relaciones cliente-proveedor.

Motivación legislativa: Se refiere a las leyes o decretos que imponen responsabilidades, a las empresas, en la recuperación o retorno de sus productos. En muchos países los compradores tienen derecho a devolver mercancías, en Europa se han impuesto cuotas de reciclaje, regulaciones al empaque o el embalaje con responsabilidad de los fabricantes. En ocasiones, las empresas participan *voluntariamente* en asociaciones, para preparar la legislación, en la cual se tienen en cuenta los derechos de consumidor y la protección del ambiente.

Motivación de responsabilidad social: Las empresas utilizan este término para expresar que respetan los principios de la sociedad. En este caso se refiere a los valores que llevan a la organización a comprometerse con la logística inversa.

La mezcla de las anteriores motivaciones hace que una empresa decida constituir un sistema de logística inversa.

Motivación para devolver: ¿Por qué devolver?

Los productos son devueltos o descartados porque ya no funcionan apropiadamente o su función ya no se requiere. Esas razones se presentan aquí de acuerdo con la cadena de suministro tradicional: manufactura, distribución, consumo, identificando los retornos de cada uno de los grupos.

Retornos de manufactura: Son las devoluciones necesarias para recuperar partes o productos durante la fase de fabricación: materias primas abandonadas, productos en proceso o terminados que no cumplen las condiciones de calidad y deben reprocesarse, productos abandonados o subproductos de la producción. Los excesos de materias primas y productos abandonados representan productos innecesarios, mientras que los que no cumplen las especificaciones representan productos no funcionales.

El fabricante puede ganar directamente con la recuperación de sustancias o materiales, siendo el mismo quien envía y quien recibe. Como ejemplo de ello en la industria farmacéutica, ciertos químicos son liberados como subproductos (*qué tipo y por qué*) que contienen valiosas sustancias y pueden nuevamente servir como entrada al proceso de producción, para recuperar valor.

Retornos de distribución: Los retornos de distribución inician durante la fase de distribución. Entre ellos están los pedidos de devolución del producto,

devoluciones comerciales, ajustes de inventario y retornos funcionales. Los ajustes de inventario ocurren dentro de una empresa mientras que las devoluciones comerciales implican más de una empresa.

Pedidos de devolución del producto: Se deben a condiciones del producto susceptibles de afectar la seguridad o la salud asociadas a su uso, en cuyo caso es el fabricante o proveedor quien inicia la devolución.

Devoluciones comerciales B2B: Son las asociadas a la existencia de una opción contractual de devolver el producto al vendedor. Generalmente hacen referencia a entregas incorrectas o de productos en mal estado, o a productos invendidos que los minoristas o distribuidores devuelven al mayorista o al fabricante (estos últimos incluyen los productos que han terminado su temporada de venta).

Ajustes de inventario: Ocurren cuando un actor en la cadena redistribuye las reservas, o entre depósitos o tiendas (en el caso de productos estacionales).

Retornos funcionales: Son los retornos de productos debidos a su función inherente como elementos de distribución, usualmente se redistribuyen varias veces. Su diseño obedece a la necesidad de proteger la integridad del producto, haciendo de la distribución una forma viable y natural de recuperación.

Devoluciones de cliente: Este grupo consiste en aquellas devoluciones iniciadas por el cliente final. Hay gran variedad de motivos de devolución: devoluciones comerciales (garantías de reembolso/otro), devoluciones por garantía, devoluciones por servicio (reparación, recambio de piezas, etc.), devoluciones al fin de uso y devoluciones al final de la vida útil. Tales motivos hacen referencia al ciclo de vida de un producto.

Devoluciones comerciales: Como garantías de reembolso, dan al cliente la oportunidad de cambiar su decisión de compra cuando no satisface sus necesidades o expectativas. Es común en la industria de ventas por catálogo, en la cual se ofrecen reembolsos para mejorar las relaciones con el consumidor y ante la existencia de restricciones legales. En principio el deterioro de los productos en el catálogo es económico por cambio de temporada.

Retorno por servicios: En muchos negocios los fabricantes proveen servicio postventa sobre los productos valiosos. Los contratos de servicio postventa son frecuentemente rentables, debido a que este servicio es crítico para mantener los sistemas industriales y frecuentemente se firman contratos de largo plazo. Cuando un consumidor llama por un servicio

postventa debido al mal funcionamiento de un equipo, un ingeniero de servicio regresa por una orden de trabajo para repararlo.

Retorno de fin de uso: Devolución de bienes al finalizar los contratos de alquiler de bienes, negocio a negocio. Debido a que la recuperación es realizada por el fabricante original es natural integrar la recuperación con el proceso de producción.

Retorno de productos al fin de su vida: Son los que tienen lugar una vez finaliza la vida útil de los productos, estos regresan y son procesados para hacer uso de sus materiales, en lo que se considera un sistema de recuperación de ciclo cerrado, por ejemplo reciclando.

Independientemente de las causas subyacentes, cuando un cliente devuelve un producto nuevo y se beneficia de una garantía de reembolso o su equivalente, se trata de un retorno comercial; cuando se debe al incorrecto funcionamiento del producto, retorno por garantía y servicio; cuando el producto ya no representa interés para el cliente, al fin de uso y cuando ha terminado su vida útil, retorno para que se recupere valor de él.

Opciones y procesos de recuperación: ¿Cómo recuperar?

Las actividades de la logística inversa previas a la recuperación incluyen recolección, inspección, selección a través de pruebas, y clasificación. La recolección consiste en recoger los productos usados, en mal estado, no deseados (retornos de equilibrio de valores) u obsoletos, así como materiales de embalaje, y el envío desde el consumidor o el distribuidor. En ese punto (o en otro determinado) los productos son inspeccionados y se toma una decisión sobre el tipo de recuperación a considerar, de conformidad con su calidad.

Los productos usualmente son clasificados y dirigidos de acuerdo con la decisión de recuperación, la cual depende de las características del producto y de la motivación por la cual son devueltos y de el eslabón de la cadena de suministros en que se hace el retorno, como se observó en la tabla 3.2.3. Desde el punto de vista logístico, el principal interrogante es la forma en que la empresa debe transportar los productos desde donde no se quieren hasta donde pueden ser procesados, reutilizados y recuperados, y la gestión de inventarios derivada de ese traslado.

Independientemente del destino final, todos los productos que viajan en sentido inverso deben ser acopiados y clasificados antes de ser enviados a sus próximos destinos, la ubicación en la cual los productos se insertan en el flujo inverso determina el sistema de logística inversa.

Algunas de las opciones para disponer de los productos son: Regresar al proveedor, revender, vender por medio de un *outlet*, reacondicionar, restaurar, regresar por llamado del fabricante, re-manufacturar, recuperar materiales, reciclar y enviar a vertederos. Para los empaques y embalajes, las opciones son: reutilizar, restaurar, regresar por llamados del fabricante, recuperar materiales y reciclar.

La recuperación es sólo una de las actividades de la logística inversa, en ella la *logística* inversa funciona en la práctica al *recuperar valor* a partir de los productos. Si la calidad es tan buena como la de un producto nuevo, éste puede ser introducido en el mercado casi inmediatamente mediante *recuperación directa*, en otro caso realizarse diferentes alternativas de recuperación que demandan más acción, distinguiéndose la reutilización directa del proceso de recuperación.

Reutilización directa: La reutilización, reventa y redistribución son conceptos diferentes; *reutilización* se refiere a volver a utilizar el producto, pero no hay compra; *reventa* se refiere a volver a vender los productos y; *redistribución* que se refiere a la rotación de los productos una y otra vez.

El producto devuelto al proveedor por razones comerciales puede ser revendido a un cliente diferente o puede ser puesto en venta en un almacén tipo *outlet* (si no ha sido utilizado), o puede ser vendido a una empresa comercializadora que lo envíe a otro mercado (si posee una calidad inferior).

Procesos de recuperación: Los procesos de recuperación pueden ocurrir en diferentes niveles e implicar varias operaciones tales como limpieza, desmontaje, re-ensamble.

Un producto puede ser recuperado en su totalidad mediante su reparación, en un nivel modular el producto puede ser actualizado o restaurado. En el caso de recuperación de componentes, los productos pueden ser desmantelados y partes nuevas y usadas pueden ser empleadas en la manufactura de los mismos productos o de diferentes productos en lo que se conoce como *re-manufactura*; el reprocesamiento puede incluir una selección guiada de procesos de recuperación de partes.

Los procesos de recuperación tienen lugar cuando el producto no puede ser vendido en las condiciones en que es recibido o su precio de venta es susceptible de un aumento significativo como consecuencia de un *reacondicionamiento*, en cuyo caso la empresa puede realizar la renovación o el reacondicionamiento antes de venderlo. Es posible que se contrate este servicio con un tercero o que se venda a una empresa dedicada al reacondicionamiento, re-manufactura o renovación. Posteriormente el producto es vendido como un producto reacondicionado, reconstruido o re-manufacturado, pero no como nuevo.

De no ser posible la disposición del producto de ninguna manera, en virtud de su estado, implicaciones legales, o por las restricciones ambientales relacionadas, la empresa deberá deshacerse del producto al menor coste posible. Esto es extraer los materiales valiosos que puedan removerse y los materiales reciclables antes de enviarlo a un vertedero.

En el caso de recuperación de materiales, los productos suelen ser destruidos y sus materiales son clasificados y agrupados de acuerdo con criterios de calidad, así los materiales reciclados pueden servir como materias primas a la industria, como el papel y el vidrio. Por último, en generación de energía los productos son quemados y la energía liberada es capturada. Si no es posible desarrollar ninguno de esos procesos, los productos son llevados a un vertedero.

Los factores diferenciadores para determinar las opciones de recuperación a adoptar muestran que las operaciones de *reparación*, *re-manufactura* y *reciclaje* requieren cantidades diferentes de esfuerzo para reutilización de productos y materiales. El reciclaje requiere que prácticamente no haya valor, pues se encarga de recuperar los materiales remanentes en el producto. La reparación y la re-manufactura se fundamentan en el valor que subyace en algún grado en los productos.

En resumen, las opciones más comunes de recuperación son: *recuperación directa*, *reparación*, *restauración*, *re-manufactura*, *recuperación de partes*, *reciclaje* e *incineración*. La recuperación directa afecta principalmente a la distribución, el grupo central afecta la planeación de la producción, en el reciclaje se presenta el mayor nivel de subcontratación.

Actores y roles: ¿Quién recupera?

Los siguientes son los principales actores de la logística inversa: miembros de la cadena de suministro de avance (proveedor, fabricante, mayoristas, detallistas y organizaciones sectoriales); miembros especializados de los canales inversos (trabajadores, especialistas en reciclaje, organizaciones sectoriales o fundaciones dedicadas, operadores, etc.); instituciones gubernamentales y miembros de oportunidad (organizaciones caritativas). Estos actores desempeñan los roles de gestión, organización, ejecución y alojamiento de los procesos relacionados.

Savaskan y col.(1999) analizaron el desempeño de estructuras de canales alternativos de logística inversa mediante un enfoque de teoría de juegos, específicamente para una OEM que recupera, cuando la recolección es realizada por el detallista, el fabricante o un operador logístico (Savaskan, Bhattacharya, y Van Wassenhove, 2004). La recolección por el fabricante representa una tasa alta de recuperación y una alta eficiencia en coste del sistema mientras que la recolección por los detallistas incrementa la competencia y provee un instrumento de diferenciación de precio

Tabla 3.3: Caracterización de ítems en flujos inversos de acuerdo con tipo y origen

Materiales	Generadores de flujos inversos	
	Socios en la cadena de suministro	Usuarios finales
Productos	Retornos por balance de inventarios Retornos por mercadeo Fin de vida o temporada Deterioro en tránsito	Productos defectuosos o no deseados Retornos por garantía Re-llamados del fabricante Aspectos ambientales de la disposición
Empaques y embalajes	Empaques reutilizables Empaques multiviaje Requerimientos de disposición	Reutilización Reciclaje Restricciones de disposición

Fuente: (Rogers y cols., 1999)

al fabricante. También deben evaluarse los retornos comerciales entre detallistas y fabricantes, pues las políticas de retorno pueden resultar benéficas a ambos. La tabla 3.3 presenta una caracterización de los flujos de retorno.

El volumen de recolección es un factor crítico de éxito. Por ello juega un papel fundamental la consolidación de flujos de pequeños volúmenes, por parte de los intermediarios, en grandes volúmenes hacia los recuperadores. Pohlen y Farris (1992) identifican una tipología de canales y establecen un conjunto de funciones y potenciales actores del canal, que pueden ser asignadas en muchas formas. Además de las actividades mencionadas previamente, incluyen: transporte, compactación y reprocesamiento, como funciones típicas del canal. Para ellos es importante el papel de la cooperación y el diseño sistemático del canal, junto con el análisis de la localización, como aspectos de investigación (Pohlen y Farris, 1992).

3.2.4 La gestión de operaciones y la logística inversa

Una comparación del ambiente de manufactura de recuperación y el ambiente de manufactura tradicional por área de responsabilidad muestra que los administradores deben considerar mayores incertidumbres inherentes en el primer caso. Todas las áreas funcionales requieren la gestión de información adicional, como puede observarse en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Comparación de los ambientes de manufactura *De recuperación y Tradicional*

Factores	Ambiente de manufactura de recuperación	Ambiente de manufactura tradicional
Enfoque ambiental	Busca prevenir los residuos posteriores a la producción	Diseño y manufactura ambientalmente conscientes, enfoque en preproducción. Prevención y corrección de la polución.
Logística	Flujos de avance e inversos Incertidumbre en tiempo y cantidad de los retornos Flujos dirigidos por el suministro	Flujos abiertos hacia adelante. No hay retornos. Flujos dirigidos por la demanda.
Producción, planeación y control	Necesidad de balancear demanda con retornos. Incertidumbre del material recuperado. Rutas y tiempos de proceso estocásticos. Los sistemas de manufactura tienen tres componentes principales: desmontaje, re-manufactura y re-ensamble.	No existe tal necesidad. Certidumbre en planeación de materiales. Rutas fijas y tiempos de procesamiento más estables. Sistemas de manufactura tienen dos componentes principales: fabricación y ensamble.
Pronósticos	Para la disponibilidad de núcleos y para la demanda de bienes finales Debe pronosticarse requerimiento de partes dado que las tasas de recuperación son inciertas.	Sólo para demanda de bienes finales. No se requiere pronóstico de partes
Compras.	Requerimientos de materiales altamente inciertos debido a tasas variables de recuperación. Núcleos, partes y componentes, remplazo de partes y componentes.	Requerimiento de materiales determinístico. Materias primas, partes nuevas y componentes.
Control y gestión de inventarios.	Para núcleos, partes re-manufacturadas, partes nuevas, partes sustitutas nuevas y re-manufacturadas, partes manufacturadas de equipo original. Debe llevarse y proveerse contabilidad para todo tipo de partes.	Para materias primas, trabajo en proceso y bienes finales. Debe llevarse y proveerse contabilidad para trabajo en proceso y bienes finales.

Fuente: (Guide, Jayaraman, Srivastava, y Benton, 2000)

3.2.5 Modelos de investigación de operaciones para el diseño y configuración de las redes de logística inversa

Se observa un interés de desarrollar un enfoque integrado en el diseño y la implementación de la logística inversa. Dowlatshahi (2005) propuso un marco de integración de los factores estratégicos en el que se presenta una guía específica de gestión para el diseño e implementación de un sistema de logística inversa desde el punto de vista estratégico. Tal marco permite la interacción con otros parámetros del sistema de re-manufactura, en particular con el diseño de productos. Además, permite consolidar una visión global de los parámetros que influyen en la sostenibilidad de los canales de logística inversa y la toma de decisiones sobre la localización de las actividades (Dowlatshahi, 2005).

Las decisiones en logística se encuentran en todos los niveles: estratégico, táctico y operativo, por lo cual es pertinente la construcción de modelos de decisión que incluyan localización de instalaciones, ruteo de vehículos, ruteo dinámico y programación, entre otros aspectos.

El integrar la logística inversa en la cadena de suministros crea cambios importantes en la cadena de valor, superando el enfoque de optimización local. Los fabricantes de equipo original (OEMs, del inglés *Original Equipment Manufacturers*) deben buscar soluciones de acuerdo con las tendencias económicas y ambientales actuales. La re-manufactura, al fin de la vida del producto (EOL, del inglés *end of life*), representa beneficios *económicos, ambientales y sociales*, que pueden obtenerse si se crea un canal de logística para recolección, re-manufactura, re-marketing, conocida como *cadena de suministros inversa* (El korchy y Millet, 2011).

El transporte de materiales, bienes al final de uso (alquiler) o al final de su vida útil para el consumidor, considerados flujos de retorno es fundamental en la logística inversa. Los productos deben ser trasladados desde el usuario *anterior* a un punto de *futura* explotación o desde el *comprador* de nuevo al *remitente* y los costes de transporte constituyen un rubro importante dentro de los costes de recuperación.

El diseño de un canal de logística inversa (RLC, del inglés *reverse logistics channel*), implica la determinación de la forma en que los productos se recolectan desde los consumidores y se llevan a las fábricas para la re-manufactura.

La mayoría de los modelos cuantitativos de logística inversa, están orientados a la toma de decisiones en la localización de las instalaciones y la distribución, siendo sus principales factores las incertidumbres en cuanto a volumen, tiempo, ubicación y calidad de los productos que retornan. Estos modelos tradicionalmente se usan para asistir la toma de decisiones en el diseño de la red física, definir la ubicación geográfica de las instalaciones y las vías de transporte entre ellas, y

para determinar herramientas estratégicas que permitan lograr eficiencias desde el punto de vista geográfico, económico y organizacional. La construcción de este tipo de modelos requiere el análisis de la naturaleza de las partes involucradas, y sus responsabilidades en las diferentes actividades, así como los aspectos de decisión y control a partir de los cuales se estructuran tales redes.

El diseño de una cadena de suministro inversa, implica que los fabricantes evalúen los beneficios de la re-manufactura en comparación con la fabricación de nuevos productos. Tal comparación basada en el uso de las instalaciones existentes en la cadena de suministro de avance, es decir, variar la ubicación de las actividades de tratamiento en el modelizado de la red logística, y evaluar el beneficio resultante en términos de costes e impacto ambiental a partir de tales instalaciones.

Es necesario considerar el diseño del producto, teniendo en cuenta todo su ciclo de vida e incluyendo los procesos de avance y retroceso de la cadena de suministro. Umeda y col. (2000) argumentan “debido a que los productos tienen diferentes estructuras modulares, ellos tienen costes diferentes y funciones de impacto ambiental diferentes, en particular, para los procesos logística inversa. La viabilidad para diversos procesos de recuperación y eliminación también varía fuertemente por el diseño del producto, el módulo y el nivel de componente”, además Geyer y col. (2007) modelan y cuantifican el ahorro de costes en sistemas de producción que recogen, re-fabrican y comercializan productos al final de su uso como sustitutos perfectos. Sus resultados demuestran la necesidad de coordinar la estructura de costes de producción, tasa de recaudo, y ciclo de vida del producto y la durabilidad de los componentes para crear y maximizar el ahorro de costes de producción de re-manufactura (El korchi y Millet, 2011).

Se ha empleado un modelo de programación lineal entera mixta probabilístico para el diseño de una red de logística inversa, en un ambiente multiproducto, multi-etapa. Tal modelo permite determinar los centros de desensamble de los subconjuntos, los centros de procesamiento y los centros de reciclaje a ser abiertos, así como la estrategia de transporte que satisface la demanda impuesta por los centros de reciclaje y manufactura con mínimos costes fijos de apertura y totales de embarque. Roghanian y Pazhoheshfar (2014) proponen un modelo probabilístico para el diseño de redes de logística inversa, que minimiza los costes totales de transporte en logística inversa; un algoritmo genético basado en prioridades fue utilizado como un método robusto para representar problemas de redes logísticas.

Diseño y planeación de una red logística integrada (directa e inversa) multinivel, multiperiodo, multiproducto con restricciones de capacidad. Los precios de los productos dependen de su calidad, los precios pagados por los productos devueltos son un incentivo al cliente y se modelizan de manera dinámica. Un modelo de MILP se utiliza para considerar un enfoque de precios dinámicos de productos usados, configuración de la red logística y decisiones de inventario de manera concurrente (Keyvanshokoh, Fattahi, Seyed-Hosseini, y Tavakkoli-Moghaddam, 2013).

Estudio de las cadenas de suministros de ciclo cerrado para productos de alta tecnología caracterizados por un ciclo de vida corto y demanda volátil. Se analizan tres alternativas de estructuras de canales de RL para recoger el producto: Fabricante recoje el producto directamente, el detallista recoje el producto para el fabricante, y el fabricante subcontrata la recolección a un operador de servicios logísticos (Chuang, Wang, y Zhao, 2014)

Desarrollo de un modelo matemático multi-objetivo en una red de cadena de suministro verde formada por fabricantes, centros de distribución y distribuidores. Los principales objetivos que se consideran son: minimizar los costos de producción, distribución, explotación y el costo escasez, así como minimizar el impacto ambiental de la red logística. Un algoritmo genético multiobjetivo se aplica con el fin de minimizar estos dos objetivos en conflicto simultáneamente (Memari, Rahim, y Ahmad, 2015).

Características de las redes de recuperación

La mayoría de los casos tiene que ver con *la gestión de retornos de fin de uso* o con *embalajes o envases reusables*. En todos ellos la responsabilidad de la recuperación inicia con la recolección de productos usados y finaliza con la distribución de los productos recuperados, la red logística inicia con un conjunto de usuarios que disponen sus productos y termina en un conjunto de usuarios que demandan los productos recuperados. En adelante se denominan *mercado de productos usados*, cuando el recuperador actúa como comprador y *mercado de productos recuperados* cuando el recuperador asume el rol de vendedor. Las redes de logística inversa presentan actividades particulares al producto y a la empresa en torno a la cual se estructuran, siendo las siguientes, comunes a la mayoría: Recolección, Inspección-Separación, Reprocesamiento, Disposición, Redistribución, sin incluir los transportes y almacenamientos por considerarse enlaces entre las diferentes etapas. Se tienen en cuenta especialmente los aspectos físicos de la red, dados los objetivos de modelización que se persiguen (Fleischmann, 2000).

Recolección: Se refiere a las actividades de tomar los productos usados y trasladarlos a algún punto en el cual se desarrolla un tratamiento posterior para que estén disponibles. Puede incluir compras, transporte y almacenamiento.

Inspección-separación: Son las actividades tendientes a evaluar si un producto es o no reutilizable y en qué medida lo es. Consiste en clasificar el flujo de productos de acuerdo con las diferentes opciones de recuperación. Inspección y separación pueden incluir desensamble, trituración, prueba, clasificación y almacenamiento.

Reprocesamiento: Implica la transformación del producto usado en un producto nuevamente utilizable, esta transformación incluye las diferentes opciones

de recuperación mencionadas previamente, la limpieza, el remplazo y el reensamble.

Disposición: Es una actividad que sólo tiene que ver con productos que no pueden ser reutilizados debido a razones técnicas o económicas. La disposición puede incluir transporte, depósito en vertedero e incineración.

Redistribución: Se refiere a llevar los productos reutilizables a los mercados potenciales trasladándolos a los futuros usuarios. Suelen incluir ventas, transporte y almacenamiento.

En casi todos los modelos de distribución geográfica los volúmenes de demanda y suministro son variables exógenas, lo que hace que las redes de recuperación de productos tengan un carácter semejante al de las redes de transbordo. En su mayoría, presentan tanto fuentes como sumideros fijos (no necesariamente distintos, pues pueden coincidir) mientras poseen nodos intermedios que deben ser especificados. La recuperación de productos puede verse, de modo semejante a la manufactura, desde la perspectiva de la cadena de suministro, en lugar de considerar sus etapas de manera independiente. Una diferencia importante frente a la cadena de suministro tradicional, es el aprovisionamiento que pasa de ser una variable usualmente endógena, en la cual fecha de entrega, cantidad y calidad de las entregas pueden ser controladas de acuerdo con las necesidades del sistema, a ser una variable exógena, en la red de RL, y en consecuencia muy difícil de pronosticar.

A diferencia de las redes tradicionales, se tiene una etapa de inspección, que es determinante de la ruta de proceso en la recuperación. Por ello, la estructura de una red de logística inversa suele ser más compleja e incluir más interdependencias. También es posible la presencia de integración entre distribución y recuperación en redes de bucle cerrado. Además, el número de fuentes de productos usados es significativamente mayor al número de proveedores en una red tradicional, la incertidumbre en la demanda puede ser más notoria en el caso de las redes inversas debido a que los mercados de reutilización aún no están bien establecidos y la profesionalización de estos tiende a ser baja.

La relación entre redes de recuperación de productos y redes de disposición de residuos es importante, pues ambas son redes convergentes y una red de disposición provee la estructura logística para la recolección, procesamiento y eliminación de los productos descartados, bien sea en vertederos o mediante incineración. Es necesario que la recolección de productos usados se haga desde muchas fuentes dispersas y luego se consoliden para su posterior transporte y procesamiento adecuados.

Las principales diferencias entre estas redes se observan desde el punto de vista de la demanda. Mientras un flujo de productos recuperado está dirigido hacia un mercado de reutilización, los residuos terminan usualmente en vertederos o en plantas

de incineración. Además, mientras los residuos pueden ser clasificados por materiales para una posible opción de disposición, esta no depende de manera crítica de la calidad de los mismos. La incertidumbre no presenta en las redes de disposición un impacto tan significativo como el existente en las redes de recuperación.

Finalmente, los retornos comerciales se refieren más a productos nuevos que a usados. En este caso los flujos se deben a sobre stocks o a reclamos en el proceso de distribución, es decir, productos deteriorados en el transporte o incorrectamente entregados.

Clasificación de las redes de recuperación

Las redes de recuperación pueden clasificarse de diferentes formas, de acuerdo con la naturaleza de sus estructuras y de los implicados dentro de las mismas. Los siguientes criterios pueden resultar determinantes a la hora de analizar (o configurar) una red:

Grado de centralización: El grado de centralización es una consecuencia del número de instalaciones que desarrollan actividades similares dentro de una red, como tal es una *medida de integración horizontal o anchura de la red*.

Número de niveles: El número de niveles es el número de instalaciones que el flujo de bienes visita secuencialmente, por ello es una *medida del grado de integración vertical o profundidad de una red*.

Vínculos con otras redes: La existencia de vínculos con otras redes hace referencia al *grado de interacción de una red con redes preexistentes*, de acuerdo con ello puede tratarse de una red independiente o de una extensión de una red existente.

Apertura de la red: La apertura de la red es una característica asociada a la *relación entre los flujos entrantes y salientes*. Las redes pueden ser cerradas, en cuyo caso las entradas y las salidas coinciden de modo que el flujo resulta cíclico; y abiertas, cuando los mercados de reutilización y recuperación difieren.

Grado de cooperación entre las ramas: Se refiere al *grado de cooperación entre los responsables de establecer la red*, desde este punto de vista puede tratarse de una red formada por una sola compañía posiblemente incluyendo subcontratación, detallistas, etc., o bien una red compuesta por un sector empresarial, etc.

Dimensiones de la logística inversa en el contexto de la red

De las dimensiones expresadas en la subsección 3.2.3, se hace referencia a aquellas que tienen relación directa con el diseño de las redes de logística inversa, a continuación algunos elementos de las mismas.

Tipos y características de los productos: Las características del producto son determinantes de la opción de recuperación a llevar a cabo, las instalaciones requeridas para ello y el coste de las inversiones necesarias para hacerlo.

Actores y roles: Se refieren al mercado, en el que participan proveedores, fabricantes de equipo original (OEMs), proveedores de servicios logísticos, recuperadores independientes, consumidores y autoridades públicas. La interacción entre las partes tiene un impacto importante sobre la estructura de la cadena de suministros y las correspondientes soluciones logísticas. Es necesario considerar la motivación que tienen los diferentes actores para llevar a cabo la recuperación, como factor determinante.

Opciones y procesos de recuperación: Las opciones de recuperación son esenciales porque de ellas depende en gran medida la necesidad de recursos relevantes que influyen profundamente el diseño de la red: instalaciones de recuperación, personal y medios de transporte, acordes con la opción de recuperación adoptada. Las instalaciones pueden ser de evaluación (dotadas de equipos de prueba), líneas de desensamble, plantas de reciclaje, etc.

3.2.6 Estructura y diseño de las redes de logística inversa

Esta estructura varía en función de la ubicación de las actividades de tratamiento en la red logística, una red logística inversa adopta diferentes formas dependiendo de las funciones y capacidades de sus miembros. Si se realiza la inspección y clasificación en la fuente, es posible reducir el coste al evitar transporte y almacenamiento de productos no recuperables a las plantas de recuperación.

Para El korch y Millet (2011), una red logística inversa puede ser deconstruida en una red logística genérica y un proceso de tratamiento genérico. La configuración genérica tiene el propósito de reducir los costes de transporte, los productos obtenidos de los clientes son primero consolidados en los centros de acopio de la zona hasta formar un volumen suficiente para el transporte, desde allí se envían a un almacén central y se almacenan hasta ser requeridos y en consecuencia trasladados al centro de producción.

El diseño de una red de logística inversa influye significativamente sobre la viabilidad económica de una cadena de suministro, tanto abierta como cerrada. Una

estructura logística que garantice el flujo de bienes implica tomar decisiones relacionadas con la localización física de las instalaciones donde se perfeccionan las diferentes actividades y los medios de transporte a utilizar. Es necesario precisar la forma en que se han de recoger los productos desde el usuario generador, las instalaciones y equipos en donde se evaluarán los productos recogidos para separar la fracción recuperable, las plantas de desensamble donde se inicia el reproceso de los productos recogidos para ajustarlos para su reutilización, y la distribución de productos recuperados a los futuros clientes, entre otros aspectos de las redes de recuperación de productos.

La red logística consta de tres partes principales. La primera, de naturaleza convergente en la cual se acumulan productos usados desde diferentes fuentes (consumidores) y se transportan a alguna instalación de recuperación; la segunda es una red divergente que vincula las plantas de recuperación a los clientes de los productos reutilizables; y la última que, en medio de las dos primeras, consiste en la red en la cual se lleva a cabo el proceso de transformar un producto usado en uno reutilizable, es decir, comprende las actividades de prueba, evaluación y reprocesamiento. Sólo la primera parte va en sentido inverso, en lo que respecta a flujo de bienes en sentido contrario desde el consumidor al fabricante.

Una compañía puede ser responsable de una parte o de la totalidad, dependiendo del rol de los diferentes miembros del canal, asimismo el alcance puede extenderse a través de los límites de varias empresas. Pero, de acuerdo con un enfoque de cadena de suministro lo mejor es considerar el diseño de la red en su totalidad debido a que considerar las diferentes partes de manera aislada podría conducir a una visión fragmentada y distorsionada que lleve a decisiones sub-óptimas.

Adquisición y recolección

La adquisición de los productos usados potencialmente valiosos representa una parte importante del total de los costes de una cadena de suministros inversa, en la cual el transporte puede considerarse un factor clave en su desempeño ambiental. Evitar conflictos con *criterios verdes* que juegan un papel importante en muchas iniciativas de recuperación de productos, es una razón más para evitar el exceso de transporte. La instalación de puntos de disposición a los cuales los productos usados son llevados por los consumidores reduce el transporte pero emplea más espacio de almacenamiento, por lo que se limita sólo a los productos de bajo volumen y valor.

Es frecuente emplear además la consolidación en combinación con otros flujos de bienes transportados, como es característico de los productos de embalaje y de los programas de cambio de productos “viejos por nuevos”. En este caso se requiere que ambos flujos sigan la misma ruta, lo cual no necesariamente es óptimo.

Prueba y evaluación

La ubicación de las operaciones de prueba y evaluación impacta los flujos de bienes resultantes. Un balance entre los costes de transporte e inversión en los equipos e instalaciones que demanda esta etapa, es determinante en la configuración de la red, si los productos son probados cerca del punto de recolección se pueden minimizar el coste total de transporte al ser enviados directamente al punto adecuado de recuperación, evitando costes innecesarios. Cuando se requieren equipos costosos de revisión y mano de obra especializada para las pruebas, puede resultar más adecuada la centralización de las operaciones de prueba y evaluación.

La centralización también puede deberse a restricciones legales, como consecuencia de la prohibición de transportar residuos entre estados, para evitar la concentración de volúmenes considerables de desechos en ellos. Los desarrollos en tecnologías de la información y las comunicaciones contribuyen cada vez más a reducir los costes de la evaluación local.

Cuando la forma de hacer la recolección depende en gran medida del consumidor puede reducirse el coste de transporte, pero los costes de evaluación y prueba tienden a subir cuando se requiere guardar productos diferentes separadamente. De forma alternativa la recolección individual desde el cliente puede ofrecer la oportunidad de separar los productos recuperables directamente en la fuente, reduciendo la necesidad de clasificarlos tardíamente en el canal inverso.

Reprocesamiento

La etapa de reprocesamiento usualmente requiere las mayores inversiones dentro de la red de logística inversa, estando su viabilidad económica condicionada al trabajo con grandes volúmenes. Se requiere tanto un volumen suficiente de ventas como un volumen suficiente de recursos recuperables, es decir, se requiere una estrategia de recolección que minimice el coste de transportes mientras se asegura la adquisición de un volumen suficiente de productos usados.

Cuando las cadenas son administradas por los OEMs el diseño de la etapa de reprocesamiento puede implicar resultados entre integración y dedicación, siendo posible que se compartan recursos como mano de obra, equipos, etc. Además, los costes del transporte pueden diferir dependiendo de si se trata de materias primas *vírgenes* o *productos recuperados*, de ahí que la integración pueda adicionar complejidad organizacional.

Redistribución

Como ya se indicó, la etapa de redistribución se comporta de modo similar a la distribución en la cadena de suministro tradicional. Es posible combinar recolección y redistribución para utilizar de manera más adecuada los vehículos de transporte, los OEMs pueden obtener beneficios de tal integración.

Estructuras genéricas para el diseño de redes de logística inversa

El korch y Millet (2011) proponen un marco de referencia de 18 estructuras genéricas para el diseño de una red de logística inversa cuya opción principal de recuperación es la re-manufactura, en su planteamiento definen el diseño de la red a partir de una red genérica y un tratamiento genérico, en los que cada uno de los actores está implicado en parte o la totalidad del proceso de tratamiento. En su planteamiento, establecen varias configuraciones para estructuras genéricas a partir de la combinación de los integrantes de la red logística genérica con las actividades del proceso de tratamiento. Para ello, reducen el número de posibles estructuras genéricas, a partir de la agrupación de pares de actividades afines y consecutivas en tres actividades principales (con base en la hipótesis de que la eficiencia aumenta cuando el par de actividades son realizadas por el mismo actor).

La evaluación de las estructuras genéricas se realiza en dos etapas, en la primera se identifica la estructura actual del canal de logística inversa, si la empresa ya ha establecido un RLC para la recuperación de los productos, y en la segunda se hace la elección de la estructura potencial de red de logística inversa genérica, a la que se puede ir directamente si no se cuenta con un RLC.

La segunda etapa tiene en cuenta los siguientes criterios:

Evaluación de la viabilidad: Dependiendo del entorno de la empresa, la naturaleza de los productos y el negocio, los administradores, decidirán que estructuras no son factibles para su empresa. Las estructuras que consideren viables deben ser estudiadas en profundidad mediante las demás evaluaciones.

Evaluación económica: El coste unitario de un producto re-manufacturado en cada estructura tiene dos partes: el coste de llevar a cabo actividades de tratamiento por parte de actores de la red logística, y el coste de logística de transporte y almacenamiento de los productos de recuperación y los módulos de la red.

Evaluación ambiental: El impacto ambiental de un producto re-manufacturado se mide en dos partes: el impacto ambiental propio de las actividades de

Tabla 3.5: Redes de logística inversa en el contexto de la cadena de suministro

	Tipo de motivación para recuperar		
	Reutilización	Re-manufactura	Reciclaje
OEM	Económica	Económica	Económica y Legal
Terceros	Económica	Económica	Económica y Legal

Fuente: Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard, y Wassenhove (2001)

tratamiento y el impacto ambiental de la logística (transporte y almacenamiento).

Evaluación social: El impacto social de la re-fabricación de productos en cada estructura genérica tiene dos partes: el tratamiento y la logística (transporte y almacenamiento). Para la evaluación, se considera un indicador de la creación de empleo (número de horas de trabajo “local” creados a través de la re-manufactura).

El korchy y Millet (2011), construyeron una herramienta en hoja de cálculo para evaluar los aspectos económico, ambiental y social. El primero a partir de los costes, el segundo atendiendo al Eco-indicador 99 y el tercero a partir de la creación de empleo a través de re-manufactura para cada estructura genérica. La combinación de costes unitarios, impacto ambiental e impacto social, permite al equipo de gestores establecer una jerarquía de las diferentes estructuras de RLC. Las mejores estructuras tienen los más bajos costos, menor impacto ambiental, y la más alta creación de empleo (El korchy y Millet, 2011).

Ajuste de las redes de logística inversa al contexto de las cadenas de suministros

Fleischmann et al (2000) identificó tres tipos de redes de logística inversa con base en la opción de recuperación (reutilización, re-manufactura y reciclaje), a las que se incluyen dos variables adicionales de contexto conocidas como la motivación para recuperar y el propietario del proceso de recuperación. En lo sucesivo se presentan las redes de logística inversa para las respectivas combinaciones de valores de las tres variables, como se observa en la tabla 3.5.

Redes para el retorno de productos por mandato legal

Algunas empresas deben recuperar sus productos al final de su uso como consecuencia de la legislación, porque la ley las hace responsables de reducir la corriente de residuos al final del ciclo de vida (sector eléctrico y electrónico, y automotriz). En vista de que no siempre hay muchas oportunidades de recuperar valor de los productos, algunas empresas optan por un enfoque de minimización del coste, que es cargado al cliente directamente o en el precio de los nuevos productos.

Aunque la responsabilidad legal recae en los fabricantes de producto original, ellos suelen subcontratar algunas de las actividades logísticas con proveedores especializados y compañías de reciclaje. La recolección se basa en un enfoque de bajo coste como instalaciones de recolección, en los que los consumidores dejan sus productos usados que luego son embarcados para su procesamiento. En esta alternativa la prueba y la evaluación no juegan un papel muy importante, la clasificación se hace de manera general durante la recolección y la separación de materiales ocurre frecuentemente en el proceso de reciclaje.

Redes OEM para recuperación de valor añadido

Las cadenas administradas por OEMs contemplan múltiples clasificaciones para el flujo de productos usados, desde diferentes fuentes y con diversos motivos: retornos al final de un préstamo, retornos para cambio por productos nuevos, retornos como parte del servicio al cliente. Las alternativas son usualmente adoptadas para productos de gran valor en una relación cercana con el cliente que facilita el monitoreo a lo largo del ciclo de vida del producto. Es común que exista una escala alternativa de opciones de recuperación, dependientes de la calidad, en los niveles de producto, componente y material.

Redes dedicadas a la re-manufactura

Además de las redes gestionadas por los OEM, existen compañías especializadas en re-manufactura, en las cuales es notorio el predominio de las relaciones comerciales y la presencia de agentes. Se trata de una estrategia fuertemente conducida por las oportunidades en las que los agentes usualmente buscan conectar la oferta con la demanda.

Más que adicionar elementos a la infraestructura actual, las compañías que re-manufacturan requieren diseñar una red integral desde el suministro de productos usados hasta la demanda de productos re-manufacturados, por parte de segundos consumidores. Este tipo de organizaciones es fuertemente conducido por la maximización de la utilidad más que por la minimización de los costes.

Una cuidadosa gestión desde el punto de vista de los suministros es vital para asegurar la disponibilidad de los productos recuperables requeridos, para ello se requiere de flexibilidad y sensibilidad en lo que respecta a los suministros. Los estados de los productos son conocidos sólo después de la inspección, por lo cual su localización es un elemento importante en el diseño de esta red logística.

Redes de reciclaje para recuperación de materiales

Los sistemas que se dedican a la recuperación de materiales mediante el reciclaje poseen ciertas características distintivas, entre las cuales está el tener un margen de beneficios bastante bajo. El número de empresas que, en este tipo de redes, están orientadas fundamentalmente por razones económicas es limitado.

Por lo general se requiere de inversiones altas para equipos e instalaciones especializados, la combinación de altos costes de inversión y bajos márgenes hace que este tipo de alternativas sea viable solo ante grandes volúmenes de procesamiento. La prueba y evaluación son irrelevantes, y en lugar de ellas es usual la compactación de los productos (materiales) para reducir el coste de transporte.

Redes para contenedores reutilizables

En este caso se trata de un sistema en el que varios contenedores pueden ser reusados casi de manera instantánea. La etapa de reprocesamiento dentro de la cadena de suministro se limita, generalmente, a operaciones de limpieza y reparación o remplazo menores. El principal problema suele ser determinar la cantidad óptima de contenedores a manejar.

La principal razón de este tipo de cadena es la de asegurar la disponibilidad de contenedores, lo cual se relaciona con la forma de recolección que deberá minimizar la escasez debida a la limitada respuesta del consumidor, los daños o la adquisición por la competencia. Estrategias como depósitos reembolsables, descuentos o intercambio directo de productos viejos por nuevos se emplean para mantener este tipo de cadena de ciclo cerrado. La disponibilidad también depende de la ruta de los contenedores vacíos, y es común el empleo de las mismas estructuras de rutas debido a la correspondencia entre flujos entrantes y salientes.

3.2.7 Modelos cuantitativos para el diseño de redes de logística inversa

Es común el empleo de modelos de programación lineal entera mixta (MILP, del inglés *Mixed Integer Linear Programming*), para el diseño de las redes de logística inversa, similares a los problemas clásicos de localización de instalaciones. Este tipo de modelos permite la optimización matemática de gran escala haciendo uso de un software apropiado, aunque a veces no sea fácil observar el impacto de varios de sus parámetros. Si bien en la mayoría de los artículos consultados la modelización es del tipo MILP, también se han desarrollado propuestas no lineales, de varias etapas e inclusive estocásticas.

Modelos discretos para el diseño de redes

Varios modelos de optimización han sido desarrollados como modificaciones o extensiones del modelo tradicional de localización de instalaciones. Como punto de partida se observa en la revisión realizada por Pokharel y Mutha (2009) y por Agrawal y cols. (2015) que la mayoría de los modelos desde el punto estratégico obedecen a la configuración de la red de logística inversa. En esta se abordan diferentes aspectos relacionados con la cercanía a los sitios en los cuales se llevan a cabo las diferentes actividades, entre otros aspectos presentan referencias de artículos relacionados con la integración de las actividades de inspección y consolidación, o de la manufactura con la re-manufactura y la modularidad de los productos (Pokharel y Mutha, 2009).

Agrawal y cols. (2015) clasifica los estudios relacionados con las redes de RL desde una perspectiva de mercado secundario, así: redes de reciclaje, redes de reutilización, redes de remanufactura, redes de reparación y redes de mercado secundario.

Se consultaron las revisiones de la literatura específicas para el diseño de redes realizadas, por:

De Brito, Marisa P. (2003), quien clasifica 20 artículos de diseño de redes de RL desde una perspectiva general atendiendo a las dimensiones de la logística inversa que se expresan en la subsección 3.2.3.

Fleischmann (2001) hace una revisión de artículos sobre redes de logística inversa que incluyen reciclaje de acero, arena, papel, re-manufactura de productos electrónicos y teléfonos móviles, y empaques reusables para ejemplificar las diferentes categorías de redes identificadas.

Pishvae, Farahani, y Dullaert (2010) hacen una clasificación de artículos sobre diseño de redes logísticas, en la que se consideran las diferentes etapas de la cadena de suministro, la definición del problema, la estrategia de modelización, los resultados de los modelos implementados, sus funciones objetivo y métodos de so-

lución. Teniendo en cuenta las redes de logística hacia adelante, logística inversa y logística integrada.

Alumur, Nickel, Saldanha-da Gama, y Verter (2012) hacen una clasificación de modelos de logística inversa teniendo en cuenta las instalaciones para sus diferentes actividades, la presencia de múltiples productos, listas de materiales inversas, dinámica de retornos, capacidades y su variación a lo largo del tiempo, orientación hacia la utilidad y mercados secundarios.

De la revisión inicial se observa el trabajo realizado en el diseño de redes de logística inversa y como poco a poco se han ido involucrando nuevos factores al diseño, entre ellos: la ampliación de la capacidad a lo largo del tiempo (que implica la consideración de diseños para múltiples periodos), la presencia de múltiples productos, la inclusión de varios niveles e inclusive diferentes métodos de solución para los problemas considerados.

En todos los modelos priman las decisiones encaminadas a determinar la ubicación de las instalaciones y su nivel de capacidad para minimizar los costes totales. Modelos de programación lineal entera mixta permiten un número arbitrario de niveles de red correspondientes a pasos del proceso, y un arbitrario número de productos finales vinculado a opciones alternativas de procesamiento. El análisis de múltiples escenarios ha llevado a sus autores a enfatizar en la necesidad de lograr amplia colaboración que permita alcanzar una adecuada utilización de la capacidad. Los objetivos de reciclaje y las prohibiciones de disposición pueden implicar graves cargas de inversión para las empresas y por lo tanto deberán ser cuidadosamente manejadas.

Kroon y Vrijens (1995) mencionan un diseño de ciclo cerrado para contenedores que pueden ser rentados como material de empaque secundario, resaltando que todos los problemas de diseño de las redes se caracterizaban por la interacción entre las partes involucradas y sus respectivos roles.

Savaskan y cols. (2004), analizan una cadena de dos eslabones, para determinar en cual de ellas debe realizarse la recolección (desde el punto de vista económico), emplean un modelo de optimización continuo no lineal, que resuelven por métodos exactos.

Lu y Bostel (2007) desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para determinar donde deben ubicarse las instalaciones de los centros intermedios (de recolección) y los centros de re-manufactura, así como los volúmenes de recolección y de satisfacción de la demanda. El modelo propuesto por ellos es resuelto por relajación lagrangiana.

Srivastava (2008) presenta un modelo de optimización jerárquico MILP, para determinar la ubicación de los centros de recolección y de reproceso así como sus capacidades, teniendo en cuenta una posible ampliación de la capacidad.

El-Sayed, Afia, y El-Kharbotly (2010) proponen un modelo para el diseño de una red que involucra logística de avance e inversa integrados, con el cual se establece la localización de instalaciones, la red propuesta es multinivel, multiperiodo, con demandas y retornos estocásticos, en el cual las capacidades y las ubicaciones potenciales son conocidas. El modelo se resuelve empleando un SMILP, es decir, un modelo MILP estocástico.

Pishvae y cols. (2010) proponen un modelo MINLP biobjetivo, el modelo inicialmente no lineal, es transformado en un MILP y resuelto mediante el uso de un algoritmo memético multiobjetivo. El modelo se caracteriza por presentar capacidades tanto de instalaciones como de flujo indeterminadas, demanda determinista para un solo producto y un solo periodo. La solución al problema es hallada implementando un algoritmo que se basa en una población de soluciones (similar a un algoritmo genético) al que se le han agregado algoritmos para el mejoramiento, además de los procesos de selección propios de este tipo de soluciones.

Mar-Ortiz (2011) considera el diseño de una red para la localización de depósitos de desensamble, bajo un modelo que considera un solo periodo y múltiples productos, con restricciones de capacidad. El modelo resulta apropiado para la localización de depósitos, la determinación de capacidades de los depósitos y la cuantificación tanto de los transportes como de los vehículos requeridos. La solución del problema de diseño se logra secuencialmente en tres etapas, la primera exacta, luego una heurística y evaluación vía simulación.

Alumur y cols. (2012), proponen un modelo para la localización de depósitos de recolección e inspección y centros de desensamble, teniendo en cuenta múltiples periodos, capacidades modulares expansión de la capacidad, lista de materiales inversa (para el desensamble), y demanda finita. Este problema es modelizado como un MILP y resuelto empleando un software apropiado.

Los modelos que han sido propuestos difieren muy poco de los tradicionales modelos MILP de localización de instalaciones, siendo uno de los aspectos distintivos la incertidumbre en los suministros. En casi todos los modelos de diseño de redes inversas se tienen en cuenta datos desde una perspectiva estacionaria de un solo periodo, aunque como se ha mencionado también existen modelos para múltiples periodos y múltiples productos. En este tipo de modelos no se desarrolla un análisis de sensibilidad debido a la limitación en la observación de las interrelaciones entre variables y, en consecuencia, las conclusiones se toman a partir de resultados de experimentos numéricos más que en argumentos analíticos.

Modelo continuo para el diseño de redes

Fleischmann (2001) presenta un modelo continuo de diseño de redes, basado en un modelo propuesto por Daganzo (1999), en el que se estableció lo que se conoce como la metodología de aproximación continua, que considera la demanda como una función de densidad geográfica continua, en contraposición a la demanda discreta en las diferentes localizaciones que se asume en los modelos de MILP.

El volumen recolectado por unidad de tiempo está dado por una función de densidad continua dependiente de la localización, denotada por $\rho(x)$, que es ligeramente variante en x dentro de un área A . La meta es establecer los costes logísticos totales para servir A y minimizarlos a partir de un diseño de red apropiado. La aproximación continua consiste en expresar los costes en parámetros locales del problema y luego aproximar los costes totales por integración sobre el área de servicio.

El coste total en el modelo tiene en cuenta los costes de transporte entrante, de evaluación y clasificación (costes variables de manipulación y clasificación y costes fijos para las instalaciones de pruebas), y de transporte saliente una vez clasificado. La evaluación del coste se hace teniendo en cuenta dos situaciones dependiendo de donde se realizan la evaluación y la clasificación, así la evaluación puede darse en la instalación de recuperación (centralizada) o en una instalación diferente (descentralizada).

3.2.8 Modelos de inventario en sistemas de logística inversa

La gestión del inventario es otro de los retos que surgen en los sistemas de logística inversa, debido a su importancia como amortiguador o regulador de flujos de materiales bastante diversos, en las cadenas de suministros que incluyen movimiento de materiales *aguas arriba*. El equilibrio económico en sistemas de logística inversa puede ser favorecido al desarrollar políticas de inventarios que permitan utilizar eficientemente los medios de transporte, etc.

La gestión de inventarios en los sistemas de logística inversa incluye diversidad de piezas y materiales (nuevos, re-manufacturados, sustituibles, repuestos, etc.) que sirven de reguladores en los procesos de fabricación. La gestión de inventarios heterogéneos (piezas utilizadas, piezas nuevas, repuestos, productos terminados y en proceso) es de gran importancia para gestores de la cadena de suministros e investigadores, por lo cual se han propuesto sistemas de aprovisionamiento y estrategias de control alternativas.

Fleischmann (2000) manifestaba que a pesar de existir un número limitado de publicaciones de casos de estudio en gestión de inventarios en logística inversa, hay un número importante de modelos cuantitativos propuestos para ello. Este tipo de modelos continúa siendo objeto de estudio como lo corrobora Govindan y cols. (2015) al identificar estudios sobre aspectos de gestión de inventarios como

son el encontrar el punto de reorden, el tamaño del inventario base, el tamaño económico de lote, etc.

Características de los sistemas de gestión de inventarios en logística inversa

En un proceso de recuperación se identifican dos tipos de materiales: *recuperables* que son aquellos que proceden del mercado para ser recuperados y, *servibles* que son los que pueden ir directamente a satisfacer la demanda.

- Los procesos de recuperación transforman los productos recuperables en servibles, de modo que los bienes recuperables y los servibles pueden ser almacenados proveyendo al sistema dos tipos de inventarios en serie.
- El aprovisionamiento de artículos de retorno es ajeno al sistema, el recuperador no tiene injerencia alguna ni en el momento ni en la cantidad de productos que llegan al sistema.
- El pronóstico de los retornos es importante y el exceso de inventarios puede eliminarse en algunos casos como mecanismo de control, excepto cuando la motivación es legal e implica obligatoriedad.
- Usualmente se tienen múltiples fuentes alternativas, algunas controlables, para reponer el stock de servibles. Es común que el volumen de demanda sea mayor al volumen de retorno de productos.
- El sistema logístico en consecuencia forma un lazo entre las variables exógenas *suministro de productos usados y demanda de productos servibles*.

Modelos de inventarios con flujos de retorno

Desde una perspectiva de modelado los flujos inversos provocan una pérdida de monotonía de la reposición de los niveles de inventario de productos nuevos. El nivel de inventarios, como un todo, decrece a causa de la demanda pero crece debido a las devoluciones. Su comportamiento hace que su análisis sea mucho más complejo que los correspondientes a la gestión de inventarios tradicional. Los siguientes supuestos presentados por diferentes autores, son recurrentes:

- El flujo de demanda es un Proceso de Poisson Compuesto Homogéneo.
- El flujo de retornos es un Proceso de Poisson Compuesto Homogéneo.
- El proceso de retornos es independiente del proceso de demanda.

De Brito, Marisa P. (2003) propone una metodología para determinar si los supuestos son válidos con datos reales, que consiste en un análisis estadístico que abarca el proceso de la demanda, el proceso de retorno, y la relación entre los dos procesos; precisando que no siempre puede aceptarse el supuesto según el cual el tiempo de retorno se comporta como una distribución de probabilidad exponencial, por lo que se requiere más investigación. Además, los inventarios para productos con comportamiento estacional son muy difíciles de manejar, en especial en el caso de devoluciones tras finalizar una estación, pues su valor baja rápidamente al caer la estación (De Brito, Marisa P., 2003).

La literatura sobre modelos de control de inventarios con flujos de retornos puede ser dividida en dos corrientes: *modelos típicos de reparación (y derivados de ellos)*, y *otros modelos con correlación imperfecta entre demandas y retornos (inspirados en el reciente interés en logística inversa y gestión de la recuperación)*. Los modelos antiguos muestran una correlación perfecta entre el fallo de la máquina y la demanda de un sustituto, donde el número de máquinas o partes del sistema es constante (De Brito, Marisa P., 2003).

Los modelos son principalmente orientados matemáticamente con una pobre conexión con las experiencias reales (Fleischmann, 2000). Desde esa perspectiva matemática de la teoría de inventarios los modelos se clasifican en determinísticos y estocásticos, y estos últimos se subdividen en modelos de revisión continua y de revisión periódica.

Impacto de los flujos entrantes. Para determinar estrategias de control apropiadas Fleischmann (2000) asume la agregación de los inventarios de *recuperables* y de *servibles* en un solo punto, teniendo en cuenta que demanda y retorno son independientes y, dado que no considera la disposición, las compras constituyen el único medio para controlar el sistema.

El modelo básico de inventarios con retornos de Fleischmann (2000) incluye un flujo aleatorio de ítems entrantes, asumiendo que estos aumentaban inmediatamente el nivel de inventario de servibles. Asume además que existe independencia entre retornos y demanda, que en promedio los retornos son menores que la demanda (por lo cual no existe la opción de disponer productos) y que al inicio de cada periodo se toma una decisión de compra que es recibida t periodos más tarde. El modelo que presenta es general e incluye costes fijos y tiempos de proceso (aprovisionamiento) siendo en esencia un modelo de inventarios estocástico estándar con la diferencia de que la demanda puede ser positiva o negativa.

Impacto de múltiples fuentes. Ante la presencia de múltiples fuentes de aprovisionamiento: recuperación de *productos usados* versus compra de *productos nuevos*, Fleischmann (2000) propone una situación en la cual los productos son recolectados en un inventario diferente mientras el inventario de *productos servibles* es reabastecido de dos formas: procesamiento de *productos recuperables* o por medio de compras. El tamaño de los inventarios de seguridad y de los lotes entre las dos fuentes es importante en el desempeño eficiente del sistema.

En logística inversa se acude a una fuente alternativa ante la baja capacidad de una fuente de recuperación, usualmente los tiempos de procesamiento son mayores para esta.

La motivación para constituir un inventario de *productos recuperables* en vez de recuperarlos instantáneamente puede deberse a que ante los costes fijos de alistamiento se requiera un tamaño de lote suficientemente grande, o a que los costes de mantenimiento de inventarios para los *productos recuperables* sea mas bajo que el coste de mantenimiento de inventario de los *productos servibles*.

Modelos determinísticos

En los modelos determinísticos de control de inventarios se asume que todos los componentes del sistema son conocidos con certeza, especialmente lo que tiene que ver con demandas y devoluciones, que se entienden conocidos previamente para todo el horizonte de planeación. Varios autores han propuesto modelos determinísticos de inventarios, entre ellos Schradly (1967), conocido como el primero en utilizar el modelo de cantidad económica de pedido (EOQ, del inglés *Economic Order Quantity*) como punto de partida para el análisis del inventario en un contexto de producción, compras y recuperación, a partir de ello otros investigadores han realizado propuestas con supuestos adicionales (Nahavandi, Rad, y Farokhi, 2011). Algunos de los modelos revisados en Fleischmann (2000) toman en cuenta los dos tipos de inventarios (servibles y recuperables) en tanto que otros trabajan con un solo inventario agregado.

Saracoglu, Topaloglu, y Keskinurk (2014) proponen un modelo de programación lineal entera (ILP, del inglés *Integer Linear Programming*) y un algoritmo genético (GA, del inglés *Genetics Algorithm*) para la gestión de inventarios multiproducto, multiperiodo que calcula la cantidad económica de pedido y el punto de reorden óptimos bajo restricciones de vida útil, presupuesto, capacidad de almacenamiento, y promociones de “número adicional de productos” de acuerdo con la cantidad pedida.

El Saadany y Jaber (2010) presentan modelos matemáticos deterministas de inventarios de producción, re-fabricación con precios y calidad dependientes de la tasa de retorno. Los estudios disponibles tienen en cuenta un entorno de produc-

ción que consta de dos plantas, la primera para la producción y re-manufactura (o reparación) y la segunda para la recolección (devuelto) de los elementos que se reconstruyen en la primera. La demanda es satisfecha mediante la producción de nuevos productos y la re-manufactura de los artículos devueltos. Resultados numéricos y analíticos de los modelos desarrollados sugieren que una política pura de no eliminación de residuos (re-manufactura total) o bien una sin re-manufactura (pura producción y la eliminación total) es la mejor estrategia, mientras que la estrategia mixta (mezcla de producción y re-manufactura) es el caso óptimo bajo ciertos supuestos. En la práctica, la calidad de los artículos devueltos y el precio de compra que refleja esta calidad, es lo que rige la política de recolección de artículos usados.

La calidad y el precio de compra rigen la política de *producción re-fabricación*, pues si los bienes recuperados son costosos o de baja calidad la política de re-manufactura total no puede ser económicamente viable y se preferirá una política de producción total. De acuerdo con el modelo presentado por Vörös (2002) el flujo de bienes usados (devueltos) incrementa si se incrementa el precio de los mismos y disminuye si se incrementan los niveles de calidad de aceptación, por lo cual El Saadany y Jaber (2010) proponen una herramienta que ayuda a los tomadores de decisiones a determinar tanto el nivel aceptable de calidad de adquisición como el precio de los bienes usados de tal manera que se minimice el coste total.

Modelos estocásticos de revisión periódica

Este tipo de modelos se orienta más a demostrar la estructura de la política óptima que a encontrar los valores óptimos de los parámetros (De Brito, Marisa P., 2003).

Políticas robustas de producción e inventarios con incertidumbre en la demanda y en los retornos El proceso de retorno se integra al proceso de manufactura sobre un horizonte de planeación finito. Wei, Li, y Cai (2011) inician con un modelo de control de inventarios para los procesos de retornos y re-manufactura en el que tanto la demanda como los retornos son inciertos y a partir de él construyen un modelo de optimización robusta para enfrentar la incertidumbre. Su modelo de planeación de manufactura y re-manufactura con control de inventarios multiperiodo según el cual se presentan una serie de flujos de materiales y el procesamiento de los mismos, tiene como función objetivo minimizar los costes totales de producción e inventarios. El modelo posee dos puntos de acumulación de inventarios, que corresponden al inventario recuperable y al inventario servible, respectivamente; dos flujos de ingreso de materiales, que corresponden al retorno de productos usados y a las compras externas o producción, en su orden; dos flujos de salida, que representan los productos dispuestos al medio y la satisfacción de la demanda por nuevos productos; Finalmente está la remanufactura o proceso de

recuperación. Una vez construido el modelo proponen un método de optimización robusto para enfrentar el problema de la incertidumbre.

La *optimización robusta* se utiliza como alternativa a la *optimización estocástica* teniendo en cuenta que para la segunda se requiere el conocimiento de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias, mientras que la técnica empleada sólo requiere de intervalos en los cuales se encuentran sus valores. La solución óptima de un modelo de optimización robusta que captura las necesidades de decisión en situaciones de alta incertidumbre puede cumplir las restricciones con una probabilidad alta y se verificó que tal solución varía en un porcentaje muy bajo para tales intervalos de incertidumbre.

Política de inventarios de empujar con revisión periódica Mahadevan, Pyke, y Fleischmann (2003) analizan una planta de re-fabricación que recibe productos usados de acuerdo con un proceso de Poisson, cuya demanda es también un proceso de Poisson en el cual la tasa de demanda es mayor que la tasa de recepción de productos usados. Se analiza la toma de decisiones asociadas al momento en que se deben liberar los productos del inventario de recuperables a re-fabricación y de la cantidad de productos nuevos que deben producirse (Los productos re-fabricados son *tan buenos como nuevos*), a partir de heurísticas basadas en modelos tradicionales de inventarios. Ellos investigan el desempeño del sistema como función de las tasas de retorno, costes de órdenes atrasadas, tiempos de procesamiento para fabricación y re-fabricación, y desarrollan límites superior e inferior para la solución óptima.

El coste de re-fabricación es menor que el coste de producción como un incentivo para re-fabricar, y cada R unidades de tiempo, se liberan todos los productos usados, en una cantidad aleatoria de Q_r desde el inventario de recuperables a la planta de re-fabricación. La posición de inventario de productos terminados I_R , se define como el inventario útil en la mano, menos pedidos pendientes, más los órdenes pendientes (de fabricación o re-fabricación). Si, después de liberar el lote de re-manufactura, I_R es menor que el nivel de ordenar fabricación S_m , se ordena una fabricación de productos nuevos en una cantidad suficiente, Q_m , desde la instalación de fabricación para llevar la posición del inventario hasta S_m .

La política de empujar se reduce a una política (R, S) convencional si se desvanece la tasa de retorno y, los límites superior e inferior se determinan a partir de heurísticas para obtener el nivel óptimo de colocación de órdenes de productos nuevos. Tal problema es resuelto mediante simulación.

Modelos estocásticos de revisión continua

Gran parte de los modelos de inventarios en sistemas de logística inversa han sido establecidos considerando comportamientos estocásticos y revisión continua. Es decir, teniendo en cuenta que *tanto demanda como retornos son aleatorios en cuanto a su magnitud y momento de ocurrencia*. Se establecen valores de control para las existencias que, una vez alcanzados, determinan la decisión a adoptar en lo que respecta al volumen de producción o de re-manufactura. La mayoría de estos modelos con incertidumbre presuponen que la demanda es un proceso de Poisson homogéneo (compuesto), el retorno es también un proceso de Poisson homogéneo, y los dos procesos son independientes.

Tales supuestos obedecen a la docilidad de la distribución de Poisson, razón que también está detrás de la hipótesis de la independencia. Además, se observa, en la revisión de la literatura, que para llevar a cabo un análisis exacto (desde el punto de vista matemático) o construir expresiones explícitas de las políticas óptimas es necesaria la adopción de tales supuestos. La hipótesis de independencia ha sido motivada también por la escasez de datos individuales sobre las devoluciones de productos (De Brito, Marisa P., 2003).

Modelo de control de inventarios con re-manufactura y ciclo de vida del producto. Hsueh (2011) propone un modelo de control de inventarios que tiene en cuenta fabricación y re-fabricación a lo largo del ciclo de vida del producto, como una alternativa para la gestión de manufactura y re-manufactura de productos con ciclo de vida corto (productos en los cuales el avance tecnológico es significativamente rápido) determinando el lote óptimo de producción, el punto de re-orden, y el inventario de seguridad en cada una de las etapas del producto.

En este se consideran las etapas del ciclo de vida del producto: introducción, crecimiento, madurez y decaída; las tasas de retorno y demanda de los productos son variables aleatorias con distribución normal, cuyo comportamiento varía dependiendo de la etapa del ciclo de vida del producto en que se encuentran. Así: en la etapa de introducción la tasa de demanda es constante con un valor bajo, en la etapa de crecimiento su comportamiento es lineal con pendiente positiva, en la etapa de madurez se mantiene constante en un nivel alto (mayor al inicial) y en la etapa de declive es lineal con pendiente negativa.

Concluyen que se deben considerar diferentes políticas dependiendo del ciclo de vida del producto, lo que es más notorio para productos de ciclo de vida corto (Hsueh, 2011).

Control de un sistema de producción-inventario con retornos bajo información de avance imperfecta. Flapper, Gayon, y Vercraene (2012) proponen un sistema de producción-inventario con devoluciones de productos anunciadas por los clientes, en el que tanto demandas como anuncios de las devoluciones se producen de acuerdo con procesos Poisson independientes, y los cambios son anunciados, realizados o cancelados después de un tiempo aleatorio de retorno. Su modelo, que incluye tanto ventas perdidas como retrasos, se formula como un problema de decisión de Markov para determinar la política de producción óptima con respecto al coste descontado en un horizonte infinito, considerando situaciones con y sin información previa de devolución. Prestan atención a la combinación de información con antelación de retorno y de demanda.

Análisis de los efectos de las normas de ajuste de costes de inventario. Una instalación de desmontaje y de recuperación que recibe productos al final de su vida útil en la cual la demanda se causa para una parte específica que se desmonta del producto y se recupera luego. El desmontaje y la recuperación pueden realizarse de antemano o a la llegada del cliente, en el último caso, se aplica un descuento sobre el precio de venta para compensar al cliente la espera.

Una de las dificultades al planificar un sistema de este tipo es la determinación del costo de oportunidad asociado con la realización de inventario de piezas recuperadas, que surge en el cálculo del valor añadido a la parte por los costes incurridos en el mantenimiento del producto devuelto, los costes de desmontaje y de recuperación y los ingresos devengados por el *casco*, que es el producto que queda después del desmontaje de la pieza. Akçali y Bayindir (2008) evaluaron el caso en el cual los productos que retornan son usados como repuestos para los productos en uso, teniendo en cuenta los costes promedio y el valor presente neto.

Modelo térmico Una representación del problema de inventarios con la posibilidad de retorno de productos ha sido modelizada empleando un modelo térmico equivalente basado en las leyes físicas de la transferencia de calor, como una vía para el análisis y el conocimiento de los efectos de las diferentes políticas y parámetros sobre el desempeño de los sistemas de inventarios fue realizada por Nahavandi y cols. (2011).

El modelo térmico de Nahavandi y cols. (2011), está constituido por dos cuerpos en contacto y los flujos de calor se asemejan a los flujos de materiales del modelo de inventario.

El modelo de inventarios propuesto por Nahavandi y cols. (2011) tiene en cuenta una tasa de retorno y una tasa de demanda que se comportan de acuerdo a distribuciones de Poisson independientes, posee tiempos de producción y de recuperación determinísticos, las tasas de producción y de recuperación por unidad de tiempo son siempre mayores a la tasa de demanda por unidad de tiempo, no per-

mite la disposición de bienes de retorno al medio (sin procesar) y tiene en cuenta la escasez como un pedido atrasado.

Modelos de dinámica de sistemas

El enfoque de dinámica de sistemas permite analizar el comportamiento en el largo plazo y no limitado a un instante de tiempo o a periodos cortos, por lo que es usado en logística inversa. Este tipo de modelización, tiene en cuenta los flujos de información entre los diferentes elementos que hacen parte del sistema y permite hacer un análisis para cualquier instante. Su principal aporte es que permite establecer el comportamiento del sistema conforme pasa el tiempo, a partir de unas condiciones base, identificando la tendencia del sistema y sus condiciones de estabilidad.

Georgiadis y Vlachos (2004) proponen la construcción de un modelo de dinámica de sistemas para analizar adecuadamente los aspectos estratégicos de los sistemas de logística inversa, ante la dificultad de manipular la variedad de los factores en los flujos hacia adelante y en los canales inversos y ante la complejidad de sus interdependencias. Su propuesta incluye variables tanto cuantitativas como cualitativas, tiempo de ejecución de las actividades, e incertidumbre en las variables, con los objetivos de entender el comportamiento de un sistema de una red de logística hacia adelante y hacia atrás, incluidas sus interacciones con el entorno, y de desarrollar una herramienta de simulación para el diseño y evaluación de políticas en el largo plazo.

El modelo mencionado incluye cuatro ciclos, así; el primer ciclo se refiere a la reutilización directa, como por ejemplo en botellas reutilizables; el segundo ciclo se refiere a los procesos de recuperación que añaden valor, como la re-manufactura y la reparación; los últimos dos ciclos se refieren al reciclaje, el tercero se refiere al reciclaje de materiales que son usados para producir productos nuevos y el cuarto al material que se recicla y sirve como material auxiliar en los procesos de re-manufactura y reparación.

Los puntos importantes de toma de decisiones son: el primero, al finalizar el uso de un producto, donde se debe optar por disponer a los vertederos o hacer una recolección selectiva, y el segundo al realizarse la recolección selectiva, que tiene que ver con el destino de recuperación adoptado. Un análisis numérico de un escenario de re-manufactura, muestra conclusiones relevantes de la adopción de esta metodología.

A. W. K. Tan y Kumar (2006) utilizan la dinámica de sistemas como soporte de las decisiones relacionadas con la adopción de políticas en logística inversa, en especial en lo que tiene que ver con políticas liberales o conservadoras, consolidación para

embarque o embarque directo, etc. El modelo que proponen incorpora el enfoque sistémico en el análisis de los procesos de logística inversa.

Su modelo busca responder a interrogantes, planteados en investigaciones previas: ¿Bajo qué condiciones se debe considerar el empleo de la logística inversa (Kopiciki et al., 1993)? ¿Qué tipo de tratamiento de logística inversa se debe dar para cada elemento o cada grupo de elementos (Tan et al., 2003)? ¿Dónde es el lugar ideal para llevar a cabo la reparación o la chatarra, y si debe llevarse a cabo a nivel local o central (Fleischmann et al., 1997)? ¿Cuál es el precio óptimo para las piezas reparadas o re-manufacturadas frente al remplazo con piezas nuevas (Guide y Wassenhove, 2000)? Esto es para asegurar que estas partes son igualmente demandadas y forman una parte de la logística de piezas de servicio.

Las anteriores preguntas pueden ser contestadas individualmente, pero A. W. K. Tan y Kumar (2006) se proponen identificar el comportamiento del sistema de logística inversa como un todo empleando un modelo de dinámica de sistemas en el que se estudia el comportamiento del sistema, frente a modelos de programación lineal entera mixta (MILP) que se han empleado generalmente para analizar aspectos particulares.

3.2.9 Ruteo de vehículos en redes de logística inversa

Además de las decisiones estratégicas concernientes al diseño de la red, es importante la toma de decisiones en los ámbitos táctico y operativo, lo cual hace pertinente hablar de ruteo de vehículos como un aspecto importante de la logística inversa. No obstante, no son evidentes las diferencias entre el establecimiento de rutas en un sentido y en el sentido contrario, en términos de la modelización.

Las diferencias en el establecimiento de rutas en uno u otro sentido suelen estar ligadas a la diferencia en la presión por el tiempo de entrega (recogida), que suele ser mayor en la logística de distribución. Es más importante, en términos económicos y de servicio, llevar el producto al cliente en el momento que lo necesita que recuperar los productos usados o contenedores.

Es importante considerar el número de puntos de recogida (paradas por circuito) por lo que es usual que se haga un ruteo orientado por arcos en lugar de uno orientado por nodos. Un reto importante es la integración de flujos de distribución y de recogida, porque estos pueden verse afectados por restricciones en la capacidad de los vehículos y en los requerimientos mismos de los medios de transporte. Dada la importancia del ruteo de vehículos, en la sección 3.3 se presenta una revisión del estado del arte al respecto.

3.3 Ruteo de Vehículos

En las últimas décadas se ha incrementado el uso de software de optimización basado en investigación de operaciones y técnicas de programación matemática, para la gestión efectiva de la provisión de bienes y servicios en sistemas de distribución. Aplicaciones en Norteamérica y en Europa han mostrado que el uso de procedimientos computarizados para la planeación del proceso de distribución trae consigo ahorros sustanciales en los costes de transporte (generalmente del 5% al 20%). El impacto de tales ahorros es significativo sobre la economía global del sistema, pues el coste del transporte y la distribución representan un componente importante del coste final de los bienes (generalmente del 10% al 20%).

El éxito de las técnicas de investigación de operaciones se debe al desarrollo de los sistemas de cómputo y a la creciente integración de los sistemas de información en los procesos productivos y comerciales. Las herramientas algorítmicas y las implementaciones recientes permiten resolver problemas reales en un tiempo de procesamiento aceptable.

El problema de distribución de bienes se refiere al servicio, en un tiempo dado, de un conjunto de consumidores por un conjunto de vehículos, que están localizados en uno o más depósitos, son operados por una tripulación, y realizan su movimiento empleando una red de vías. *El Problema de ruteo de vehículos (VRP, del inglés Vehicle Routing Problem) consiste en la determinación de un conjunto de rutas, cada una desarrollada por un vehículo que inicia y termina en su correspondiente depósito, de tal manera que se satisfacen los requerimientos de todos los clientes, se satisfacen todas las restricciones operacionales y se minimiza el coste global de transporte* (Toth y Vigo, 2002).

La eficiencia en la logística de transporte es cada vez más importante en la sociedad actual. Con pocas excepciones la planeación del transporte es realizada de forma manual, aunque está incrementando la tasa de implementación de herramientas de software apropiadas para ello (Hasle y Kloster, 2007).

Las características típicas de los problemas de ruteo y programación: componentes principales, restricciones operacionales y los posibles objetivos a alcanzar en el proceso de optimización son presentados en esta sección.

Componentes del problema

Red vial: Usada para el transporte de bienes, se describe como un grafo cuyos arcos representan las vías y los nodos representan los depósitos o clientes. Los arcos pueden ser dirigidos, cuando sólo pueden ser usados en un sentido, o no dirigidos, cuando pueden ser usados en ambos sentidos. Los arcos traen asociado un coste de viaje que generalmente representa su longitud y un tiempo de viaje, que puede depender del tipo de vehículo o el periodo de tiempo en el cual se realiza el viaje.

Clientes: Son los usuarios que reciben (o envían) bienes desde (hasta) el depósito. Los clientes se caracterizan por:

Localización: Ubicación geográfica del vértice de la red vial en donde se ubica el cliente.

Demanda: Cantidad de bienes que deben ser entregados o recogidos en el cliente, posiblemente de diferentes tipos.

Ventanas de tiempo: Periodos del día en los cuales puede ser atendido, debido a horarios de apertura, condiciones de circulación, etc.

Tiempos de servicio: Tiempo requerido para entregar o recoger los bienes en las instalaciones del cliente, pueden depender del tipo de vehículo.

Vehículos aceptados: Subconjunto de vehículos que pueden atender a un cliente específico, generalmente relacionadas con la accesibilidad al lugar en el que se encuentra el cliente y en las condiciones de las instalaciones requeridas.

Prioridades o penalizaciones: Son ponderaciones de la importancia o el coste de no satisfacer a un cliente, cuando no es posible satisfacer todas las demandas y es necesario reducir las cantidades entregadas a cada uno, o a algunos clientes.

Depósitos: Puntos de inicio y finalización de las rutas que sirven a los clientes, al igual que los clientes se encuentran geográficamente en vértices de la red, poseen una flota de vehículos (de uno o de varios tipos) asociada y uno o varios tipos de producto. En aplicaciones reales en las cuales los clientes se han dividido previamente entre los depósitos y los vehículos deben regresar al finalizar cada ruta, el problema puede descomponerse en varios problemas independientes, cada uno asociado a un depósito diferente.

Flota de vehículos: El transporte de los bienes debe hacerse en una flota de vehículos, cuya composición y tamaño puede definirse de acuerdo con los requerimientos de los clientes, la flota posee las siguientes características:

Depósito base: Punto desde el cual opera el vehículo, también es posible que un vehículo termine su recorrido en un nodo diferente a su base.

Capacidad del vehículo: Cantidad máxima que puede cargar el vehículo en todo momento, puede ser expresada en unidades de volumen, de masa, o en el número de palés que puede cargar.

Compartimientos: Posibles subdivisiones del vehículo que se caracterizan por su capacidad y por el tipo de bienes que pueden cargar.

Equipos: Equipos disponibles para la realización de las labores de cargue y descargue.

Vías utilizables: Es el subconjunto de vías (arcos) de la red que pueden ser transitadas con un vehículo determinado.

Costes: Son los costes asociados a la utilización del vehículo, pueden estar establecidos por distancia, por unidades de tiempo, por número de paradas, por rutas, etc.

Conductores: Son los encargados de operar los vehículos, satisfaciendo las restricciones inherentes a su contratación y regulaciones de la compañía como son: periodos de trabajo durante el día, número y duración de paradas durante el servicio, tiempo máximo de descanso, tiempo extra, etc. Generalmente las restricciones asociadas a ellos son consideradas en los vehículos.

Restricciones operacionales

Son condicionamientos asociados al transporte de las mercancías, que dependen de la naturaleza de los bienes transportados, del nivel de calidad de servicio y de las características de los clientes y los vehículos, las más comunes son:

Capacidad: A lo largo de cada ruta, la carga en ningún momento puede exceder la capacidad del vehículo.

Tipo de servicio: Se trata del servicio prestado a los clientes, el cual puede ser: de entrega de mercancías, de recogida de mercancías, o ambos.

Ventanas de tiempo: Los consumidores deben servirse en sus ventanas de tiempo, dentro del periodo de tiempo correspondiente a los periodos de trabajo de los conductores.

Restricciones de precedencia: Son condicionamientos asociados al orden en el cual son visitados los clientes en una ruta, a veces es necesario que un subconjunto de clientes sea atendido en la misma ruta y que exista un orden

específico de visita. En el caso de los problemas con recogida y entrega (*pickup and delivery problems*) es común que los bienes recogidos a un cliente sean entregados a otro dentro de la misma ruta; problemas de ida y vuelta, (*VRP with Backhauls*) en los cuales también se realizan labores de entrega y de recogida en un mismo vehículo, pero en las cuales se realizan primero todas las entregas y luego todas las recogidas de mercancía, por razones asociadas al diseño del vehículo y la facilidad para cargar, descargar y reorganizar las cargas, o para evitar problemas asociados a la contaminación de mercancías, etc.

Existen numerosas variantes entre las cuales están las que incluyen: cada vehículo puede operar en más de una ruta en el periodo de tiempo considerado, las rutas pueden tardar más de un día, tiempos estocásticos o dinámicos dependientes de la hora en que suceden, problemas para las cuales hay sólo un conocimiento parcial de las demandas de los clientes, de los costes o de los tiempos de viaje asociados con los arcos de la red vial, entre otros.

Objetivos de optimización

Para llevar a cabo la evaluación de el coste total de las rutas y la verificación del cumplimiento de las restricciones operacionales, se requiere conocer los costes de viaje y el tiempo de viaje entre cada par de clientes y entre los clientes y los depósitos. Para cada par de vértices i y j del grafo, un arco (i, j) es definido y su coste asociado $c_{i,j}$ es dado por el coste de la ruta más corta que inicia en i y llega a j en el grafo de rutas. El tiempo de viaje $t_{i,j}$ asociado con cada arco (i, j) del grafo, es calculado como la suma de los tiempos de viaje de los arcos pertenecientes a la ruta más corta para ir desde i hasta j en el grafo de caminos. En adelante, en lugar del grafo original de caminos, se considera el grafo completo asociado, que puede ser dirigido o no dependiendo de si las matrices de coste y tiempo de viaje son asimétricas o simétricas, respectivamente.

Los objetivos típicamente perseguidos son:

- Minimizar el coste total de transporte, dependiente del tiempo o la distancia recorridos y del coste fijo asociado al uso de los vehículos y sus correspondientes conductores;
- Minimizar el número de vehículos (o conductores) requeridos para satisfacer a todos los clientes;
- Balancear las rutas, por tiempo de viaje y carga de los vehículos;
- Minimizar las penalizaciones asociadas con un servicio parcial a los clientes o;

- Una combinación de los objetivos anteriores

3.3.1 Definición del problema y notación básica

El problema de ruteo de vehículos es una forma de hacer eficiente la gestión del transporte y coordinación en la cadena de suministros. A groso modo, éste detalla la manera óptima de asignar un conjunto de órdenes de transporte a una flota de vehículos y establecer la secuencia de paradas de cada vehículo, minimizando el coste total. Frecuentemente es la combinación de coste de adquisición de la flota, depreciación y operación del plan de rutas.

El VRP es un problema de optimización discreta, computacionalmente difícil. La capacidad para resolver instancias de este problema en un tiempo razonable ha venido incrementando desde su formulación por Dantzing y Ramser en 1959, debido al incremento en la potencia de cómputo y a los mejoramientos sustanciales de los métodos tanto exactos como heurísticos.

En este apartado se presenta una breve descripción de los problemas básicos de ruteo de vehículos. En primer lugar se examina el VRP con restricciones de capacidad (*Capacitated VRP*), luego el VRP restringido en distancia (*Distance-Constrained VRP*), el VRP con ventanas de tiempo (*VRP with Time Windows*), el VRP de ida y regreso (*VRP with Backhauls*) y el VRP con recogidas y entregas (*VRP with Pickup and Delivery*).

Problema de ruteo de vehículos con restricciones de distancia y capacidad

En la versión básica del VRP, conocida también como CVRP, del inglés *Capacitated VRP* todos los clientes demandan cierta cantidad de producto, la cual es determinística, conocida y no fraccionable. Los vehículos son idénticos, con base en un depósito central y poseen una restricción de capacidad. El objetivo es minimizar el coste total (función ponderada del número de rutas y del tiempo de viaje) para servir a todos los clientes.

Se modeliza el sistema de distribución como un grafo dirigido $G = (V, E)$ en el cual $V = v_0, v_1, \dots, v_n$ es el conjunto de vértices y $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. El vértice v_0 es el depósito que actúa como estación central para una flota homogénea de (conjunto K) vehículos idénticos con una capacidad máxima de carga igual a Q , mientras los vértices v_1, \dots, v_n representan la población de clientes.

Un peso positivo $c_{i,j}$ asociado con cada arco $(v_i, v_j) \in E$ que representa tiempo, distancia o coste de ir desde el vértice i al vértice j . La distancia de cada vértice a sí mismo se asume como un número positivo muy grande $c_{i,i} = T, \forall i \in \{0, \dots, N\}$

y T es un número muy grande ($c_{i,i} = +\infty$). Las distancias se consideran simétricas ($c_{i,j} = c_{j,i}$), $\forall (i, j) \in E$ y satisfacen la desigualdad del triángulo: $c_{i,j} + c_{j,k} \geq c_{i,k}$.

Cada cliente tiene asociada una demanda de entrega d_i no negativa, y dado un conjunto de vértices $S \subseteq V$, la expresión $d(S) = \sum_{i \in S} d_i$ representa la demanda total del conjunto. Para garantizar factibilidad se asume que $d_i \leq Q$, $\forall i = 1, \dots, n$.

El objetivo del CVRP es determinar el conjunto de rutas de mínimo coste que satisfagan (Toth y Vigo, 2002):

- Cada ruta inicia y termina en el depósito central v_0 ;
- Cada cliente es visitado exactamente una vez por exactamente una ruta;
- Cada ruta transporta las mercancías entregadas desde el depósito a los clientes visitados;
- La suma de la demanda de los vértices visitados no puede exceder la capacidad Q del vehículo empleado.

En la variante DVRP, la restricción de capacidad es reemplazada por una restricción de tiempo o longitud máxima de la ruta. Si coexisten restricciones tanto de capacidad como de distancia recorrida, el problema se conoce como un CVRP con restricciones de distancia DCVRP.

Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo

El VRP con ventanas de tiempo (VRPTW) del inglés *VRP with Time Windows* es una extensión del CVRP en la cual existen restricciones de capacidad, y cada cliente i está asociado con un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ conocido como ventana de tiempo. También son conocidos el instante de tiempo en el cual el vehículo deja el depósito, el tiempo de viaje $t_{i,j}$ para cada arco $(i, j) \in E$, y un tiempo de servicio adicional s_i para cada cliente. La atención a cada cliente debe empezar dentro de la ventana de tiempo, donde para por un tiempo igual a s_i . Además, si se presenta un arribo temprano a las instalaciones del cliente i , el vehículo espera hasta el instante de tiempo a_i para que pueda ser atendido. Dado que las ventanas de tiempo inducen una orientación a las rutas, normalmente se modela como un problema asimétrico.

El VRPTW consiste en encontrar una colección de K circuitos con el mínimo coste que satisfagan (Toth y Vigo, 2002):

- Cada ruta inicia y termina en el depósito central v_0 ;
- Cada cliente es visitado exactamente una vez por exactamente una ruta;

- La suma de la demanda de los vértices visitados no puede exceder la capacidad Q del vehículo empleado; y
- Para cada cliente i el servicio inicia dentro de la ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ y el vehículo se detiene por s_i instantes de tiempo.

El VRPTW es un problema NP-hard en sentido estricto, que generaliza el CVRP, que surge cuando $a_i = 0$, $b_i = +\infty$, para cada $i \in V \setminus \{0\}$.

Problema de ruteo de vehículos con viajes de regreso

El problema de ruteo de vehículos con viajes de regreso (VRPB), del inglés *VRP with Backhauls*, es la extensión de el CVRP en el que el conjunto de clientes $V \setminus \{0\}$ está dividido en dos subconjuntos, El primer subconjunto, L , contiene n clientes *de ida* o *linehauls* que demandan una cantidad de producto que les debe ser entregada; y el subconjunto B que contiene m clientes *de regreso* o *backhauls* desde los cuales se debe recoger una cantidad de producto para ser llevada al depósito. Los clientes se numeran así: $L = \{1, \dots, n\}$ y $B = \{n + 1, \dots, n + m\}$.

En el VRPB, hay una restricción de precedencia entre los clientes *de ida* y los *de regreso*, así en una ruta que contiene los dos tipos de clientes se debe servir a todos los clientes que demandan entrega de productos antes de servir a los que demandan recogida de productos. Cada cliente i tiene asociada una demanda d_i de entrega o de recogida de productos dependiendo del tipo de cliente.

El objetivo del VRPB es determinar el conjunto de K rutas con mínimo coste que satisfagan:

- Cada ruta inicia y termina en el depósito central v_0 ;
- Cada cliente es visitado exactamente una vez por exactamente una ruta;
- Cada ruta transporta las mercancías entregadas desde el depósito a los clientes visitados;
- Cada ruta transporta las mercancías recogidas a los clientes hasta el depósito central;
- La demanda total de los clientes de ida y de los clientes de regreso en un circuito, no exceden la capacidad Q del vehículo empleado; y
- En cada circuito todos los clientes de ida preceden a todos los clientes de regreso.

Por lo general no se consideran rutas con clientes únicamente de regreso, la restricción de precedencia induce un orden de las rutas “mixtas”.

Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas

El problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD, *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery*) es una modelización de un sistema de distribución como un grafo dirigido $G = (V, E)$ en el cual $V = v_0, v_1, \dots, v_n$ es el conjunto de vértices y $E = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. El vértice v_0 es el depósito que actúa como estación central para una flota homogénea de vehículos con una capacidad máxima de carga igual a Q , mientras los vértices v_1, \dots, v_n representa la población de clientes. Cada cliente tiene asociada una demanda de entrega d_i y una demanda de recogida p_i , no negativas. Un peso positivo $c_{i,j}$ asociado con cada arco $(v_i, v_j) \in E$ que representa tiempo, distancia o coste de ir desde el vértice i al vértice j . La distancia de cada vértice a sí mismo se asume como un número positivo muy grande $c_{i,i} = T, \forall i \in \{0, \dots, N\}$ y T es un número muy grande ($c_{i,i} = +\infty$). Las distancias se consideran simétricas ($c_{i,j} = c_{j,i}$) y satisfacen la desigualdad del triángulo: $c_{i,j} + c_{j,k} \geq c_{i,k}$.

El objetivo del VRPSPD es determinar el conjunto de rutas de mínimo coste que satisfagan (Zachariadis y cols., 2009):

- Cada ruta inicia y termina en el depósito central v_0 ;
- Cada cliente es visitado exactamente una vez por exactamente una ruta;
- Cada ruta transporta las mercancías entregadas desde el depósito a los clientes visitados;
- Cada ruta transporta las mercancías recogidas a los clientes hasta el depósito central;
- En ningún punto, de ninguna ruta, la cantidad transportada de bienes puede exceder la capacidad Q del vehículo empleado

3.3.2 Modelos básicos para el problema de ruteo de vehículos

Toth y Vigo (2002), identifican tres enfoques básicos de modelización para el VRP en la literatura: *formulaciones de flujo de vehículos*, que utilizan variables enteras asociadas con los arcos del grafo que cuentan el número de veces que el arco es recorrido por un vehículo. Son usados para versiones básicas del VRP, generalmente cuando el coste de la solución puede expresarse como la suma de los costes asociados con los arcos y las restricciones más relevantes se refieren a la transición

directa entre clientes en la ruta. No son apropiados para la modelización de aspectos prácticos cuando el coste de la solución depende de la secuencia completa de vértices o sobre un tipo de vehículo asignado a una ruta. El modelo de programación lineal para este enfoque suele ser muy débil cuando se añaden restricciones operacionales.

Las *formulaciones de flujo de mercancías*, implican variables enteras adicionales que representan el flujo de mercancías a lo largo de las vías transitadas por los vehículos, sólo recientemente se han utilizado este tipo de formulaciones para encontrar soluciones exactas del CVRP.

El último tipo de formulación tiene un número exponencial de variables binarias, cada una asociada con un circuito factible, el VRP es formulado como un *problema de partición de conjuntos* (SPP, *Set Partitioning Problem*) llamado así por la determinación de circuitos de mínimo coste, que sirven a cada cliente una vez y, posiblemente satisfacen restricciones adicionales. Su principal ventaja es que permiten representar soluciones más complejas que dependen de la secuencia de arcos y el tipo de vehículos. Produce generalmente una formulación cuya relajación de programación lineal es más ajustada. Sin embargo, requiere trabajar con un gran número de variables.

3.3.3 Métodos usados para el ruteo de vehículos en la industria

El resultado de una herramienta de ruteo es altamente dependiente del solucionador VRP. En primer lugar, la aplicabilidad de la herramienta es determinada por la riqueza del problema de VRP, el grado en el cual representa aspectos de las aplicaciones de la vida real; en segundo lugar, el desempeño del algoritmo solucionador, por ejemplo medido como la calidad del objetivo como una función del tiempo de procesamiento para instancias típicas, determina el mejoramiento potencial de la herramienta de ruteo. Existen otros aspectos importantes que influyen en la calidad de la solución, como son la calidad de los datos de entrada, la interfaz con el usuario, la interfaz con los sistemas de información relacionados, entre otros.

Métodos exactos de solución de VRP

La mayoría de las variantes del VRP han sido resueltas por métodos exactos como relajación lagrangeana, ramificación y acotamiento y generación de columnas. Estos métodos tienen limitaciones para resolver VRP de gran tamaño, y han sido utilizados ampliamente para estudiar la naturaleza de los VRPs (Hasle y Kloster, 2007).

Métodos heurísticos de solución de VRP

El VRP es un problema de optimización muy difícil, que toma mucho tiempo de solución en instancias de gran tamaño. Por esta razón, es común recurrir a métodos de aproximación, que pueden basarse en métodos exactos. Por ejemplo el método de ramificación y acotamiento puede generar una solución aproximada algún tiempo después de que se haya encontrado una solución factible, la cual sirve como un límite superior para la respuesta óptima, pero a veces cuesta mucho tiempo encontrar la primera solución factible y la brecha entre el óptimo y una solución factible permanece amplia por mucho tiempo. Para problemas que son NP-difíciles en sentido estricto, métodos no sistemáticos que no garantizan óptimos son buenas alternativas de solución incluso para problemas de tamaño moderado si la meta es encontrar soluciones de buena calidad en un tiempo limitado. Tales métodos se conocen como *heurísticas*.

Búsqueda local y metaheurísticas para el CVRP. Una representación posible para la solución del problema es una en la cual todas las rutas en la solución se unen en una gran ruta. Duplicados de los depósitos pueden servir de delimitadores: La secuencia s se forma por los índices de los clientes $(0, o_{1,1}, \dots, o_{1,n_1}, 0, \dots, 0, o_{K,1}, \dots, o_{K,n_K}, 0)$, donde algunas de las subsecuencias que corresponden a las rutas pueden estar vacías (sí el vehículo correspondiente no es usado).

Búsqueda local con relocalización para el CVRP. El operador de relocalización simplemente reubica un cliente a una nueva posición dentro de la secuencia, un cambio entre dos clientes en la secuencia implica la eliminación de unos arcos y la inclusión de unos nuevos en su reemplazo. La diferencia en la magnitud de los arcos eliminados y los incluidos se conoce como ahorros. Es necesario verificar la factibilidad al realizar cambios en el conjunto de rutas.

Pueden establecerse heurísticas constructivas para resolver el problema de CVRP, a partir de la lista de órdenes no servidas y su inserción en una vecindad. Para cada orden no atendida se busca el mejor punto de inserción dentro de la vecindad que obedece a la ruta que se está construyendo, cuando no es posible incluir ningún punto adicional a la ruta se inicia una nueva.

Métodos para el VRP en la industria

En la industria, debido a la naturaleza de los problemas de ruteo y a su tamaño, muchas veces es viable únicamente el uso de heurísticas. Las heurísticas para resolver problemas de ruteo de vehículos pueden ser metaheurísticas basadas en búsqueda local, métodos basados en poblaciones o híbridos entre los dos enfoques.

3.3.4 Trabajos previos relacionados

Hasta ahora, es evidente que el problema de ruteo de vehículos en la industria presenta muchas facetas que dependen del entorno en el que tiene lugar. Por ejemplo, puede tratarse de si se trata de compañías que se dedican a proveer servicios de transporte o de compañías que gestionan su propia flota de vehículos para satisfacer sus necesidades; además, el tipo de industria condiciona el transporte, así: alimentos, bebidas, correo, diarios, residuos sólidos, etc, usualmente presentan diferentes necesidades de transporte (Hasle y Kloster, 2007).

Se observa un auge en la formulación y solución de problemas de ruteo de vehículos enriquecidos, como se aprecia más adelante en esta sección, haciendo uso de herramientas computacionales cada vez más potentes y de mejores algoritmos para encontrar formulaciones cada vez más adecuadas a los problemas de transporte industrial. Las aplicaciones de VRP reales se extienden a partir del tipo de operación, y otras características que provienen de la naturaleza de los suministros, la demanda y la infraestructura entre otros aspectos.

En esta sección se hace una revisión del estado del arte en lo que respecta al VRP, por ser un tema fundamental para abordar la solución del problema de logística integrada objeto de estudio de esta tesis.

La literatura respecto al problema de ruteo de vehículos es abundante, debido a la importancia de la logística en el desempeño global de las organizaciones productivas y a la diversidad de problemas que se han abordado en su estudio, razón por la cual se han escogido ciertos tópicos relevantes que dan una idea respecto de su estructura. Los ejes tomados en consideración son básicamente los siguientes: Generalidades, ventanas de tiempo, flota heterogénea, entregas y recogidas, fraccionamiento de las entregas, camiones y tráileres, múltiples viajes, periodicidad y múltiples períodos, integración, estocasticidad, sistemas de apoyo a las decisiones, etc.

Restricciones y objetivos de compatibilidad

Restricciones asociadas a los tipos de mercancías que pueden llevarse simultáneamente pueden ser de interés, restricciones de precedencia en cuanto al transporte de sustancias químicas para evitar contaminación. Acceso a las instalaciones por parte de los diferentes tipos de vehículo, equipos especiales o certificaciones especiales del conductor, etc., pueden ser modelizados como restricciones de compatibilidad. También se consideran penalizaciones para modelizar este tipo de desviaciones de ciertos objetivos.

Distancias, tiempos de viaje y tiempos de servicio

La mayor parte de las aplicaciones propuestas en la literatura consideran distancias Euclidianas, y velocidades constantes. En el mundo real las aplicaciones tienen en cuenta una distancia, tiempo de viaje y costes razonablemente precisos.

Depósitos, rutas, inicio y final

El modelo VRP básico contiene un solo depósito, pero en la práctica puede haber más de uno y puede que no exista una conexión explícita entre vehículos y depósitos, así los vehículos pueden iniciar en instalaciones arbitrarias e inclusive realizar múltiples recorridos en el horizonte de planeación. El último caso puede solucionarse agrupando varias rutas para un mismo vehículo, pero definiendo restricciones temporales con el fin de no superponer los viajes. Estas características añaden complejidad al modelo básico al implicar una extensión en el espacio de búsqueda.

En esta categoría se relacionan los trabajos de Renaud y cols. (1996), problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos con restricciones de capacidad y de longitud de la ruta (MDVRP); Hasle y Kloster (2007) presenta una descripción del problema de ruteo de vehículos y de algunas de sus variantes en un ambiente industrial; el trabajo de Kytöjoki, Nuortio, Bräysy, y Gendreau (2007), en el cual se utiliza una heurística de vecindad variable para resolver el VRP con restricciones de capacidad; Zeng, Ong, Ng, y Liu (2008), Problema real de distribución de bebidas ligeras (VRP); el trabajo de Hoff, Andersson, Christiansen, Hasle, y Låkketangen (2010), relacionado con la composición de la flota y su impacto en el ruteo de vehículos; el trabajo de Sasikumar (2010), en el cual se analiza el papel de un prestador de servicios logísticos; Bogataj y Grubbström (2012) que hace una extensión de la teoría de MRP hacia la logística inversa y sus consecuencias en el transporte; Lalla-Ruiz, Expósito-Izquierdo, Taheripour, y VoB (2016), analizan un sistema de ruteo de vehículos abierto con múltiples depósitos por medio de una formulación de programación lineal entera mixta y el de J. Li, Li, y Pardalos (2016), en el cual se analiza un sistema multidepósito con ventanas de tiempo

en el cual las rutas terminan en destinos flexibles, ellos proponen un modelo de programación entera y una solución mediante un algoritmo genético híbrido.

Tiempo de espera, ventanas de tiempo y restricciones de capacidad

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, VRPTW, del inglés *Time windows VRP* es una clase de problema de ruteo de vehículos en la cual existen restricciones relacionadas con el tiempo en el cual deben visitarse los clientes. Tales problemas poseen límites de tiempo superiores e inferiores, y se requiere que las entregas o recogidas sean hechas dentro de esos límites. Es un problema más complejo porque debe considerar tiempos de ruta, tiempos de llegada y de salida, capacidades y otros recursos.

Pueden existir ventanas de tiempo de dos tipos: rígidas o de obligatorio cumplimiento, y suaves o de horarios preferidos de servicio, en estas últimas el servicio puede iniciar antes o después de la ventana de tiempo. Si un vehículo llega temprano a un cliente, esperar hasta el tiempo de apertura de la ventana *suave* no es una opción, el cliente es servido fuera de la ventana de tiempo *suave* mencionada y la compañía incurre en penalizaciones por atención prematura o tardía. La meta es construir un conjunto de rutas de vehículos del coste mínimo total (Taş, Dellaert, van Woensel, y de Kok, 2013).

Otras variantes incluyen la presencia de varias ventanas de tiempo para un cliente, en cuyo caso hay un grado de libertad mayor al tener que decidir además en cual de las ventanas ha de visitarse el cliente. De manera similar a las ventanas de tiempo, existen restricciones de capacidad suaves, bajo las cuales existe cierta flexibilidad en el manejo de las cargas de los vehículos (Hasle y Kloster, 2007).

El VRP con ventanas de tiempo es quizás una de las variantes más estudiadas del problema de ruteo de vehículos, entre estas están los trabajos de Feillet, Dejax, Gendreau, y Gueguen (2004) y Chabrier (2006) en los cuales se resuelve el problema a partir de un enfoque de ruta elemental más corta, mediante métodos exactos que incluyen generación de columnas; Calvete, Galé, Oliveros, y Sánchez-Valverde (2007) cuyo problema de ruteo de vehículos múltioobjetivo es resuelto por enumeración seguida de optimización (EFBO); Azi, Gendreau, y Potvin (2010), Ruteo con múltiple uso de los vehículos y flota de tamaño fijo (VRPTW modificado); Benjamin y Beasley (2010), Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, para recolección de basuras, con descanso del conductor, un sólo depósito y múltiples sitios de disposición (WC-VRPTW); Macedo, Alves, Valério de Carvalho, Clautiaux, y Hanafi (2011), ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y múltiples rutas (MVRPTW); Ribeiro, Laporte, y Mauri (2012), Problema de ruteo de reacondicionamiento de equipos (WRRP) variante del VRPTW; Hollis y Green (2012), 2012, Problema real de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo; Labadie, Mansini, Melechovský, y Wolfler Calvo (2012), Problema de Orientación

de equipos con ventanas de tiempo (TOPTW); Vidal, Crainic, Gendreau, y Prins (2013), ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), mediante un algoritmo genético; y Schneider, Sand, y Stenger (2013), ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) mediante Búsqueda Tabú, para la evaluación del impacto debido a la incorrecta manipulación de las ventanas de tiempo.

Flota, vehículos y conductores

El VRPTW utiliza vehículos idénticos, pero un objetivo jerárquico que en primer lugar intenta utilizar el menor número de vehículos y luego minimizar la distancia total.

Una de las características más importantes de un sistema de recolección y distribución es la composición de la flota, la cual es usualmente heterogénea, por diferentes factores: se adquiere en varios periodos así que las condiciones tecnológicas y del mercado podrían haber cambiado, además, una flota mixta es más flexible y versátil que una fija. Usualmente la flota de vehículos se clasifica por sus dimensiones físicas, compatibilidad con determinados productos, clientes o depósitos, y restricciones de costes fijos y variables (Hoff y cols., 2010). Dependiendo de la naturaleza del entorno de aplicación del VRP, pueden tenerse en cuenta los costes de adquisición y depreciación de la flota dentro de la función objetivo.

El problema de ruteo de vehículos con una flota heterogénea fija (HFFVRP del inglés *Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem*) es un VRP con una flota de tamaño fijo compuesta por varios tipos de vehículo, mientras que en el problema de ruteo de vehículos de mezcla y tamaño de la flota (FSMVRP, del inglés *Fleet Size and Mix VRP*) se tiene por objetivo el diseño de la flota, que consiste en determinar el tamaño y la composición óptima para usar los vehículos de la manera más eficiente (Hoff y cols., 2010).

El problema de ruteo de vehículos de mezcla y tamaño de la flota con ventanas de tiempo (FSMVRPTW, del inglés *Fleet size and mix vehicle-routing problem with time windows*), definido por Liu y Shen en 1999, se caracteriza por la existencia de una flota heterogénea de vehículos, en la cual cada vehículo posee su propia capacidad y coste fijo. Tal modelo fue resuelto usando una metaheurística de enfriamiento determinístico de múltiple inicio en (Bräysy y cols., 2008).

También suele considerarse lo que respecta a la jornada de trabajo, horas de descanso, etc., pues las restricciones establecidas en la legislación de los diferentes países hace que una solución al VRP pueda ser ilegal.

Flota heterogénea: Cheong, Leong, y Huang (2002), Problema de ruteo de vehículos, mezcla y tamaño de la flota (FSMVRP) para una empresa de bebidas; Lima, Goldbarg, y Goldbarg (2004), Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea (HVRP); Privé y cols. (2006), Distribución de bebidas y recolección de envases

(SDP), variante del HFFVRPTW con restricciones de capacidad y volumen; Choi y Tcha (2007), Problema de ruteo con flota de vehículos heterogénea (HVRP); Bräysy y cols. (2008), Problema de determinar el tamaño y la composición de una flota heterogénea de vehículos y ruteo con ventanas de tiempo (FSMVRPTW); Prins (2009), Problemas de ruteo de vehículos con flota heterogénea (HFVRP) y problema de mezcla de la flota de vehículos y ruteo (VFMP), variante del HFVRP con cantidad ilimitada de vehículos; Repoussis y Tarantilis (2010), ruteo de vehículos con mezcla y tamaño de la flota con ventanas de tiempo (FSMVRPTW); Brandão (2011), Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea HFFVRP (nivel operativo); Mar-Ortiz (2011), Optimizar el diseño de la red de logística inversa para la recolección de residuos de equipo eléctrico y electrónico (WEEE) X. Li y cols. (2012), ruteo de vehículos con flota heterogénea y abierta de vehículos (HFFOVRP).

Tipos de orden y tipos de operación

La existencia de órdenes de recogida y de entrega con un mismo vehículo inducen relaciones de precedencias entre las visitas, en transporte de personas implicarían además restricciones en lo que respecta a tiempo o distancia recorridos por un pasajero.

El problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas, VRPPD del inglés *Vehicle Routing Problem with Pickups and Deliveries*, consiste en una extensión del VRP que incluye la posibilidad de realizar tanto recogida como entrega de productos cada vez que se visita un nodo de la red logística. Existen muchos sistemas logísticos en los que se lleva a cabo recogida y entrega de productos, de diversas maneras. En algunos casos se considera necesario realizar todas las recogidas antes de realizar todas las entregas como ocurre con el servicio de correos, también pueden alternarse de diferentes maneras primero se realizan todas las entregas y luego las recogidas, entregas y recogidas mixtas, entregas y recogidas simultáneas, etcétera (Nagy y Salhi, 2005). Nagy y Salhi (2005) señalan además que los sistemas en los cuales se realizan primero todas las entregas y luego todas las recogidas producen soluciones pobres en calidad al ser innecesariamente restringidas.

En algunos sistemas VRPPD en los que un cliente requiere una entrega, una recogida o ambas, como ocurre en las empresas de agua mineral embotellada. Hay algunos tipos de rutas que solucionan esta clase de problemas: circuitos Hamiltonianos, doble vía (haciendo las entregas antes de iniciar las recogidas) y lazo que es una mezcla de las dos explicadas previamente. Este tipo de soluciones han sido frecuentemente obtenidas mediante metaheurísticas (Hoff, Gribkovskaia, Laporte, y Løkketangen, 2009).

El problema de ruteo de vehículos con viaje de regreso VRPB, del inglés *Vehicle Routing Problem with Backhauls* es también conocido como un VRP de entrega

inicial y recogida posterior. En este caso la población de clientes puede ser agrupada en un conjunto de clientes de entregas (*linehaul customers*) y un conjunto de clientes de recogidas (*backhaul customers*), en el cual las demandas son servidas por una flota de vehículos operando en un depósito central. Así, cada vehículo debe satisfacer las entregas y luego las recogidas que son transportadas de regreso al depósito. Restricciones de precedencia se asumen debido a la reorganización de las cargas (entregadas y recogidas) por los vehículos. Primero, los vehículos deberían entregar sus cargas, y luego deberían recibir las cantidades entregadas por los clientes (Toth y Vigo, 1999).

El Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas mixtas VRPMPD, del inglés *VRP with mixed pick-ups and deliveries* es un sistema logístico en el cual los clientes reciben bienes o los regresan a un depósito central. Sin embargo, no existen restricciones de precedencia que obliguen un orden de entregas y recogidas debido al diseño de vehículos moderno, que incluye puertas lateral y posterior que permiten la acomodación de nuevas cargas sin necesidad de reordenar las que están en el vehículo. Sus soluciones son de mayor calidad si se comparan con las soluciones del tipo VRPB, pero la determinación de las restricciones del máximo de carga transportada llega a ser mucho más difícil debido a su fluctuación. Para determinar la factibilidad en términos de restricciones de capacidad, se debe evaluar la carga en cada uno de los arcos recorridos y compararla con la capacidad del vehículo (Zachariadis y cols., 2009).

Otra variante del problema de ruteo de vehículos tradicional que considera tanto entregas como recogidas simultáneamente es el VRP con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD, del inglés *VRP with simultaneous pickups and deliveries*). El VRPSPD incluye flujos de material de retorno desde los clientes a los puntos de distribución, además de los comunes flujos de distribución de mercancías (Nagy y Salhi, 2005).

VRPSPD modela un sistema de distribución como un grafo dirigido V, E donde V es el conjunto de vértices y E es el conjunto de arcos. El vértice v_0 corresponde al depósito que actúa como la estación central para una flota homogénea de vehículos con capacidad máxima de carga igual a Q , mientras que los demás vértices representan la población de clientes. Cada cliente tiene asociada una cantidad a entregar no negativa y una cantidad a recoger no negativa. Un peso relativo asociado a cada arco representa el tiempo, distancia o coste entre dos vértices adyacentes i y j . La distancia de un vértice a sí mismo se asume como un número positivo muy grande, las distancias se asumen simétricas y se satisface la desigualdad del triángulo. el objetivo del problema VRPSPD es determinar el conjunto de rutas de mínimo coste que satisface: cada ruta empieza y termina en el depósito central v_0 , cada cliente es visitado exactamente una vez, por exactamente una ruta, cada ruta transporta las cantidades desde el depósito a los clientes visitados, cada ruta transporta las cantidades recogidas desde los clientes visitados hacia el depósito

central, en ningún punto de la ruta los bienes transportados pueden exceder la capacidad del vehículo (Zachariadis y cols., 2009).

Algunos trabajos con entregas y recogidas, se listan aquí: Gribkovskaia, Halskau sr., Laporte, y Vlček (2007), Problema de ruteo de un vehículo con recogidas y entregas (SVRPPD); Gribkovskaia, Laporte, y Shyshou (2008), Ruteo de un solo vehículo con entregas y recogidas selectivas (SVRPDSP); Gutiérrez-Jarpa, Desaulniers, Laporte, y Marianov (2010), Problema de ruteo de vehículos con entregas, recogidas selectivas y ventanas de tiempo (VRPDSPTW); Hoff y cols. (2009), Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas (VRPPD);

Zachariadis y cols. (2009); Çatay (2010); Zachariadis y cols. (2010); Subramanian, Drummond, Bentes, Ochi, y Farias (2010); Zachariadis y Kiranoudis (2011); ? (?), Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPPD); Fan (2011), Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultánea, basado en la satisfacción del cliente (VRPSPDCS), variante del VRPTWSPD; Karaoglan, Altiparmak, Kara, y Dengiz (2012), Problema de localización y ruteo con recogida y entrega simultáneas (LRPSPD); Kassem y Chen (2013), Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en logística inversa (VRPSPD); Ting y Liao (2013), Problema de recogidas selectivas y entregas (SPDP); Wang y Chen (2013), Problema flexible de entregas y recogidas con ventanas de tiempo (FDPPTW); Kachitvichyanukul, Sombuntham, y Kunnapapdeelert (2015), Representaciones para la solución de un problema de ruteo de vehículos multi depósito con múltiples requerimientos de recogidas y entregas por medio de un algoritmo de optimización por enjambre de partículas.

El VRP básico incluye una única visita a cada cliente, sin embargo una característica a considerar es la posibilidad de fraccionamiento de las entregas, del inglés *split*. El problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionadas (SDVRP, del inglés *split delivery vehicle routing problem*) fue introducido por Dror y Trudeau en los años 1980s. Es una extensión del problema de vehículos restringido en capacidad CVRP, *capacitated vehicle routing problem*, que permite fraccionar la carga entre dos o más vehículos. El SDVRP puede representarse en el grafo mencionado en el cual hay una demanda asociada con cada centro, el objetivo es encontrar un conjunto de rutas tal que minimice la distancia total recorrida mientras que se satisfacen las siguientes condiciones: La mercancía demandada en el punto i es entregada por uno o más vehículos y los vehículos no exceden su capacidad en ningún momento (Jin y cols., 2008).

Fraccionamiento de las entregas (*Split*): Jin y cols. (2008), Problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP); Feillet y cols. (2010), Problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP) y problema de diseño de rutas de tránsito de autobuses rápidos (BRTDP); Archetti, Feillet, Gendreau, y Grazia Speranza (2011), Problema de ruteo de vehículos (VRP) y problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP) con flotas tanto limitadas

como ilimitadas; Belfiore y Yoshizaki (2013), Problema de mezcla y tamaño de la flota, y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y entregas fraccionables (FSMVRPTWSD).

Múltiples viajes: Brandão y Mercer (1997), Problema de programación y ruteo de vehículos con múltiples viajes (MTVRSP) incluye ventanas de tiempo, flota heterogénea y restricciones de accesibilidad; Fagerholt (1999), Decisión de la flota óptima en un problema de ruteo de vehículos de múltiples viajes (VRPMT); Sen y Bulbul (2008), Revisión del problema de ruteo de vehículos, con múltiples viajes por periodo; Battarra, Monaci, y Vigo (2009), Problema de ruteo de vehículos de mínimo número de múltiples viajes (MMTVRP).

En problemas de mantenimiento, en el cual las rutas implican servicio a una determinada instalación, generalmente no existen restricciones de capacidad pero se imponen restricciones asociadas con los tiempos de espera de un cliente por servicio. Otros problemas pueden estar asociados más a los arcos que a los nodos, tal es el caso de la remoción de nieve y la recolección de residuos sólidos en la acera, etc., que deben ser abordados mediante un enfoque alternativo.

En la industria alimentaria y de bebidas, las órdenes suelen ser periódicas a lo largo de un horizonte de tiempo, que constituyen patrones, generalmente complejos, este es el caso del VRP periódico (PVRP, Periodic VRP).

Periódico o múltiples periodos: Gulczynski, Golden, y Wasil (2011), Problema de ruteo de vehículos periódico (PVRP); Cacchiani, Hemmelmayr, y Tricoire (2012), Problema de ruteo de vehículos periódico (PVRP); Zhang, Che, Cheang, Lim, y Qin (2013), Problema de ruteo de vehículos multiperiodo con beneficios (mVRPP)

Integrados: L. Lei, Shuguang, Ruszczyński, y Park (2006), Problema integrado de producción, inventario y distribución (PIDRP) que implica transportadores heterogéneos con tiempos de viaje no instantáneos, múltiples clientes con su propia capacidad de inventario; Candas y Kutanoglu (2007), Diseño de la red logística y problema de inventarios integrados; Bard y Nananukul (2010), Problema de producción, inventario, distribución y ruteo (PIDRP); Akkerman, Farahani, y Grunow (2010), Gestión cuantitativa de la gestión de operaciones en la distribución de alimentos; Song y Furman (2013), Problema de ruteo e inventarios (IRP).

Camiones y remolques: Lin y cols. (2010), Problema de ruteo de camiones y remolques relajado (RTTRP); Villegas y cols. (2011), Problema de ruteo de camiones y remolques (TTRP) con flota heterogénea de camiones y remolques, con restricciones de accesibilidad a los clientes; Derigs, Pullmann, y Vogel (2013), Problema de ruteo de camiones y tractocamiones TTRP; Dondo y Cerdá (2013), Problema de ruteo de vehículos con transbordo *cross-docking* (VRPCD), vehículos homogéneos, recogida y entrega, programación de vehículos en el cross-dock; El Hachemi, Gendreau, y Rousseau (2013), Problema de programación y ruteo sincronizados

en la industria forestal, incluyendo recogidas y entregas, inventarios, múltiples productos, múltiples fuentes y múltiples destinos (LTSP).

Aleatoriedad y dinamismo

Los problemas de ruteo de vehículos generalmente tienen lugar en un ambiente de incertidumbre, si las variables aleatorias se incluyen en la formulación podría considerarse un VRP estocástico (stochastic VRP), cuyo objetivo sería usualmente el de minimizar el coste esperado. La consideración de variables aleatorias hace más compleja la solución del problema, una forma de enfrentarlas es la generación de escenarios para diferentes realizaciones de las variables de acuerdo con su distribución, y resolver cada realización utilizando métodos determinísticos. El dinamismo en la ruta se refiere a una estrategia de solución en la cual los datos de entrada cambian mientras se está resolviendo el VRP.

Como ejemplos de VRP con variables aleatorias, se tienen entre otros: Christiansen y Lysgaard (2007), Problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica y restricciones de capacidad (CVRPSD); Haugland, Ho, y Laporte (2007), Diseño de distritos para el problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica con flota homogénea (SVRP); K. Tan, Cheong, y Goh (2007), Problema de ruteo de vehículos multiobjetivo con demanda estocástica (VRPSD); Chen, Hsueh, y Chang (2009), Problema de programación de la producción y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para productos perecederos PS-VRPTW-P con demanda y utilidad aleatorias; H. Lei y cols. (2011), Problema de ruteo de vehículos con capacidad restringida, demanda estocástica y ventanas de tiempo (CVRPSDTW); Agra y cols. (2013), Problema de ruteo de vehículos robusto con ventanas de tiempo y tiempos de viaje inciertos (T-VRPTW). Pillac, Gendreau, Guéret, y Medaglia (2013), Problemas de ruteo de vehículos dinámico.

Tiempo de respuesta

En el medio industrial, el tiempo de respuesta es fundamentalmente importante. En decisiones estratégicas y tácticas puede considerarse razonable un tiempo de horas o de días, pero no en el nivel operativo.

Sistemas de apoyo a las decisiones: Golden y Wasil (1987), Software para el ruteo de vehículos; Ruiz, Maroto, y Alcaraz (2004), Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea y sistema de apoyo a las decisiones (DSS); Kant y cols. (2008), Implementación de software para ruteo en una empresa de bebidas; Mendoza, Medaglia, y Velasco (2009), Sistema de apoyo a las decisiones para el problema de ruteo de vehículos restringido en distancia (DVRP).

Otros: Bektas (2006), Problema de múltiples agentes viajeros (mTSP), que puede extenderse hacia el VRP; Haughton (2008), Implicaciones de la asignación de territorios exclusivos al problema de ruteo; Zhou y Xu (2009), Modelo para determinar la pertinencia o no de ampliar o ubicar nuevos distribuidores o centros de recolección de envases; Elaoud, Teghem, y Loukil (2010), Problema del agente viajero (TSP) multiobjetivo; Mladenović, Urošević, Hanafi, y Ilić (2012), Problema de recogida y entrega de un producto por un agente viajero (1-PDTSP); Nguyen y cols. (2012), Problema de localización y ruteo de dos niveles (LRP-2E), Primer nivel desde un depósito principal a depósitos satélite, a ser localizados, segundo nivel hasta los clientes;

Tabla 3.6: Revisión del estado del arte

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Renaud y cols. (1996)	Problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos con restricciones de capacidad y de longitud de la ruta (MDVRP)	Algoritmo de búsqueda Tabú.
Hasle y Koster, 2007	Ruteo de vehículos en la industria	Descripción del problema de ruteo de vehículos y de algunas de sus particularidades es la industria.
Kytöjoki et al., 2007	Problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad (VRP)	Heurística de búsqueda de vecindad variable. El procedimiento de búsqueda guía una heurística de mejoramiento estándar, se usa una estrategia remanente de una metaheurística de búsqueda local para escapar de mínimos locales.
Zeng et al., 2008	Problema real de distribución de bebidas ligeras (VRP)	Solución basada en el problema de la mochila, asignación basada en un procedimiento generalizado de cruce.
Hoff et al., 2010	Descripción de aspectos de composición de la flota y ruteo de vehículos	Revisión de la literatura y formulación matemática básica
Sasikumar, 2010	Ruteo de vehículos para un proveedor logístico (3PRLP)	Enfoque híbrido algoritmos Sweep y Clarke and Wright empleando Recocido simulado.
Bogataj y Grubbs-tröm, 2012	Extensión de la teoría de MRP hacia la logística inversa incluyendo consecuencias en el transporte	Se utiliza el Valor Presente Neto como medida de desempeño; análisis matricial entrada salida y análisis del tiempo por medio de transformadas de Laplace.

Ventanas de tiempo

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Feillet et al., 2004	Problema de ruta elemental más corta con restricciones de recursos (ESPPRC) y VRPTW	Método de solución exacto para el ESPPRC, basado en generación de columnas.
Chabrier, 2006	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)	Generación de columnas, mejoramiento teórico y práctico al algoritmo de caminos elementales.
Calvete et al., 2007	Problema de ruteo de vehículos múltiojetivo, se busca evitar la subutilización de vehículos y conductores, o satisfacer a los clientes en ventanas de tiempo suaves (VRPSTW)	Programación de metas que se resuelve mediante enumeración seguida de optimización (EFBO), primero se calculan las rutas factibles y luego se hace una selección de las mejores
Azi et al., 2010	Problema de ruteo con múltiple uso de los vehículos y flota de tamaño fijo (VRPTW modificado)	Algoritmo de ramificación y precio, cuyos límites inferiores son calculados por la solución de la relajación del problema de LP usando generación de columnas, los subproblemas son problemas de ruta más corta con restricciones de recursos.
Benjamin y Beasley, 2010	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, para recolección de basuras, con descanso del conductor, un sólo depósito y múltiples sitios de disposición (WC-VRPTW)	Solución heurística con solución inicial que intenta aprovechar al máximo los vehículos y mejora por procedimientos de intercambio, dos algoritmos metaheurísticos basados en búsqueda tabú y búsqueda de vecindario variable.
Macedo et al., 2011	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y múltiples rutas (MVRPTW)	Nuevo algoritmo iterativo exacto, basado en un modelo de flujo de red pseudo polinomial cuyos nodos representan instantes de tiempo, y cuyos arcos representan rutas factibles.
Ribeiro et al., 2012	Problema de ruteo de reacondicionamiento de equipos (WRRP) variante del VRPTW	Metaheurísticas como búsqueda de conglomerados, búsqueda en grandes vecindarios y búsqueda local iterativa.
Hollis y Green, 2012	Problema real de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo tanto estrechas como prohibidas (VRPTW)	Algoritmo de inserción de Solomon en una primera fase, y algoritmo de búsqueda guiada en la segunda, para producir soluciones visualmente atractivas y operacionalmente robustas.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Vidal et al, 2013	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)	Algoritmo genético con control de diversidad adaptativo, con descomposiciones geométricas y estructurales para resolver eficientemente problemas de gran tamaño.
Schneider et al., 2013	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)	Búsqueda Tabú para la evaluación del impacto debido a la incorrecta manipulación de las ventanas de tiempo.
Labadie et al, 2012	Problema de Orientación de equipos con ventanas de tiempo (TOPTW)	NP-hard, Procedimiento de búsqueda de vecindario variable (VNS) basado en exploración granular en vez de vecindario completo para mejorar la eficiencia del algoritmo.
Flota heterogénea		
Cheong et al, 2002	Problema de ruteo de vehículos, mezcla y tamaño de la flota (FSMVRP) para una empresa de bebidas	Solución en dos fases: primero, asignación de vehículos en el largo plazo, y luego ruteo de los vehículos asignados.
Lima et al., 2004	Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea (HVRP)	Algoritmo genético hibridizado con dos métodos heurísticos (Algoritmo memético).
Privé et al, 2006	Distribución de bebidas y recolección de envases (SDP), variante del HFFVRPTW con restricciones de capacidad y volumen.	Tres heurísticas constructivas y un procedimiento de mejora que utiliza movimientos como combinación de 3-opt, de intercambio de dos puntos y unión de rutas.
Choi y Tcha, 2007	Problema de ruteo con flota de vehículos heterogénea (HVRP)	Generación de columnas, a partir de la relajación de un MIP en un LP. Se emula un algoritmo de programación dinámica para una generación de columnas eficiente.
Bräysy et al., 2008	Problema de determinar el tamaño y la composición de una flota heterogénea de vehículos y ruteo con ventanas de tiempo (FSMVRPTW)	Formulación matemática como programa lineal entero mixto; Metaheurística de recocido determinista en tres fases: Fase 1, soluciones iniciales de alta calidad mediante una heurística basada en el ahorro, Fase 2, reducción del número de rutas por búsqueda local, Fase 3, mejora de la solución mediante operadores de búsqueda local embebidos en un marco de recocido determinista que guía el proceso de mejora.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Prins, 2009	Problemas de ruteo de vehículos con flota heterogénea (HFVRP) y problema de mezcla de la flota de vehículos y ruteo (VFMP), variante del HFVRP con cantidad ilimitada de vehículos.	Dos algoritmos meméticos, basados en cromosomas codificados como un único tour y un procedimiento de asignación de vehículos y fraccionamiento en rutas factibles. El segundo algoritmo usa una medida de distancia en el espacio solución para diversificar la búsqueda.
Repoussis y Tarantilis, 2010	Problema de ruteo de vehículos con mezcla y tamaño de la flota con ventanas de tiempo (FSMVRPTW)	Programación con memoria adaptativa (AMP), heurística constructiva semi-paralela. Algoritmo iterativo de búsqueda Tabú modificado.
Brandão, 2011	Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea HFFVRP (nivel operativo)	Asignación de clientes a los vehículos y definición de las rutas por medio de búsqueda Tabú.
Mar-Ortiz, 2011	Optimizar el diseño de la red de logística inversa para la recolección de residuos de equipo eléctrico y electrónico (WEEE)	Enfoque jerárquico de tres fases: la primera es la localización de instalaciones por medio de un modelo de programación lineal entera mixta, la segunda es de programación entera para determinar la flota de vehículos heterogénea y ruteo asociado a la recolección por un algoritmo heurístico basado en los ahorros, la tercera es un estudio de simulación.
Li et al., 2012	Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea y abierta de vehículos (HFFOVRP)	Metaheurística de múltiple inicio y memoria adaptativa, basada en búsqueda Tabú modificada.
Entrega y recogida		
Gribkovskaia et al., 2007	Problema de ruteo de un vehículo con recogidas y entregas (SVRPPD)	Modelo de programación lineal entera mixta. Heurísticas clásicas de construcción y de mejoramiento, además de búsqueda tabú. Las soluciones son de tipo hamiltoniano, doble vía y lazo.
Gribkovskaia et al., 2008	Ruteo de un solo vehículo con entregas y recogidas selectivas (SVRPDSP)	Programa lineal entero mixto, solución por medio de heurísticas constructivas y de mejoramiento clásicas junto con búsqueda Tabú.
Hoff et al., 2009	Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas (VRPPD)	Algoritmo de búsqueda tabú que produce soluciones Lazo (entrega en un recorrido y recolección en sentido inverso).

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Zachariadis et al., 2009	Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD)	Solución híbrida que incorpora la funcionalidad de las metaheurísticas: búsqueda tabú y búsqueda local guiada.
Gutiérrez et al., 2010	Problema de ruteo de vehículos con entregas, recogidas selectivas y ventanas de tiempo (VRPDSPTW)	Algoritmo exacto de ramificación y precio basado en generación de columnas.
Subramanian et al., 2010	Problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega simultáneas (VRPSPD)	Algoritmo paralelo embebido en una heurística multi-inicio que consta de un procedimiento descendente en un vecindario variable con un ordenamiento aleatorio de vecindad, integrado en un marco de búsqueda local iterativa (ILS).
Çatay, Büllent, 2010	Problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega simultáneas (VRPPD).	Algoritmo de colonia de hormigas que incluye una nueva función de visibilidad y actualización de la feromona basada en ahorros.
Zachariadis et al., 2010	Problema de ruteo de vehículos con entregas y recogidas simultáneas (VRPSPD)	Optimización combinatoria, NP-hard y solución mediante metaheurísticas usando memoria adaptativa.
Subramanian et al., 2011	Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD)	Algoritmo de ramificación y acotamiento.
Fan, 2011	Problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega simultánea, basado en la satisfacción del cliente (VRPSPDCS), variante del VRPTWSPD	Método de la inserción más económica y Búsqueda Tabú.
Zachariadis y Kiranoudis, 2011	Problema de ruteo de vehículos con recogidas y entregas simultáneas (VRPSPD)	Algoritmo de búsqueda local que explora una vecindad de soluciones amplia, se evita el ciclaje y se diversifica con base en los criterios de aspiración de búsqueda tabú.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Cruz et al., 2012	Problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega simultáneas (VRPSPD)	Algoritmo heurístico GENVNS-TS-CL-PR, que combina el procedimiento heurístico de inserción más económica, inserción más económica con múltiples rutas, GENVNS, búsqueda de vecindario variable (VNS), búsqueda en vecindario descendente (VND) búsqueda Tabú (TS) y reencadenamiento de trayectorias (PR).
Karaoglan et al., 2012	Problema de localización y ruteo con recogida y entrega simultáneas (LRPSPD)	Modelos de programación lineal entera mixta de tamaño polinomial: basados en nodos y en flujo, respectivamente. Enfoque heurístico de solución de dos fases basado en recocido simulado (SA) y dos heurísticas para generar soluciones iniciales.
Kassem y Chen, 2013	Problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en logística inversa VRPSPD	Modelo de programación entera mixta NP-hard se resuelve con recocido simulado.
Ting y Liao, 2013	Problema de recogidas selectivas y entregas (SPDP)	Algoritmo memético para resolver el problema, empleando una novedosa representación de soluciones candidatas y adaptación de los operadores 2-opt.
Wang y Chen, 2013	Problema flexible de entregas y recogidas con ventanas de tiempo (FDPPTW)	Modelo de programación entera mixta binaria, resuelto mediante un algoritmo coevolutivo, un método de inserción de mínimo coste agiliza el procedimiento de solución.
Pedidos fraccionables (Split)		
Jin et al., 2008	Problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP)	Generación de columnas con información de rutas y cantidad entregada, los subproblemas se resuelven por un algoritmo de búsqueda acotado.
Feillet et al., 2010	Problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP) y Problema de diseño de rutas de tránsito de autobuses rápidos (BRTDP)	Metodología de ramificación corte y precio, los cortes y las columnas son generados de manera simultánea.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Archetti et al., 2011	Problema de ruteo de vehículos (VRP) y problema de ruteo de vehículos con entregas fraccionables (SDVRP) con flotas tanto limitadas como ilimitadas	Análisis de la complejidad en diferentes topologías.
Belfiore y Yoshizaki, 2013	Problema de Mezcla y tamaño de la flota, y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y entregas fraccionables (FSMVRPTWSD)	Búsqueda dispersa (SS)
Camiones y trailers		
Lin et al., 2010	Problema de ruteo de camiones y remolques relajado (RTTRP), relajación de tamaño de la flota del problema de ruteo de remolques y camiones(TTRP)	Heurística de recocido simulado para resolver el RTTRP.
Villegas et al., 2011	Problema de ruteo de camiones y remolques (TTRP) con flota heterogénea de camiones y remolques, con restricciones de accesibilidad a los clientes	Procedimiento de ruteo seguido de un procedimiento de agrupación integrado dentro de una metaheurística híbrida basada en GRASP, búsqueda vecindario variable (VNS) y reencadenamiento de trayectorias.
Derigs et al., 2013	Problema de ruteo de camiones y tractocamiones TTRP	Enfoque simple y flexible basado en búsqueda local y búsqueda local en una vecindad grande, se emplean estrategias de control estándar en metaheurísticas.
Dondo y Cerdá, 2013	Problema de ruteo de vehículos con transbordo <i>cross-docking</i> (VRPCD), vehículos homogéneos, recogida y entrega, programación de vehículos en el cross-dock	Formulación como MILP y solución como un modelo basado en un algoritmo de barrido (<i>sweep</i>).

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
El Hachemi, et al., 2013	Problema de programación y ruteo sincronizados en la industria forestal, incluyendo recogidas y entregas, inventarios, múltiples productos, múltiples fuentes y múltiples destinos (LTSP)	Enfoque de descomposición para resolver el problema semanal en dos fases: en la primera, un modelo táctico determina destinos de los camiones y, en la segunda, métodos de ruteo y programación diaria. Primero un enfoque de búsqueda local restringido, seguido de un enfoque híbrido que implica un modelo de programación restringida y un modelo de búsqueda local restringida.
Múltiples viajes		
Brandão y Mercer, 1997	Problema de programación y ruteo de vehículos con múltiples viajes (MTVRSP) incluye ventanas de tiempo, flota heterogénea y restricciones de accesibilidad	Heurística de búsqueda Tabú
Fagerholt, 1999	Decisión de la flota óptima en un problema de ruteo de vehículos de múltiples viajes (VRPMT)	Solución en tres fases: 1, se generan todas las rutas disponibles para el viaje más largo, 2, las rutas sencillas se combinan en múltiples rutas, en la fase 3 se resuelve un problema de conjuntos de particiones; se emplea generación de columnas.
Sen y Bulbul, 2008	Revisión del problema de ruteo de vehículos, con múltiples viajes por periodo	Estado del arte
Battarra et al., 2009	Problema de ruteo de vehículos de mínimo número de múltiples viajes (MMTVRP)	Enfoque de solución iterativa basada en la descomposición del problema en otros más simples, que son resueltos por heurísticas específicas; un mecanismo de guía adaptativa conduce la heurística a una posible mejor solución.
Periódico o múltiples periodos		
Gulczynski et al., 2011	Problema de ruteo de vehículos periódico (PVRP)	Modelo de programación entera mixta para determinar patrones y un algoritmo de viaje punto a punto basado en la heurística de Clarke y Wright, y heurística de mejoramiento basada en programación entera IPH.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Cacchiani et al. 2012	Problema de ruteo de vehículos periódico (PVRP)	Algoritmo de optimización híbrido de MILP y heurísticas. Relajación a través de generación de columnas heurísticamente mediante un algoritmo iterativo de búsqueda local, con subproblemas elementales de ruta más corta con restricciones de recursos (ESPPRC).
Zhang et al., 2013	Problema de ruteo de vehículos multiperiodo con beneficios (mVRPP)	Algoritmo memético con una representación de gran tour seguido de un procedimiento voraz de partición en rutas individuales.
Integrados		
Lei Lei et al., 2006	Problema integrado de producción, inventario y distribución (PIDRP) que implica transportadores heterogéneos con tiempos de viaje no instantáneos, múltiples clientes con su propia capacidad de inventario.	Enfoque de solución de dos fases: en la primera las rutas se reducen a envíos directos entre plantas y centros de consumo; en la segunda, un problema de consolidación se emplea para manejar la ineficiencia del envío directo. El problema consolidado es resuelto heurísticamente.
Candas y Kutanoglu, 2007	Diseño de la red logística y problema de inventarios integrados	Modelo que considera la interdependencia entre localización, asignación de demandas y gestión de existencias; Mejores soluciones al integrar todo
Bard y Nanukul, 2010	Problema de producción, inventario, distribución y ruteo (PIDRP)	Algoritmo memético con gestión de la población (MAPA) y proceso reactivo de búsqueda voraz adaptativa (GRASP) con reencadenamiento de trayectorias (path-relinking), desarrollan un procedimiento de ramificación y acotamiento basado en el precio como esquema para resolver el PIDRP complementado con metaheurísticas existentes.
Akkerman et al., 2010	Gestión cuantitativa de la gestión de operaciones en la distribución de alimentos	Se analizan modelos de programación matemática, analíticos y de simulación, en los niveles estratégico, táctico y operativo.
Song y Furman, 2013	Problema de ruteo e inventarios (IRP)	Marco de referencia algorítmico simple de un método de optimización basado en heurísticas para el IRP.
Con variables aleatorias		

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Christiansen y Lysgaard, 2007	Problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica y restricciones de capacidad (CVRPSD)	El CVRPSD se formula como un conjunto de particiones del problema y se muestra que el subproblema de generación de columnas asociado puede ser resuelto usando un esquema de programación dinámica, y descomposición de Dantzing-Wolfe.
Haugland et al, 2007	Diseño de distritos para el problema de ruteo de vehículos con demanda estocástica con flota homogénea (SVRP)	Búsqueda Tabú y heurísticas de múltiple inicio, se resuelve en dos etapas: Formación de distritos y ruteo en cada distrito
Tan et al., 2007	Problema de ruteo de vehículos multiobjetivo con demanda estocástica (VRPSD)	Algoritmo evolutivo multiobjetivo que incluye dos heurísticas específicas VRPSD para exploración local y un método de simulación de rutas para evaluar el ajuste de las soluciones.
Chen, et al., 2009	Problema de programación de la producción y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo para productos perecederos PS-VRPTW-P con demanda y utilidad aleatorias	Algoritmo de solución por el método de Nelder-Mead y heurística para VRPTW.
Lei et al., 2011	Problema de ruteo de vehículos con capacidad restringida, demanda estocástica y ventanas de tiempo (CVRPSDTW)	Modelado como un programa estocástico con recursos, y propuesta de una heurística de búsqueda adaptativa en una vecindad grande.
Agra et al., 2013	Problema de ruteo de vehículos robusto con ventanas de tiempo y tiempos de viaje inciertos (T-VRPTW)	Formulación de desigualdades mediante optimización robusta ajustable, con técnicas que reducen el número de puntos extremos, y formulación de desigualdades de rutas en un contexto incierto. Nueva técnica de planos cortantes para problemas de optimización combinatoria robusta con restricciones complicadas, se resuelve por generación de columnas
DSS		
Golden y Wasil, 1987	Software para el ruteo de vehículos	Casos de estudio para diferentes situaciones, se presenta desde un punto de vista descriptivo sin profundizar en aspectos de modelado.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Ruiz et al., 2004	Problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea y sistema de apoyo a las decisiones (DSS)	Enfoque exacto de dos etapas: generación de todas las rutas factibles por un algoritmo de enumeración implícito, seguido de un modelo de programación entera para seleccionar las rutas óptimas.
Kant, et al., 2008	Software para el ruteo de vehículos	Implementación de software para ruteo en una empresa de bebidas.
Mendoza et al., 2009	Problema de ruteo de vehículos restringido en distancia (DVRP), no debe confundirse con VRP dinámico, para ruteo de vehículos de apoyo	Módulo modificado de la heurística de Clarke and Wright y dos algoritmos metaheurísticos; y dos modelos de programación entera para equilibrar la carga de trabajo.
Otros		
Bektas, 2006	Problema de múltiples agentes viajeros (mTSP), que puede extenderse hacia el VRP	Revisión de heurísticas y métodos de solución propuestos.
Houghton, et al. 2008	Implicaciones de la asignación de territorios exclusivos al problema de ruteo	Evaluación cuantitativa del coste que implica la asignación de territorios exclusivos a conductores, en contraste con territorios compartidos por equipos de conductores.
Zhou y Xu, 2009	Modelo para determinar la pertinencia o no de ampliar o ubicar nuevos distribuidores o centros de recolección de envases	Modelo de programación aleatoria difusa multiobjetivo para describir la logística integrada como un ciclo de producción, distribución, consumo, recolección, transporte, reciclaje, disposición, reutilización y redistribución, se soluciona mediante un algoritmo genético basado en simulación aleatoria difusa.
Elaoud et al., 2010	Problema del agente viajero (TSP) multiobjetivo	Múltiples operadores de cruce y mutación con un esquema de selección dinámica dentro de un algoritmo genético multiobjetivo para seleccionar el mejor operador en un momento dado.
Mladenović et al., 2012	Problema de recogida y entrega de un producto por un agente viajero (1-PDTSP)	Búsqueda general de vecindario variable, estructuras k-opt y de doble puente y, operadores de inserción en un árbol de búsqueda binario.

Continúa en la página siguiente...

Autor, año	Tipo de Problema	Métodos Utilizados
Nguyen et al., 2012	Problema de localización y ruteo de dos niveles (LRP-2E), Primer nivel desde un depósito principal a depósitos satélite, a ser localizados, segundo nivel hasta los clientes	Búsqueda local iterativa multi arranque (MS-ILS), tres heurísticas aleatorias voraces son empleadas ciclicamente para obtener soluciones iniciales. Cada ILS corre alternando entre dos espacios de búsqueda: soluciones LRP-2E y recorridos TSP cubriendo el depósito principal y los clientes. MS-ILS puede ser reforzado por un procedimiento de reencadenamiento de trayectorias (PR), empleado internamente para intensificación, como post-optimización o de ambas formas.
Pillac et al., 2013	Problemas de ruteo de vehículos dinámico (DVRP)	Revisión que clasifica los problemas de ruteo desde la perspectiva de calidad de la información y evolución, midiendo el grado de dinamismo.

Fuente: el autor.

Pochet (2006) sugieren que si bien han sido implementados sistemas de planificación de manufactura asistidos por ordenador, algunos de ellos son únicamente transaccionales, como respuesta al incremento en la complejidad de las empresas grandes y medianas. Sin embargo, existe la posibilidad de obtener resultados significativamente mejores convirtiendo esas herramientas en sistemas de planificación para la coordinación y la optimización. Los enfoques de modelización y optimización implican la separación entre construir modelos para la toma de decisiones y resolverlos (Pochet, 2006).

Como antecedente de este tipo de problemas, puede observarse un modelo de red logística integrada que considera producción, distribución, consumo, recolección, transporte, reciclaje, reutilización y redistribución, propuesto por Zhou y Xu (2009), como una estrategia para diseñar una cadena de suministros en red y establecer la localización geográfica de las instalaciones para una empresa productora de cerveza en China (Zhou y Xu, 2009).

Safaei, Moattar Hussein, Z.-Farahani, Jolai, y Ghodsypour (2010) modelaron un sistema de planeación de la producción y la distribución con múltiples plantas en una cadena de suministros. Su modelo tenía en cuenta los flujos de producto hacia adelante y los volúmenes de producción e inventario, en una hibridación que empleaba programación matemática y simulación (Safaei y cols., 2010).

Pueden usarse varias medidas de desempeño para evaluar el sistema logístico de ciclo cerrado, como son: coste total, coste total de transporte, coste total de dis-

tribución, coste total de recolección, coste ambiental total, coste total en la red directa y en la red inversa, coste total de compra, utilidad total obtenida del reciclaje de material (Paksoy, Bektaş, y Özceylan, 2011).

3.4 Conclusiones

La logística de ciertos productos y embalajes que regresan al proceso productivo, es parte de los procesos que deben llevarse a cabo en industrias como la de bebidas que hace uso de envases y embalajes reutilizables, lo cual es comúnmente más económico y amigable con el medio ambiente que el reciclaje. Los sistemas de botellas y cajas retornables permiten que estas sean reincorporadas una y otra vez al ciclo de producción, evitando que se conviertan prematuramente en desechos (Cimino y cols., 2009). Como explican Cimino y cols. (2009), la configuración de cadena de suministros de ciclo cerrado es una estrategia oportuna de logística inversa que debe ser realizada en dependencia de la estructura de niveles de la red y el grado de centralización o descentralización empleado.

Dada la naturaleza de las fuentes de productos es natural que los sistemas de inventarios en logística inversa sean mucho más complejos que los sistemas de inventario tradicionales. La presencia de más fuentes de incertidumbre y de más variables aleatorias: cantidad (magnitud de la demanda y de los retornos) y calidad de los productos devueltos. Estas variables, son especialmente importantes porque son determinantes de la opción de recuperación a utilizar con cada producto y que naturalmente no es necesariamente la misma para dos productos similares, como consecuencia de la calidad, y por ende trae repercusiones en lo que respecta a la gestión y control de existencias. Mientras que en los sistemas tradicionales, la logística de las adquisiciones se permite seleccionar los proveedores y establecer acuerdos respecto de la naturaleza de los productos a adquirir, en los sistemas de logística inversa el aprovisionamiento es supremamente variable, los sistemas de inventario en estos ambientes se caracterizan por la presencia de flujos de ingreso aleatorios, cuya calidad también aleatoria casi siempre debe ser aceptada, y por flujos de producción alternativos como una forma de balancear los volúmenes de demanda y de retornos.

Los primeros modelos, considerados por los investigadores, son de naturaleza determinística. Tales modelos basados en el cálculo multivariable, además de presentar los supuestos propios de un sistema de producción e inventarios de productos, consideran dos categorías de productos diferenciables entre sí (recuperables y servibles) y dos tasas de acumulación tanto de productos recuperables como de productos servibles.

La mayor parte de los modelos propuestos en la literatura relacionada, son de naturaleza estocástica basados en procesos de Poisson, la mayoría construidos a

partir de variaciones a los modelos tradicionales de inventarios con revisión periódica y revisión continua. Sin embargo, también se observan enfoques alternativos como lo es un modelo de optimización robusta, que emerge como una alternativa ante el desconocimiento de la distribución de probabilidad de los retornos.

Para finalizar, se precisa el empleo de modelos de dinámica de sistemas como alternativa para modelizar los flujos de materiales y los flujos económicos en logística inversa. Tales modelos se plantean como una herramienta alternativa para estudiar el comportamiento de los sistemas de logística inversa en el largo plazo, es decir, surgen como una posibilidad de evaluar el sistema desde un punto de vista estratégico.

[

Modelo bietapa para la gestión integrada de la producción y la logística]Modelo
bietapa para la gestión de la producción y la logística en un ambiente multipro-
ducto, multiplanta

En este capítulo se desarrolla un modelo para la integración de la gestión de la producción y la logística directa e inversa, en dos etapas. En la sección 3.5 se presenta el enfoque de modelado; en la sección 3.6 se describe el modelo matemático correspondiente a la primera etapa, con él se desarrolla la integración de la manufactura con el transporte de los productos finales y de retorno en un primer nivel; en la sección 3.7 se presenta un modelo para la gestión de los transportes de productos finales y los de retorno. Los dos modelos de programación lineal entera mixta (MILP) se presentan de manera detallada.

3.5 Descripción general del enfoque de modelado

El problema de gestionar de manera integrada la planeación de la producción y la logística tanto de avance como de retorno se ha dividido, para su solución, en dos etapas:

Modelo de planeación de la producción: tiene por objetivo la determinación de los volúmenes de producción, compra e inventarios en cada uno de los nodos que hacen parte de la cadena de suministros.

Modelo de ruteo de vehículos: su finalidad es determinar la asignación de vehículos junto con las rutas y volúmenes de entrega y recogida, de manera detallada.

La primera etapa consiste en un *modelo de planificación de la producción para un horizonte de planeación de varios periodos, en el cual el tiempo se considera*

discreto, con restricciones de capacidad de producción en las plantas y de almacenamiento en todos los nodos. Algunos de los productos incorporan materiales de retorno.

Como resultado de la aplicación de este modelo se determina para cada periodo lo correspondiente a *volúmenes de producción, inventarios, rotura de inventarios de producto y requerimientos de compra de materiales de retorno, esencialmente*. Asimismo, en esta etapa se hace una estimación de las entregas y recogidas, que se hacen desde y hacia cada uno de los nodos de la red, bajo el supuesto de que los envíos son directos.

La segunda etapa corresponde a un *modelo de ruteo de una flota de vehículos heterogénea en una red que tiene múltiples orígenes (multiplanta) y múltiples destinos (todos los nodos receptores de producto y emisores de materiales de retorno se representan como clientes), con entregas y recogidas simultáneas, posibilidad de fraccionamiento de las entregas, ventanas de tiempo tanto suaves como rígidas y restricciones de accesibilidad a los nodos dependiendo del tipo de vehículo empleado.*

El resultado de esta etapa es la descripción detallada de las rutas, teniendo en cuenta *asignación de vehículos, configuración de la carga, nodos visitados, volúmenes de producto entregados en cada nodo, volúmenes de materiales de retorno recogidos en cada nodo y, horarios de inicio, visita a los nodos y regreso.*

3.5.1 Articulación de las dos etapas

La información de entrada y salida de las dos etapas se presenta a manera de esquema en la figura 3.1. En la figura 3.2 se presenta además la secuencia en la cual deben utilizarse los modelos, que se explica a continuación:

1. Ejecución del modelo correspondiente a la primera etapa,
2. Cálculo de los parámetros de entrada para el conjunto de subproblemas,
3. Determinación de los subproblemas,
4. Cálculo de las rutas para cada uno de los subproblemas y,
5. Cálculo del coste total.

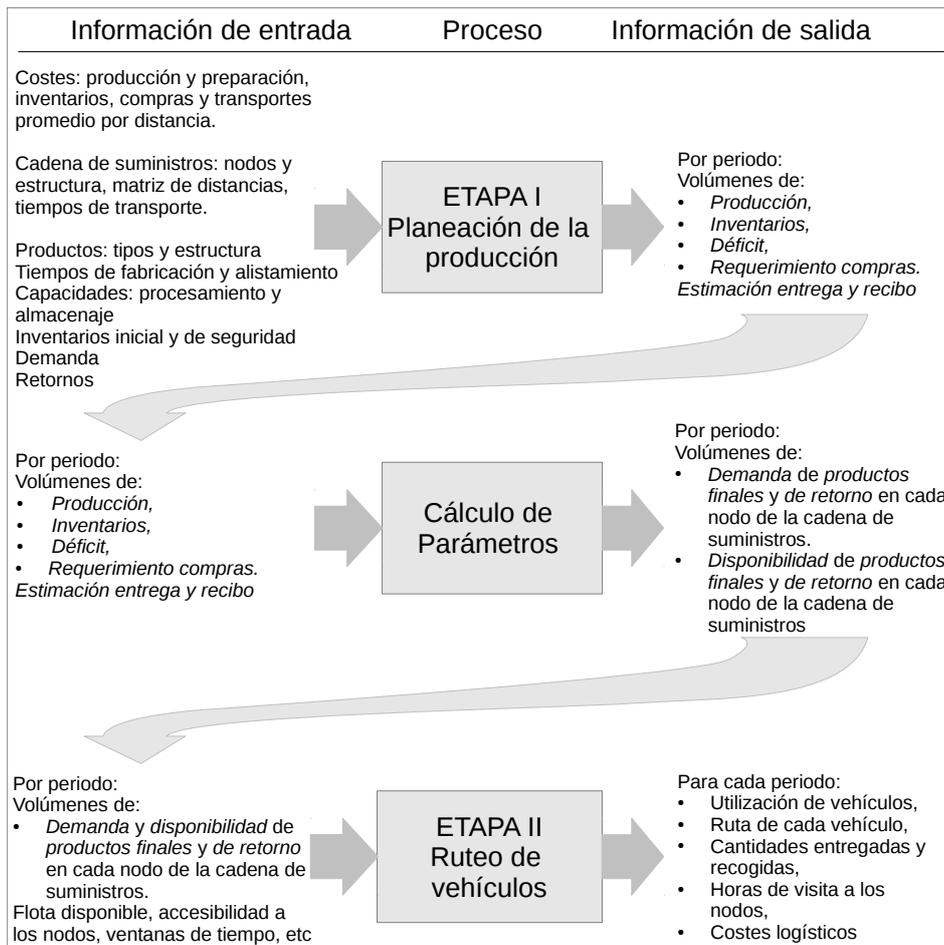


Figura 3.1: Entradas y salidas de información por etapas.

Etapa 1, planeación de la producción

El modelo correspondiente a la planeación de la producción se ejecuta de modo que se obtenga la información correspondiente a los volúmenes de producción e inventarios, y a la identificación de los roles que juega cada uno de los nodos en la cadena de suministros.

Cálculo de parámetros para la etapa dos

El modelo correspondiente a la etapa dos, o de ruteo de vehículos, es un modelo que considera únicamente dos roles de la cadena de suministros: *plantas* y *detallistas*. Los roles se diferencian claramente pues mientras las plantas envían productos finales y reciben productos de retorno, los detallistas reciben los productos finales y devuelven los materiales de retorno hacia las plantas.

Como consecuencia de tales roles, existe disponibilidad de productos finales y demanda de materiales de retorno en el caso de las plantas y disponibilidad de materiales de retorno y demanda de productos finales en el caso de los detallistas. En la figura 3.3 se presentan a manera de esquema los flujos de la información necesarios para poder calcular los parámetros requeridos por la segunda etapa, en cada uno de los subproblemas.

Identificación de los subproblemas

A partir de los resultados de la primera etapa se procede a determinar los subproblemas para cada periodo, así:

Se genera un informe de entregas (de producto final) y recogidas (de materiales de retorno) por periodo, identificando los conjuntos de nodos que actúan como emisores (plantas) y los que actúan como receptores (detallistas). Si se trata de conjuntos disjuntos se procede a calcular los parámetros de entrada requeridos para la segunda etapa y se generan las correspondientes rutas.

De existir nodos que cumplen el doble papel, es decir, que actúan como emisores y como receptores, se dividen en varios subproblemas en los cuales sólo posean uno de los dos roles establecidos para el modelo de ruteo. Para la división en subconjuntos, se constituye un subproblema eliminando los segmentos en los cuales tales nodos actúan como emisores y con ellos se construye un nuevo subproblema hasta que la condición de un único rol se cumpla.

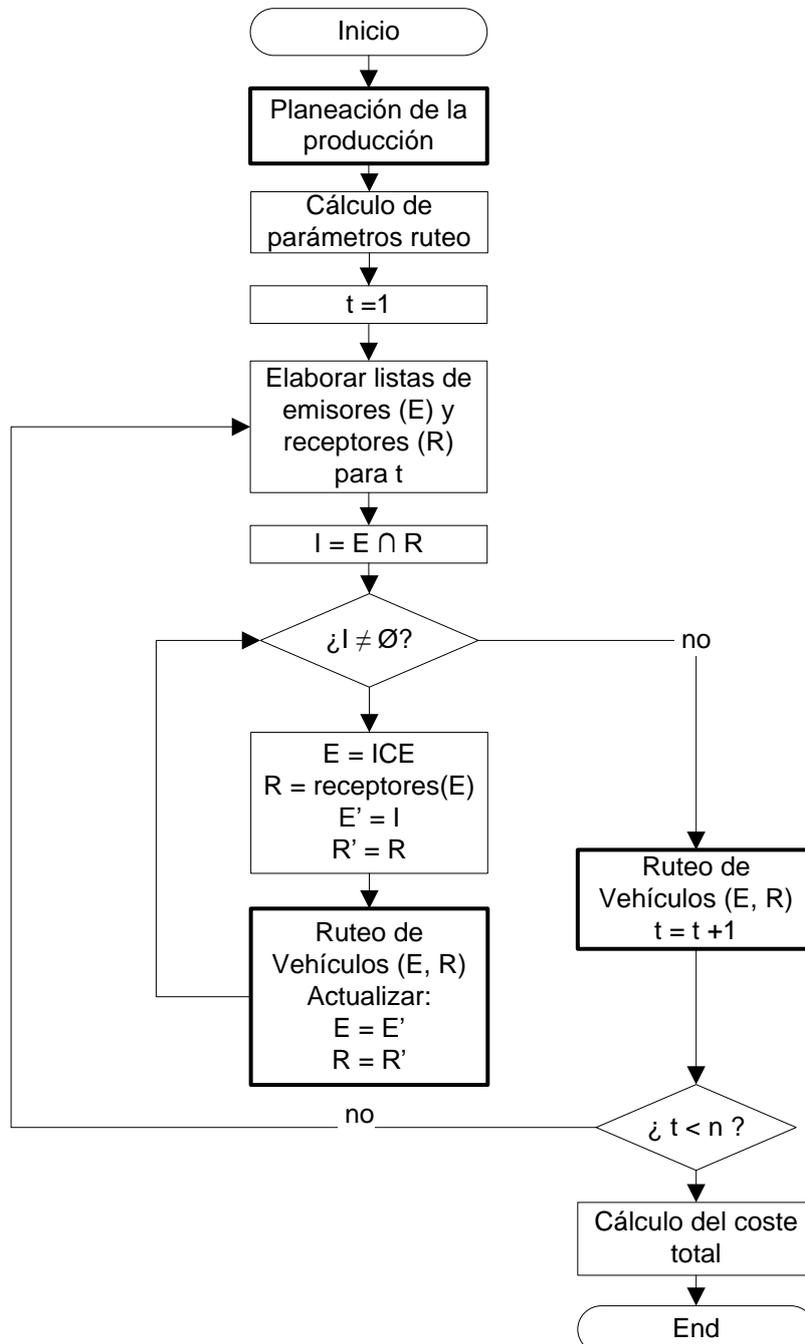


Figura 3.2: Procedimiento de ejecución modelo bietapa.

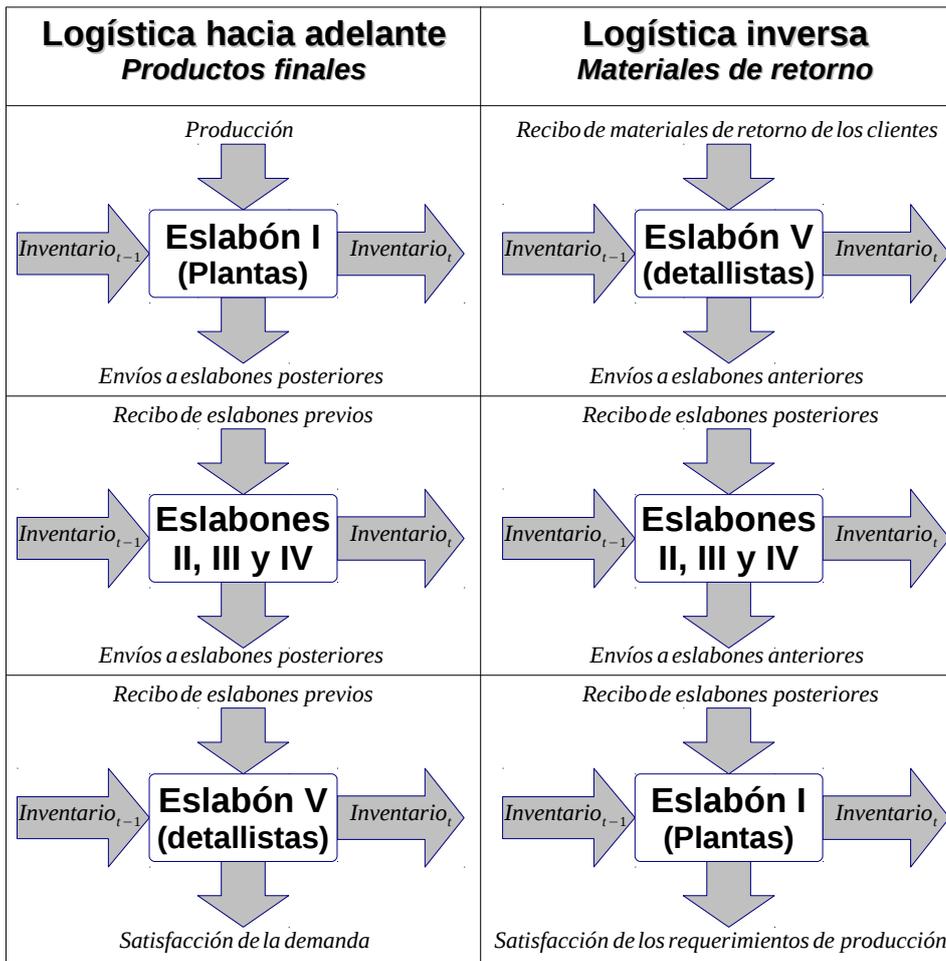


Figura 3.3: Articulación de los modelos correspondientes a las dos etapas

Etapa 2, ruteo de vehículos

El modelo de ruteo de vehículos se calcula para cada uno de los subproblemas generados, obteniéndose la información detallada de cada una de las rutas.

Cálculo del coste total

El coste total a tener en cuenta es el coste de producción e inventarios del modelo de planeación más la suma de los costes obtenidos con los modelos resultantes de ruteo de vehículos, es decir, no se tienen en cuenta los costes de transporte del modelo de planeación. Lo anterior debido a que estos solo tienen la finalidad de localizar la producción en las plantas de una manera económica, pero que por basarse en costes promedio y en recorridos que visitan un solo nodo por viaje, no tienen en cuenta las particularidades del transporte.

En el Capítulo 5 se presenta un ejemplo de la utilización del modelo bietapa.

3.6 Etapa I. Modelo para la coordinación de la planeación de la producción y la logística en un ambiente multiproducto, multiplanta, con materiales de retorno

El objetivo de esta sección es la construcción de un modelo de programación matemática, que sirva de base para la toma de decisiones en la planeación de la producción y la gestión de la logística hacia adelante e inversa, para minimizar los costes de operación de la empresa.

El modelo para el sistema descrito en el Capítulo 2, asiste la toma de decisiones asociadas a la fabricación, la gestión de los inventarios y los transportes en ambos sentidos de la cadena de suministros, con el objetivo es minimizar el coste total.

3.6.1 Supuestos

Para la construcción de este primer modelo se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- Los costes unitarios de transporte sólo dependen de la distancia entre orígenes y destinos, y la clase de producto a ser transportado.
- Sólo se consideran rutas directas entre instalaciones emisora y receptora, en la segunda etapa se analizará el problema de ruteo de vehículos que tiene lugar cuando un vehículo puede visitar más de un destino.

- No existe una asignación directa entre miembros de la cadena de suministros, así las decisiones de llevar productos entre dos nodos determinados obedecen únicamente al mínimo coste total y a la posibilidad física de hacerlo.
- No hay consideraciones asociadas a la naturaleza de los vehículos en los cuales se realiza el transporte.
- La demanda de productos y el retorno de los materiales de reutilización se consideran independientes, aunque es posible establecer algún tipo de relación entre ellos en futuros trabajos.
- La demanda de productos y el retorno de los materiales se consideran conocidos (determinísticos).
- El aprovisionamiento de los materiales, cuando los que retornan son insuficientes, se considera instántaneo.
- El aprovisionamiento de los productos de retorno y la entrega de productos finales tiene en cuenta un tiempo de retardo (*Transport lead time*), que se considera necesario para que el producto esté disponible en la instalación que lo recibe.

3.6.2 Conjuntos

Con el fin de facilitar la escritura del modelo, se han definido los siguientes conjuntos asociados a los productos, a las instalaciones de los diferentes integrantes de la cadena de suministros y a los periodos de planeación, entre otros elementos característicos del sistema:

Pd: Conjunto de tipos de productos (o materiales de retorno) que son transportados en los diferentes niveles de la cadena de suministros.

Pr: Conjunto de bienes finales que viajan hacia adelante, desde el productor hacia el detallista, a lo largo de la cadena de suministros $Pr \subset Pd$.

GL: Conjunto de materiales de retorno, que viajan en sentido inverso a la cadena de suministros, para ser aprovechados en nuevos productos $GL \subset Pd$.

Fc: Conjunto de Instalaciones que constituyen los diferentes eslabones de la cadena de suministros.

Pl: Conjunto de plantas de producción en las cuales se elabora el producto y se recupera el material de retorno $Pl \subset Fc$.

LC: Conjunto de centros logísticos $LC \subset Fc$.

Tabla 3.7: Nodos de la cadena de suministros aguas arriba y aguas abajo

Orígenes Logística Directa Destinos Logística Inversa Niveles anteriores	Tipo de nodo	Destinos Logística Directa Orígenes Logística Inversa Niveles posteriores
{ }	Planta (Pl)	{LC, SC, Db, Rt}
{Pl}	Centro Logístico (LC)	{SC, Db, Rt}
{Pl, LC}	Almacén Reg. (SC)	{Db, Rt}
{Pl, LC, SC}	Distribuidor (Db)	{Rt}
{Pl, LC, SC, Db }	Detallista (Rt)	{ }

Fuente: El autor

SC: Conjunto de almacenes reguladores $SC \subset Fc$.

Db: Conjunto de distribuidores $Db \subset Fc$.

Rt: Conjunto de detallistas que se encargan de recibir el material reutilizable de los consumidores y de colocar el producto $Rt \subset Fc$.

HL_f: Conjunto de nodos o instalaciones a las cuales se puede acceder desde la instalación *f* en el flujo hacia adelante, o desde las cuales se puede llegar a *f* en el sentido inverso, son los nodos en los eslabones “aguas abajo” en la cadena de suministros.

LL_j: Conjunto de nodos o instalaciones desde las cuales se puede acceder a la instalación *j* en el flujo hacia adelante, o a las cuales se puede llegar desde *j* en el sentido inverso, son los nodos en los eslabones “aguas arriba” en la cadena de suministros.

A: Conjunto de arcos que unen directamente dos nodos *i* y *j*, correspondientes a dos instalaciones, entre las cuales viajan los productos.

T: Periodos para los cuales se realiza la planeación.

Los conjuntos *HL_i* y *LL_i* para cada uno de los nodos *i* en los diferentes eslabones de la cadena de suministros son importantes porque a través de ellos se describe la estructura de la cadena de suministros en forma precisa, como se observa en la tabla 3.7.

3.6.3 Parámetros

Los parámetros considerados para la construcción del modelo se enumeran en este apartado.

$PrdCs_{p,i}$: Coste unitario de manufactura de producto p en una planta determinada i , si $p \in Pr$ o coste unitario del proceso de recuperación de materiales de retorno, si $p \in GL$.

$StCs_{p,i}$: Coste de preparación para la producción de un lote de producto p determinado, en una planta específica i .

$InCs_{p,f}$: Coste de gestión y mantenimiento de inventario de una unidad de producto p en una instalación f durante un periodo.

$DfCs_{p,k}$: Coste de rotura de inventario por unidad faltante de producto p para satisfacer la demanda de un detallista k .

$GlCs_{p,i}$: Coste de una unidad de material de retorno p nueva requerida para la producción de una unidad de producto determinado q en la planta i , tiene lugar cuando la suma de los materiales de retorno que llegan a la planta y el inventario inicial de los mismos resulta insuficiente para satisfacer las necesidades de producción.

$TrCs_p$: Coste unitario de transporte de producto p , por unidad de distancia.

$Dst_{i,j}$: Distancia entre las instalaciones i y j de la cadena de suministros, es la longitud del arco $(i, j) \in A$.

$U_{p,i}$: Es un parámetro binario que representa la posibilidad que tiene un producto p de ser elaborado, permanecer, ingresar o salir de la instalación i , en un momento dado. Este parámetro obedece tanto a la tecnología existente en la instalación correspondiente como a las políticas desarrolladas al respecto.

$PrTm_{p,i}$: Tiempo unitario de elaboración del producto p en la planta i .

$StTm_{p,i}$: Tiempo de preparación de una corrida de producción de producto p en la planta i .

$PrCp_i$: Capacidad disponible de la planta de producción i , en unidades de tiempo.

$MsCp_i$: Capacidad de almacenamiento en unidades de masa en la instalación i .

$VlCp_i$: Capacidad de almacenamiento en unidades de volumen en la instalación i .

Ms_p : Masa de una unidad de producto p .

- Vl_p : Volumen de una unidad de producto p .
- $Sl_{p,i}$: Volumen promedio de ventas de producto p , por unidad de tiempo en la instalación i .
- Cb_i : Unidades de tiempo que se tienen como referencia para determinar las existencias a mantener en una instalación i .
- $ScArr_{p,j,t}$: Llegadas de producto p a la instalación j en el periodo t , resultantes de un proceso de planeación o de compras que se realizaron en un periodo anterior.
- $Lt_{f,j}$: Tiempo de transporte desde el nodo f al nodo j en unidades discretas de tiempo, correspondientes a los periodos de planeación, para determinar las fechas de envío.
- $PrDm_{p,j,t}$: Demanda de producto p en el detallista j prevista para el periodo t .
- $Inv_{p,f,0}$: Inventario inicial (periodo cero) de producto p en la instalación f .
- $RqGl_{p,q}$: Cantidad de productos retornables p requerido para una unidad de producto q .
- $RtGlC_{p,j,t}$: Cantidad de productos retornables de tipo p , devueltos al detallista j prevista para el periodo t .
- $MD_{f,i}$: Mínimo número de unidades de un producto que se envían directamente desde el nodo f hasta el nodo i .
- M : Número muy grande utilizado para expresar restricciones disyuntivas.

3.6.4 Variables

En este apartado se presentan las variables de decisión asociadas al modelo y las variables auxiliares que se emplean para la modelización de algunas de las características del sistema.

- $Prdc_{p,i,t}$ Cantidad de producto tipo p que debe ser producido en la fábrica i en el periodo de planeación t .
- $StU_{p,i,t}$ Variable binaria que indica la elaboración (preparación) de un lote de producto tipo p en la fábrica i en el periodo de planeación t .
- $Inv_{p,i,t}$ Cantidad de producto tipo p almacenado en la instalación i al finalizar el periodo de planeación t .

$Df_{p,k,t}$ Cantidad de rotura de inventario de producto tipo p en la instalación del detallista k al finalizar el periodo de planeación t .

$BGl_{p,f,t}$ Cantidad de material “de retorno” tipo p comprados para ser usados en la fábrica f en la producción en el periodo de planeación t .

$Dl_{p,i,j,t}$ Cantidad de productos tipo p enviados desde la instalación i a la instalación j en el periodo de planeación t .

$Pk_{p,i,j,t}$ Cantidad de productos de retorno tipo p enviados desde la instalación i a la instalación j en el periodo de planeación t .

$\alpha 1_{i,j,t}$ y $\alpha 2_{i,j,t}$ Variables continuas para representar las restricciones de discontinuidad que tienen ocasión por las políticas de volumen de los envíos directos entre el fabricante i y el detallista j en el periodo t .

$\alpha 3_{i,j,t}$ Variables binaria para representar las restricciones de discontinuidad, que tienen ocasión por las políticas de volumen de los envíos directos entre el fabricante i y el detallista j en el periodo t .

3.6.5 Función objetivo

Este primer modelo tiene por objetivo la minimización de los costes totales asociados a la producción, a los inventarios y a la logística que implica el colocar los productos al alcance del consumidor final, y a la logística de retorno de los materiales de recuperados o de embalaje desde los detallistas a las plantas.

En otras palabras se trata de obtener el mínimo coste total resultante de la producción (costes fijos por lote y variables por unidad producida), más el coste total de gestión y mantenimiento de inventarios, más el coste de déficit por rotura de inventarios, más el coste de los nuevos “materiales de retorno” requeridos para la fabricación, y los costes de transporte en ambos sentidos de la cadena de suministros (distribución de productos y recolección de materiales retornables) como se observa en la ecuación 3.1, en el mismo orden que se mencionan.

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{p \in Pd} \sum_{i \in Pl} \sum_{t \in T} U_{p,i} StCs_{p,i} StU_{p,i,t} + \sum_{p \in Pd} \sum_{i \in Pl} \sum_{t \in T} U_{p,i} PrdCs_{p,i} Prdc_{p,i,t} \\
 & + \sum_{p \in Pd} \sum_{f \in Fc} \sum_{t \in T} U_{p,f} InCs_{p,f} Inv_{p,f,t} + \sum_{p \in GL} \sum_{i \in Pl} \sum_{t \in T} U_{p,i} GlCs_{p,i} BGl_{p,f,t} \\
 & + \sum_{p \in Pr} \sum_{k \in Rt} \sum_{t \in T} U_{p,k} DfCs_{p,k} Df_{p,k,t} + \sum_{p \in Pr} \sum_{i,j \in A} \sum_{t \in T} U_{p,i} Dst_{i,j} TrCs_p Dl_{p,i,j,t} \\
 & + \sum_{p \in GL} \sum_{i,j \in A} \sum_{t \in T} U_{p,i} Dst_{i,j} TrCs_p Pk_{p,i,j,t}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.6.6 Restricciones

El modelo propuesto contiene restricciones asociadas a la producción, a la gestión de los inventarios y de los faltantes, a la gestión de requerimiento de materiales de retorno, a los flujos de producto hacia adelante, a los flujos de material en sentido inverso, y a las restricciones de flujo directo entre las plantas y el eslabón final (u otros que se determinen) de la cadena de suministros.

Restricciones de producción

En la ecuación 3.2 se garantiza que la suma del tiempo consumido en la preparación de la producción y en la ejecución en si misma, para los diferentes productos, no excede la capacidad disponible (en unidades de tiempo) en cada planta de producción y en cada uno de los periodos en el horizonte de planeación.

La ecuación 3.3 establece la existencia de un lote de fabricación (con su respectiva preparación) de un determinado tipo de producto en una planta en el correspondiente periodo. Por su parte la ecuación 3.4 establece los requerimientos de procesamiento de material de retorno para la producción de un bien final determinado, dicho de otro modo es el cálculo de la demanda de material retornable dependiente del volumen de producción.

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} StTm_{p,i} StU_{p,i,t} + \sum_{p \in Pd} U_{p,i} PrTm_{p,i} Prdc_{p,i,t} \leq PrCp_i \quad \forall i \in Pl, t \in T \quad (3.2)$$

$$Prdc_{p,i,t} \leq (M)U_{p,i} StU_{p,i,t} \quad \forall p \in Pd, i \in Pl, t \in T \quad (3.3)$$

$$Prdc_{p,i,t} = \sum_{q \in PR} U_{q,i} RqGl_{p,q} Prdc_{q,i,t} \quad \forall p \in GL, i \in Pl, t \in T \quad (3.4)$$

Restricciones de inventario

Como restricciones de inventario se observan dos tipos de restricciones: la capacidad en unidades de masa en la ecuación 3.5 y en unidades de volumen en la ecuación 3.6, que acotan los valores máximos a almacenar; y el inventario de seguridad en la ecuación 3.7, como valor mínimo.

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} Ms_p Inv_{p,i,t} \leq MsCp_i \quad \forall i \in Fc, t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} V_l_p Inv_{p,i,t} \leq V_l C p_i \quad \forall i \in Fc, t \in T \quad (3.6)$$

$$Inv_{p,i,t} \geq S l_{p,i} C b_i \quad \forall p \in Pr, i \in Fc, t \in T \quad (3.7)$$

Logística directa

El comportamiento de los flujos de producto hacia adelante, a lo largo de la cadena de suministros se ilustra mediante tres ecuaciones: desde las plantas ecuación 3.8, a través de los nodos intermedios ecuación 3.9 y hacia el detallista ecuación 3.10, respectivamente. Tales ecuaciones corresponden a lo que se detalla en la figura 2.3, respecto de los orígenes y destinos en los diferentes periodos de tiempo.

Tales ecuaciones muestran el equilibrio en los nodos, esto es la cantidad inicial en inventario más la producción (si aplica) menos los despachos a otros nodos de la cadena de suministros son iguales al inventario neto al final del respectivo periodo, para cada producto y planta (u otro nodo emisor).

$$Inv_{p,f,t-1} + Prdc_{p,f,t} - \sum_{j \in HL_f} U_{p,f} U_{p,j} D l_{p,f,j,t} = Inv_{p,f,t} - D f_{p,f,t} \quad (3.8)$$

$$\forall p \in Pr, f \in Pl, t \in T$$

$$Inv_{p,f,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{f \in LL_j} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} D l_{p,f,j,t-Lt_{f,j}} - \sum_{g \in HL_j} U_{p,j} U_{p,g} D l_{p,j,g,t} = Inv_{p,f,t} - D f_{p,f,t} \quad (3.9)$$

$$\forall p \in Pr, j \in Fc \setminus (Pl \cup Rt), t \in T$$

$$Inv_{p,f,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{f \in LL_j} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} D l_{p,f,j,t-Lt_{f,j}} - PrDm_{p,j,t} = Inv_{p,f,t} - D f_{p,f,t} \quad (3.10)$$

$$\forall p \in Pr, f \in Fc \setminus Pl, t \in T$$

Logística inversa

Las ecuaciones siguientes ilustran el comportamiento de los flujos de material retornable, desde los detallistas hacia las plantas, en tres etapas: hacia las plantas ecuación 3.11, a través de los eslabones intermedios de la cadena de suministros ecuación 3.12, y desde los detallistas del producto ecuación 3.13. Ver detalle en la figura 2.3.

Al igual que en la ecuaciones correspondientes a la logística directa, estas ecuaciones representan el equilibrio entre los bienes entrantes y salientes en cada periodo.

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,f,t-1} + ScArr_{p,f,t} + \sum_{i \in HL_f} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,i,t-Lt_{f,j}} \\
 & - \sum_{g \in LL_j} U_{p,f} U_{q,f} RqGl_{p,q} Prdc_{q,f,t} = Inv_{p,f,t} - BGIC_{p,f,t} \quad (3.11) \\
 & \forall p \in GL, f \in Pl, t \in T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{g \in HL_j} \sum_{t-Lt_{j,g} \geq 1} U_{p,j} U_{p,g} Pk_{p,j,g,t-Lt_{j,g}} \\
 & - \sum_{g \in LL_j} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,j,t} = Inv_{p,f,t} \quad (3.12) \\
 & \forall p \in GL, j \in Fc \setminus (Pl \cup Rt), t \in T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + RtGIC_{p,j,t} - \sum_{f \in LL_j} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,j,t} = Inv_{p,f,t} \quad (3.13) \\
 & \forall p \in GL, j \in Rt, t \in T
 \end{aligned}$$

Transportes directos entre plantas y detallistas

La ecuación 3.14 y la ecuación 3.15 representan un espacio de discontinuidad asociado a los envíos desde las plantas hacia los detallistas, también puede extenderse a otro par de niveles de la cadena de suministros según sea requerido, con el fin de que estos se hagan sólo en el caso de que superen un valor previamente determinado. La ecuación 3.14 asigna el valor de cero a los flujos prohibidos por esta política.

En estas ecuaciones los despachos entre los nodos f e i toman un valor que es una combinación lineal de los valores mínimo (para envío directo) y un valor muy alto

establecido como cota máxima, si los valores de $\alpha 1_{f,i,t}$ y $\alpha 2_{f,i,t}$ son diferentes de cero y cero de lo contrario.

$$\sum_{p \in Pr} U_{p,f} U_{p,j} D_{p,f,i,t} = M D_{f,i} \alpha 1_{f,i,t} + (M) \alpha 2_{f,i,t} \quad (3.14)$$

$$\forall f \in Pl, i \in Rt, t \in T \& U_{p,f} U_{p,j} = 1$$

$$\alpha 1_{f,i,t} + \alpha 2_{f,i,t} + \alpha 3_{f,i,t} = 1 \quad \forall f \in Pl, i \in Rt, t \in T \wedge U_{p,f} U_{p,j} = 1 \quad (3.15)$$

Tipos de variables

Los tipos de variables se garantizan mediante las ecuaciones: 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19.

$$Prdc_{p,f,t}, Inv_{p,f,t}, Df_{p,f,t}, BGl_{p,f,t}, Dl_{p,f,j,t}, Pk_{p,f,j,t} \geq 0, \quad (3.16)$$

$$\forall p, f, j, t$$

$$\alpha 1_{f,j,t}, \alpha 2_{f,j,t} \geq 0, \quad \forall f \in Pl, j \in Rt, t \in T \quad (3.17)$$

$$StU_{p,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si se produce un lote de producto } p \text{ en la planta } i \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\alpha 3_{f,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{si no hay transporte directo entre } f \text{ y } j \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.19)$$

3.7 Etapa II. Modelo para el ruteo de vehículos que incluye entrega y recolección en un ambiente multiproducto, multiplanta con ventanas de tiempo

Debido a la complejidad de esta clase de sistema logístico y de fabricación, y la naturaleza de las decisiones requeridas: asignación de vehículos, programación de transportes, optimización de rutas, cargas, gestión de almacenes, etc., se propone un modelo matemático como soporte para la toma de decisiones.

Se propone la construcción de un modelo de ruteo de vehículos adaptado a los requerimientos de un subsector específico de la fabricación, que consiste en una

variación del problema de ruteo de vehículos (VRP) que incluye entrega y recogida de productos, asignación de una flota de vehículos heterogénea, entregas fraccionadas, múltiples plantas y productos, y ventanas de tiempo rígidas y flexibles (suaves), que se explica más adelante.

Es importante tener en cuenta las características físicas de los vehículos, la posibilidad de acceso lateral o posterior a los vehículos, la forma en la cual los productos deben ser ordenados en cada tipo de vehículo, la forma en que se realizan el cargue y el descargue, que dependen de las unidades de empaque y embalaje, tales como cajas, contenedores, palés, etc., los muelles de carga y otros lugares en los cuales se desarrollan tales actividades, la posibilidad de mezclar los diferentes tipos de productos (recogidos y entregados), la posibilidad de remonte de las cargas. Además de las características físicas de un vehículo, los costes fijos y variables por su uso pueden depender de quien posee la propiedad de los mismos.

Con el propósito de minimizar los costes de operación del sistema logístico de una industria productiva que utiliza materiales de retorno, se presenta un modelo de programación matemática, que se deberá utilizar para cada uno de los subsistemas de dos niveles resultantes de aplicar el modelo correspondiente a la primera etapa presentado en la sección 3.6 y el procedimiento presentado en la subsección 3.5.1.

3.7.1 Supuestos

El objetivo del modelo propuesto es la asignación de vehículos, la determinación de las rutas y programación que conduzca al mínimo coste, en una industria que emplea materiales de retorno y que responde a las siguientes condiciones y supuestos:

- Existe una amplia gama de productos de diferentes tipos, algunos de ellos utilizan en su estructura materiales de retorno.
- La producción de bienes finales y la recuperación de materiales de retorno, que se incorporan en productos nuevos, se lleva a cabo en varias plantas de manufactura. Las plantas deben satisfacer la demanda de muchos clientes (detallistas) geográficamente dispersos.
- Todos los productos deben ser llevados desde las plantas hasta los detallistas (*logística directa*), mientras que los materiales de retorno deben ser transportados desde los detallistas a las plantas (*logística inversa*).
- La flota de vehículos empleada para la distribución y recogida es heterogénea. En ella hay vehículos de varios tipos, diferenciables bien por sus características físicas como velocidad de operación, tamaño (tráiler, camión, van, etc.) con su capacidad asociada en masa y volumen máximos de mercancía a transportar, especificaciones de diseño tales como puertas de apertura lateral o

posterior, etc., o bien por su tenencia o propiedad y su impacto en el coste de operación.

- Hay restricciones de accesibilidad de los diferentes vehículos a los diferentes nodos. Un vehículo no necesariamente está en capacidad de visitar todos los centros de consumo debido a las características de las vías o a las restricciones de tráfico asociadas a ellas, la disponibilidad de carga o requerimiento de la misma, a las instalaciones disponibles para carga y descarga (muelles) y los equipos disponibles para ello y a las políticas que a este respecto se hayan establecido.
- Como un supuesto adicional se considera que no existen incompatibilidades de los vehículos desde el punto de vista de acceso posterior o lateral, o de existir esta se asume en la definición de la accesibilidad de un vehículo a un determinado centro.
- Los vehículos al ser restringidos en capacidad, nunca a lo largo de un recorrido pueden llevar una carga que la exceda (ni en masa ni en volumen).
- Como se pretende minimizar el coste, es deseable usar menos vehículos que los disponibles, cada vehículo usado debe ser asignado a una planta en la cual inicia y termina su recorrido (esto es en el nodo ficticio asociado a ella) sin visitar ninguna otra en la ruta.
- La demanda de productos se causa en los diferentes detallistas y la de materiales de retorno en las plantas de producción.
- Hay inventario de productos y de material de retorno en los nodos de la red, su disponibilidad condiciona las rutas. La disponibilidad de materiales de retorno se presenta en los detallistas (quienes reciben estos directamente del consumidor final) y la de productos en las plantas de fabricación.
- Existe disponibilidad de productos y material de retorno suficiente para satisfacer toda la demanda.
- La entrega de productos y la recogida de materiales de retorno son realizadas por los vehículos en todos los detallistas con el fin de satisfacer su demanda de productos y la demanda de materiales de retorno en las plantas de producción.
- Los vehículos trabajan llevando productos desde las plantas hacia los detallistas y llevando materiales de retorno desde los detallistas a las plantas.
- Un centro de demanda puede ser visitado por uno o más vehículos para satisfacer la demanda, así, el fraccionamiento de los pedidos es permitido.

- Existen ventanas de tiempo rígidas y suaves en los nodos correspondientes a los detallistas y a las plantas, estas ventanas permiten ajustar la programación de la entrega y recogida a los horarios de los centros de producción y consumo, las regulaciones locales, horas de tráfico, etc.
- Las ventanas de tiempo suaves implican los horarios de entrega preferidos, mientras que las ventanas de tiempo rígidas implican los horarios de cumplimiento estricto.
- Existen ventanas de tiempo rígidas en los vehículos, que permiten condicionar el inicio y el fin de la jornada de trabajo de acuerdo con planes de mantenimiento rutinario, etc.

3.7.2 Conjuntos

A continuación se describen los conjuntos considerados para la clasificación de la información asociada con el modelo.

A: Conjunto de arcos que unen directamente dos nodos *i* y *j* a lo largo de los cuales viajan los productos.

Fc: Conjunto de Instalaciones que constituyen los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

Pl: Conjunto de plantas de producción en las cuales se elabora el producto y se recupera el material devuelto $Pl \subset Fc$.

Rt: Conjunto de detallistas quienes se encargan de recibir el material reutilizable de los consumidores y de colocar el producto $Rt \subset Fc$.

VhA: Conjunto de vehículos disponibles para ser utilizados.

Pd: Conjunto de tipos de productos (o materiales de retorno) que son transportados en los diferentes niveles de la cadena de suministros.

Pr: Conjunto de bienes finales que viajan hacia adelante, desde el productor hacia el detallista, a lo largo de la cadena de suministros $Pr \subset Pd$.

GL: Conjunto de materiales de retorno que viajan en sentido inverso a la cadena de suministros, para ser aprovechados en nuevos productos $GL \subset Pd$.

Dest_f: Conjunto de nodos o instalaciones a las cuales se puede acceder desde la instalación *f* en el flujo hacia adelante, o desde las cuales se puede llegar a *f* en el sentido inverso.

Orig_j: Conjunto de nodos o instalaciones desde las cuales se puede acceder desde la instalación j en el flujo hacia adelante, o a las cuales se puede llegar a j en el sentido inverso.

DN: Conjunto de nodos ficticios para representar el arribo a las plantas (*dummy nodes*).

3.7.3 Parámetros

Los parámetros del modelo se enuncian a continuación.

VTC_k: Coste variable de transporte por unidad de distancia para un vehículo k .

FTC_k: Coste fijo por disponer de un vehículo k en la distribución.

DlC: Coste de entregar una unidad de producto, aunque podría variar dependiendo del producto o el nodo destino en este caso se asume constante.

PkC: Coste de recoger una unidad de retorno, podría depender del material en si mismo o el nodo como en el caso anterior.

EaC: Coste por unidad de tiempo de anticipación a una ventana de tiempo suave.

LdC: Coste por unidad de tiempo de tardanza a una ventana de tiempo suave.

WtC: Coste de espera por ser atendido ante la llegada anticipada a un nodo.

VA_{j,k}: Parámetro binario de valor uno si un vehículo k puede acceder al nodo j .

Dst_{i,j}: Distancia entre las instalaciones i y j de la cadena de suministros, es la longitud del arco $(i, j) \in A$.

TrT_{i,j,k}: Tiempo de desplazamiento del vehículo k entre las instalaciones i y j de la cadena de suministros.

MvCp_k: Capacidad del vehículo k en unidades de masa.

VvCp_k: Capacidad del vehículo k en unidades de volumen.

Ms_p: Masa de una unidad de producto p .

Vl_p: Volumen de una unidad de producto p .

PrDm_{p,j}: Demanda de producto p en el detallista j .

GLDm_{p,i}: Demanda de materiales retornables p en la planta i .

PrAv_{p,f}: Cantidad de producto p disponible en la planta f .

- $GLAv_{p,j}$: Cantidad de materiales de retorno tipo p disponibles en el detallista j .
- $TwSr_i$: Tiempo de descarga de productos y carga de materiales de retorno en el nodo i .
- $TwLB_i$: Límite inferior de la ventana de tiempo rígida para el nodo i .
- $TwUB_i$: Límite superior de la ventana de tiempo rígida para el nodo i .
- $TwSLB_i$: Límite inferior de la ventana de tiempo suave para el nodo i .
- $TwSUB_i$: Límite superior de la ventana de tiempo suave para el nodo i .
- Eh_k : Límite inferior de la ventana de tiempo de disponibilidad del vehículo k .
- Lh_k : Límite superior de la ventana de tiempo de disponibilidad del vehículo k .
- ax : Constante auxiliar usada para determinar los nodos ficticios.

3.7.4 Variables

Las variables de decisión son las siguientes:

- $Ar_{i,j,k}$: Variable binaria cuyo valor es uno si el vehículo k viaja directamente entre i y j , esto es usando el arco $A_{i,j}$, y cero de lo contrario.
- $VU_{i,k}$: Variable binaria que representa el uso del vehículo disponible k y su asignación al nodo (en este caso a la planta) i cuando su valor es uno.
- $Dl_{p,f,i,k}$: Cantidad de producto p elaborada en la planta f que es entregada en el nodo i por el vehículo k .
- $Pk_{p,f,i,k}$: Cantidad de material de retorno de tipo p que es enviada a la planta f desde el nodo i haciendo uso del vehículo k .
- $MiV_{i,k}$: Masa de los productos cargados en el vehículo k en el momento de abandonar el nodo i .
- $ViV_{i,k}$: Volumen de los productos cargados en el vehículo k en el momento de abandonar el nodo i .
- $Hr_{i,k}$: Hora de llegada o salida del vehículo k , del nodo i .
- $WT_{i,k}$: Tiempo de antelación en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo rígida del nodo i .
- $EA_{i,k}$: Tiempo de antelación en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i .

$ED_{i,k}$: Tiempo de demora en la salida del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i .

$LA_{i,k}$: Tiempo de retardo en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i .

$LD_{i,k}$: Tiempo de retardo en la llegada del vehículo k , con respecto al límite superior de la ventana de tiempo suave del nodo i .

3.7.5 Función objetivo

La función objetivo del modelo propuesto es la minimización del coste total. Se persigue la operación del sistema logístico al menor coste posible, como se observa en la ecuación 3.20.

El coste total se calcula mediante la suma de los siguientes costes: coste fijo de transporte asociado al uso de los vehículos, coste variable de transporte asociado a la operación de los vehículos en las rutas específicas, costes de carga y descarga de las mercancías en los vehículos, y los costes de penalización por violación de las ventanas de tiempo.

En el modelo propuesto, los costes de cargue y descargue se asumen como constantes e independientes, pero son fácilmente modelables como parámetros dependientes de la función, lugar o tipo de vehículo, etc. En la ecuación 3.20 las dos primeras sumatorias obedecen a los costes de transporte, las dos siguientes a los costes por entrega de productos y recogida de materiales, y las tres últimas sumatorias obedecen a los costes que se derivan de las ventanas de tiempo. Los costes asociados a las ventanas de tiempo tienen que ver con la espera, cuando se tiene como referencia la ventana de tiempo rígida y, la llegada temprana y la salida tardía, cuando se trata de una ventana de tiempo flexible.

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{i \in Pl} \sum_{k \in VhA} FTC_k VU_{i,k} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in VhA} VTC_k TrT_{i,j,k} Ar_{i,j,k} \\
 & + \sum_{p \in Pr} \sum_{f \in Pl} \sum_{i \in Rt} \sum_{k \in VhA} (Dic) Dl_{p,f,i,k} + \sum_{p \in GL} \sum_{f \in Pl} \sum_{i \in Rt} \sum_{k \in VhA} (Pkc) Pk_{p,f,i,k} \\
 & + \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in VhA} (Wtc) WT_{i,k} + \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in VhA} (Eac) EA_{i,k} + \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in VhA} (Ldc) LD_{i,k}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

3.7.6 Restricciones

El sistema logístico es una cadena de suministros multiplanta que envía sus productos a múltiples detallistas ubicados a lo largo y ancho de una región geográfica, se trata de un sistema multiproducto con restricciones de productos reutilizables. El sistema de distribución de productos finales y recolección de materiales reutilizables se realiza usando una flota heterogénea, que visita los diferentes nodos teniendo en cuenta la existencia de ventanas de tiempo suaves y rígidas. Seguidamente se presenta cada uno de los tipos de restricciones que conforman el modelo.

Asignación y flujo de vehículos

Los vehículos usados son asignados a una planta a partir de la cual prestan su servicio, tal asignación se representa en la ecuación 3.21 en la cual un vehículo sólo puede ser asignado a una única planta; la continuidad del flujo de los vehículos a través de los nodos se muestra en la ecuación 3.22, en ella se garantiza que cada vehículo que entra a un nodo salga de él; en la ecuación 3.23 y en la ecuación 3.24, se representan respectivamente la salida de un vehículo de una planta y su regreso a ella. Además, en la ecuación 3.25 se representa la posibilidad que tiene un vehículo de acceder a un nodo específico. La accesibilidad puede estar condicionada por el tipo de vía, las características de las instalaciones, condicionamientos del tráfico, etc.

$$\sum_{f \in Pl} VU_{f,k} \leq 1 \quad \forall k \in VhA \quad (3.21)$$

$$\sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,j,k} - \sum_{i \in Dest_j} Ar_{j,i,k} = 0 \quad \forall j \in Rt, k \in VhA \quad (3.22)$$

$$\sum_{j \in Rt} Ar_{i,j,k} = VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in VhA \quad (3.23)$$

$$\sum_{i \in Rt} Ar_{i,j,k} = VU_{j-av,k} \quad \forall j \in DN, k \in VhA \quad (3.24)$$

$$Ar_{i,j,k} \leq VA_{j,k} \quad \forall (i,j) \in A \parallel i \in (Pl \cup Rt) \wedge j \in Rt \cup DN, k \in VhA \quad (3.25)$$

Restricciones de capacidad

La ecuación 3.26, y la ecuación 3.27 representan las condiciones iniciales de capacidad de los vehículos tanto en masa como en volumen, estas restricciones permiten establecer una relación entre las variables de carga en masa y volumen ($MiV_{i,k}$ y $ViV_{i,k}$), y el uso ($VU_{i,k}$) en un vehículo determinado k . Con ellas se garantiza que la carga en un vehículo asignado nunca exceda su capacidad en el momento de iniciar su recorrido.

$$MiV_{i,k} \leq MvCp_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in VhA \quad (3.26)$$

$$ViV_{i,k} \leq VvCp_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in VhA \quad (3.27)$$

La ecuación 3.28 y ecuación 3.29 representan las condiciones iniciales de carga de cada uno de los vehículos en su respectiva planta asignada. En ellas la carga, en masa o volumen, de un vehículo en su planta de origen es igual a la sumatoria de cantidad a productos a entregar por su respectiva masa o volumen.

$$MiV_{f,k} = \sum_{p \in Pr} \sum_{j \in Rt} Ms_p D_{l_{p,f,j,k}}, \quad \forall f \in Pl, k \in VhA \quad (3.28)$$

$$ViV_{f,k} = \sum_{p \in Pr} \sum_{j \in Rt} Vl_p D_{l_{p,f,j,k}}, \quad \forall f \in Pl, k \in VhA \quad (3.29)$$

La ecuación 3.30 y la ecuación 3.31 presentan el comportamiento de la carga a lo largo del recorrido, en masa y en volumen. En ellas si el vehículo k recorre el arco (i, j) la carga al llegar al nodo j es igual a la carga en el nodo i menos lo entregado en el nodo j más lo recogido en este nodo.

$$\begin{aligned} MiV_{i,k} - \sum_{p \in Pr} Ms_p D_{l_{p,f,j,k}} + \sum_{p \in GL} Ms_p P_{k_{p,f,j,k}} \\ - MiV_{j,k} \leq (1 - Ar_{i,j,k}) MvCp_k \\ \forall (i, j) \in A \parallel j \in Rt, i \in Pl \Rightarrow f = i, k \in VhA, f \in Pl \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} ViV_{i,k} - \sum_{p \in Pr} Vl_p D_{l_{p,f,j,k}} + \sum_{p \in GL} Vl_p P_{k_{p,f,j,k}} \\ - ViV_{j,k} \leq (1 - Ar_{i,j,k}) VvCp_k \\ \forall (i, j) \in A \parallel j \in Rt, i \in Pl \Rightarrow f = i, k \in VhA, f \in Pl \end{aligned} \quad (3.31)$$

Finalmente, en la ecuación 3.32 y en la ecuación 3.33 se representa la totalidad de carga al regresar a la planta.

$$\sum_{p \in GL} \sum_{j \in Rt} Ms_p Pk_{p,f,j,k} \leq MvCp_k VU_{i,k} \quad \forall f \in Pl, k \in VhA \quad (3.32)$$

$$\sum_{p \in GL} \sum_{j \in Rt} Vl_p Pk_{p,f,j,k} \leq VvCp_k VU_{i,k} \quad \forall f \in Pl, k \in VhA \quad (3.33)$$

Restricciones de demanda

Debido a la posibilidad de fraccionar los lotes cuando la demanda no puede ser satisfecha por un solo vehículo, con la ecuación 3.34 se permiten entregas parciales, de cantidades menores a la demanda. Asimismo, en la ecuación 3.35 y en la ecuación 3.36 se presentan la demanda de productos en los nodos de los detallistas y de materiales de retorno en las plantas, respectivamente. Como se puede observar los productos a un detallista pueden provenir de diferentes plantas o en diferentes vehículos, de manera similar ocurre con los materiales de retorno.

$$Dl_{p,f,j,k} \leq PrDm_{p,j} \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,j,k} \quad \forall p \in Pr, f \in Pl, j \in Rt, k \in VhA \quad (3.34)$$

$$\sum_{f \in Pl} \sum_{k \in VhA} Dl_{p,f,i,k} = PrDm_{p,i} \quad \forall p \in Pr, i \in Rt \quad (3.35)$$

$$\sum_{f \in Rt} \sum_{k \in VhA} Pk_{p,f,i,k} = GLDm_{p,i} \quad \forall p \in GL, f \in Pl \quad (3.36)$$

Recolección de materiales reutilizables

La ecuación 3.37 y la ecuación 3.38, garantizan que cada vehículo sólo pueda recoger materiales en los nodos visitados en una ruta. Esas ecuaciones permiten controlar que masa y volumen de los productos recogidos en cada nodo no excedan la capacidad del vehículo. Por su parte la suma de las variables binarias al lado derecho, garantiza que el vehículo haya visitado el nodo.

$$\sum_{p \in GL} \sum_{f \in Pl} Ms_p Pk_{p,f,j,k} \leq MvCp_k \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,k} \quad \forall j \in Rt, k \in VhA \quad (3.37)$$

$$\sum_{p \in GL} \sum_{f \in Pl} Vl_p Pk_{p,f,j,k} \leq VvCp_k \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,k} \quad \forall j \in Rt, k \in VhA \quad (3.38)$$

Restricciones de inventario

La ecuación 3.39 se utiliza para el control de inventario en las plantas de producción y el suministro correspondiente a los detallistas, mientras que la ecuación 3.40 controla el inventario de materiales de retorno en los detallistas y su recolección y envío hacia las plantas. La factibilidad se garantiza cuando en las dos ecuaciones la disponibilidad de producto (material reutilizable) es mayor o igual a lo requerido.

$$\sum_{j \in Rt} \sum_{k \in VhA} Dl_{p,f,j,k} \leq PrAv_{f,p} \quad \forall p \in Pr, f \in Pl \quad (3.39)$$

$$\sum_{f \in Pl} \sum_{k \in VhA} Pkl_{p,f,j,k} \leq GlAv_{f,p} \quad \forall p \in GL, j \in Rt \quad (3.40)$$

Ventanas de tiempo

Para representar los tiempos de salida de los nodos y la llegada a los mismos, la ecuación 3.41 establece las horas de salida desde un nodo i y la respectiva llegada a un nodo j . En esta, la variable $Ar_{i,j,k}$ garantiza que haya desplazamiento directo entre los dos nodos.

$$Hr_{i,k} + WT_{i,k} + TwSr_i + Ar_{i,j,k} TrT_{i,j,k} - Hr_{j,k} \leq (1 - Ar_{i,j,k}) TwUB_j \quad \forall (i, j) \in A, k \in VhA \quad (3.41)$$

Las ventanas de tiempo rígidas, en los nodos, se representan por la ecuación 3.42 para el límite inferior, y por la ecuación 3.43 para el superior; las ventanas de tiempo que tienen que ver con los vehículos y sus límites se pueden observar en la ecuación 3.44 y la ecuación 3.45.

$$TwLB_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k} \leq Hr_{i,k} + WT_{i,k} \quad \forall i \in Pl \cup Rt, k \in VhA \quad (3.42)$$

$$TwUB_j \sum_{i \in Orig_j} Arc_{i,j,k} \geq Hr_{j,k} \quad \forall j \in (Rt \cup DN), k \in VhA \quad (3.43)$$

$$Hr_{i,k} \geq Eh_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in VhA \quad (3.44)$$

$$Hr_{i,k} \leq Lh_k VU_{i,k} \quad \forall i \in DN, k \in VhA \quad (3.45)$$

Las ventanas de tiempo suaves, asociadas con los tiempos preferidos de entrega en los diferentes nodos se observan en la ecuación 3.46 para el límite inferior y en la ecuación 3.47 para el respectivo límite superior.

$$Hr_{i,k} = TwSLB_i \sum_{j \in Dest_i} Arc_{i,j,k} + LA_{i,k} - EA_{i,k} \quad \forall i \in (Pl \cup Rt), k \in VhA \quad (3.46)$$

$$Hr_{i,k} + TwSr_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k} = TwSUB_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k} + LD_{i,k} - ED_{i,k} \quad (3.47)$$

$$\forall i \in (Pl \cup Rt), k \in VhA$$

La figura 3.4 muestra los casos posibles en lo que respecta a las ventanas de tiempo rígidas, en el caso a) si un detallista es visitado antes del límite inferior de la ventana de tiempo, el vehículo que hace la entrega (y recolección) deberá esperar un tiempo $WT_{i,k}$ hasta que pueda empezar a ser atendido; en b) el arribo se produce dentro de los límites y es posible realizar las labores de cargue y descargue correspondientes finalizando igualmente dentro de los límites de la ventana de tiempo; en c) y d) no es posible realizar la entrega pues no se alcanzarían a realizar la entrega y recolección dentro de los límites de tiempo, a pesar de que se haya llegado dentro de los mismos como sucede en el caso c) o simplemente la llegada tiene lugar por fuera de los límites como puede observarse en el último caso.

Tipos de variables

Las ecuaciones 3.48, 3.49, 3.50 y 3.51 muestran el tipo de variables del modelo.

$$Ar_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \text{ viaja directamente de } i \text{ a } j. \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.48)$$

$$VU_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \text{ es usado y asignado a la planta } i. \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (3.49)$$

$$Dl_{p,f,i,k}, Pk_{p,f,i,k} \geq 0 \quad \forall p \in Pd, f \in Pl, i \in Rt, k \in VhA \quad (3.50)$$

$$EA_{i,k}, LD_{i,k}, WT_{i,k}, Hr_{i,k}, MiV_{i,k}, ViV_{i,k}, ED_{i,k}, LA_{i,k} \quad \forall i \in Fc \cup DN, k \in VhA \quad (3.51)$$

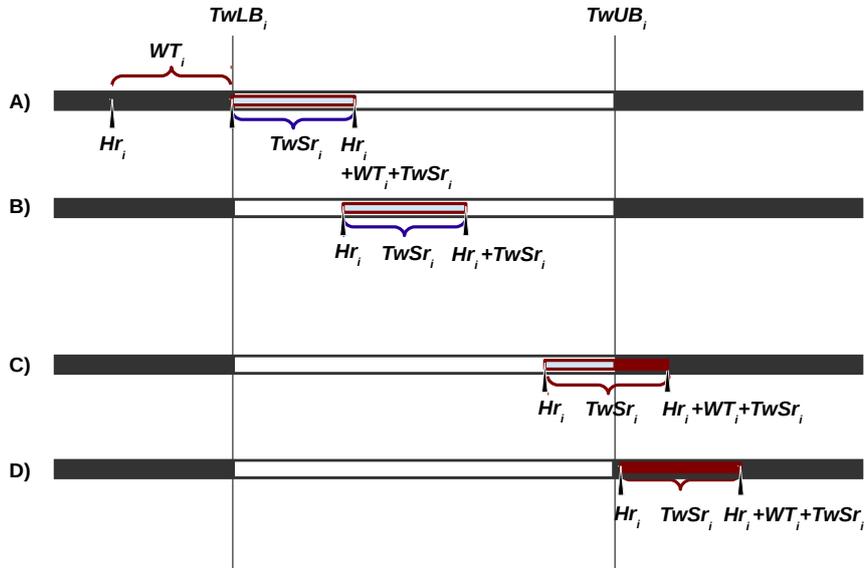


Figura 3.4: Ventanas de tiempo rígidas

3.8 Conclusiones

Tras la construcción del modelo bietapa, se presentan las conclusiones para cada una de las etapas, así:

Primera etapa

- El modelo de programación lineal entera mixta utilizado en la primera etapa, permite asistir la toma de decisiones relacionadas con manufactura, inventarios y transporte de productos y materiales de retorno.
- La preparación para la fabricación de los lotes de producto se modelizó haciendo uso de variables binarias.
- Con el fin de restringir los envíos directos, entre ciertos pares de nodos, se utilizaron variables binarias como una forma de definir espacios de discontinuidad.

- El sistema de manufactura se modelizó teniendo en cuenta las características de los sistemas MRP y APS, entre las cuales están las listas de materiales para determinar los requerimientos de producto, los tiempos de retardo entre la colocación y la recepción de órdenes, y las restricciones de capacidad en cada uno de los nodos.
- En la primera etapa los costes de transporte aguas abajo y aguas arriba se consideran únicamente de manera orientativa para localizar la producción en las plantas, pues tal asignación no tiene en cuenta las particularidades del transporte.

Segunda etapa

- Un modelo de ruteo de vehículos, en la segunda etapa, realiza la asignación detallada de los vehículos y de sus recorridos, teniendo en cuenta las particularidades del problema.
- La segunda etapa considera variables binarias para la asignación de los vehículos a las plantas y para determinar los arcos que recorre cada vehículo (recogiendo y entregando productos) desde que sale del nodo al cual es asignado, hasta que regresa a él.
- Dada la cantidad de variables binarias correspondientes a la segunda etapa, y a la complejidad de las restricciones que involucra, el problema de ruteo de vehículos resulta más complejo de resolver.

De forma general

- El modelo propuesto permite la integración de los sistemas de producción y de logística directa e inversa, en un ambiente en el cual el aprovisionamiento depende parcialmente de los materiales de retorno.
- El modelo bietapa para minimizar los costes totales de la planificación de la producción y del transporte de manera conjunta, integrando los niveles de planificación táctico y operativo en el contexto de una cadena de suministro que incorpora materiales de retorno a algunos de sus productos, puede presentar una respuesta subóptima al realizarse en dos etapas.
- El modelo propuesto viene a llenar un vacío al integrar la planeación de la producción con la logística inversa cuya función de aprovisionamiento, que surge de la necesidad de utilizar materiales provenientes de flujos de retorno. El hecho de considerar los flujos de materiales aguas arriba y aguas abajo permite tomar decisiones de transporte que minimizan el coste total.

Capítulo 4

Modelo para la gestión integrada de la producción y la logística en un ambiente multiproducto, multiplanta

En este capítulo se desarrolla un modelo para la gestión de la producción y de la logística directa e inversa, de manera integrada. En la sección 4.1 se presentan las particularidades del enfoque de modelado y en la sección 4.2 se presenta de manera detallada el modelo matemático en el que se desarrolla la integración de la gestión de fabricación con los transportes de productos hacia adelante (del productor al detallista) y de materiales de retorno hacia atrás (del detallista al productor). El modelo de programación lineal entera mixta (MILP) es una alternativa para minimizar los costes en este tipo de sistemas. Finalmente, en la sección 4.3 se presentan algunas consideraciones a modo de conclusiones.

4.1 Descripción general del enfoque de modelado

A pesar de que el problema de investigación puede solucionarse mediante el modelo de dos etapas propuesto en el Capítulo 3.4, se propone una solución en un único modelo, que integra la gestión de manufactura y la gestión de los flujos de productos y de material de retorno en uno y otro sentido. Se considera que de tener solución óptima factible, la solución mediante un único modelo presentará

la ventaja de proporcionar como resultado un óptimo global, pues no necesariamente la ejecución de varias etapas puede garantizarlo. En contraposición, el coste computacional se espera sea considerablemente mayor.

El modelo propuesto permite realizar de manera simultánea, la asignación del integrante de la cadena de suministro que debe enviar y recibir cada uno de los volúmenes de demanda, el vehículo utilizado y la ruta seleccionada para realizarlo al menor coste posible, prescindiendo del supuesto de que todas las rutas debían ser directas. Asimismo, se definen los volúmenes de producción o compra de productos a terceros (si se trata del primer nivel de la cadena de suministros), los niveles de inventarios y la existencia o no de envíos directos desde las plantas a los detallistas.

En lo que respecta al ruteo de vehículos se considera que se puede visitar más de un cliente en cada una de las rutas con el fin de reducir los costes y, dada la naturaleza del sistema y los requerimientos de la demanda, un cliente puede ser visitado por varios vehículos. El modelo considera los flujos tanto hacia adelante como hacia atrás.

4.2 Modelo Integrado

El modelo integrado que se presenta a continuación tiene en cuenta la existencia de una flota heterogénea, ventanas de tiempo rígidas y suaves en los vehículos y en las diferentes instalaciones, logística hacia adelante y hacia atrás, fraccionamiento de lotes, múltiples orígenes, múltiples niveles y múltiples destinos, entre otras características. Una representación de la complejidad de dicho sistema puede observarse en las figuras 2.1, 2.2 y en 2.3.

4.2.1 Conjuntos

Los siguientes conjuntos permiten clasificar la información asociada con el modelo.

T: Periodos para los cuales se realiza la planeación.

Fc: Conjunto de nodos de la red logística, son las instalaciones que constituyen los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

Pl: Conjunto de plantas de producción en las cuales se elabora el producto y se recupera el material de retorno $Pl \subset Fc$.

LC: Conjunto de centros logísticos $LC \subset Fc$.

SC: Conjunto de almacenes reguladores $SC \subset Fc$.

Db: Conjunto de distribuidores $Db \subset Fc$.

Rt: Conjunto de detallistas, se encargan de colocar el producto y de recibir el material de retorno a consumidores $Rt \subset Fc$.

DN: Conjunto de nodos ficticios para representar el regreso de los vehículos.

A: Conjunto de arcos que unen directamente dos nodos i y j a lo largo de los cuales viajan los productos.

Vh: Conjunto de vehículos disponibles para ser utilizados.

Pd: Conjunto de tipos de productos (incluyendo materiales de retorno) que son transportados en los diferentes niveles de la cadena de suministros.

Pr: Conjunto de bienes finales que viajan hacia adelante, desde el productor hacia el detallista, a lo largo de la cadena de suministros $Pr \subset Pd$.

GL: Conjunto de materiales reutilizables que viajan en sentido inverso a la cadena de suministros, para ser aprovechados en la producción de nuevos productos $GL \subset Pd$.

LL_i: Conjunto de nodos en un eslabón inferior al nodo i en la cadena de suministros.

HL_i: Conjunto de nodos en un eslabón superior al nodo i en la cadena de suministros.

Dest_f: Conjunto de nodos o instalaciones a las cuales se puede acceder desde la instalación f en el flujo hacia adelante, o desde las cuales se puede llegar a f en el sentido inverso en una ruta determinada.

Orig_j: Conjunto de nodos o instalaciones desde las cuales se puede acceder desde la instalación j en el flujo hacia adelante, o a las cuales se puede llegar a j en el sentido inverso en una ruta determinada.

Los diferentes eslabones de la cadena de suministros presentados en la tabla 3.7, permiten hacer un buen modelizado del sistema.

4.2.2 Parámetros

Los parámetros del modelo se enuncian a continuación:

PrdC_{s_p,i}: Coste unitario de manufactura de en una planta determinada i , si $p \in Pr$ o coste unitario del proceso de recuperación de un material de retorno, si $p \in GL$. El coste del material nuevo que se adquiere ante la insuficiencia de los materiales de retorno se considera como un coste de penalización.

$StUCs_{p,i}$: Coste de preparación de un lote de producción de un producto determinado p en una planta específica i .

$InCs_{p,f}$: Coste de gestión y mantenimiento de inventario de una unidad de producto p en una instalación f durante un periodo.

$DfCs_{p,k}$: Coste de rotura de inventario por unidad faltante de producto p en un nodo k .

$GlCs_{p,i}$: Coste de una unidad de “material de retorno” p nueva requerida para la producción de una unidad de producto en la planta i , tiene lugar cuando el retorno y el inventario resultan insuficientes para satisfacer las necesidades de producción.

VTC_k : Coste variable de transporte por unidad de distancia para un vehículo k .

FTC_k : Coste fijo por disponer de un vehículo k en la distribución.

DlC : Coste de entregar una unidad de producto, aunque podría variar dependiendo del producto o el nodo destino, en este caso se asume constante.

PkC : Coste de recoger una unidad de material de retorno, podría depender de su naturaleza o del nodo como en el caso anterior.

EaC : Coste por unidad de tiempo de anticipación a una ventana de tiempo suave.

LdC : Coste por unidad de tiempo de tardanza a una ventana de tiempo suave.

WtC : Coste de espera por ser atendido ante la llegada anticipada a un nodo.

$Dst_{i,j}$: Distancia entre las instalaciones i y j de la cadena de suministros, es la longitud del arco $(i, j) \in A$.

$VA_{j,k}$: Parámetro binario de valor uno si un vehículo k puede acceder al nodo j .

Spd_k : Velocidad de desplazamiento promedio del vehículo k .

$TT_{i,j,k}$: Tiempo de desplazamiento del vehículo k entre las instalaciones i y j de la cadena de suministros ($TT_{i,j,k} = \frac{Dst_{i,j}}{Spd_k}$).

$MvCp_k$: Capacidad del vehículo k en unidades de masa.

$VvCp_k$: Capacidad del vehículo k en unidades de volumen.

Ms_p : Masa de una unidad de producto p .

Vl_p : Volumen de una unidad de producto p .

- $U_{p,i}$: Parámetro binario que representa la posibilidad que tiene un producto p de ser elaborado, permanecer, ingresar o salir de la instalación i , en un momento dado. Este parámetro obedece tanto a la tecnología existente en la instalación correspondiente como a las políticas desarrolladas al respecto.
- L_i : Nivel del eslabón (nodo) i en la cadena de suministros.
- $TwSr_i$: Tiempo de descarga de productos y carga de productos reutilizables en el nodo i .
- $TwLB_i$: Límite inferior de la ventana de tiempo rígida para el nodo i .
- $TwUB_i$: Límite superior de la ventana de tiempo rígida para el nodo i .
- $TwSLB_i$: Límite inferior de la ventana de tiempo suave para el nodo i .
- $TwSUB_i$: Límite superior de la ventana de tiempo suave para el nodo i .
- Eh_k : Límite inferior de la ventana de tiempo de disponibilidad del vehículo k .
- Lh_k : Límite superior de la ventana de tiempo de disponibilidad del vehículo k .
- ax : Constante auxiliar usada para denominar los nodos ficticios.
- $PrTm_{p,i}$: Tiempo unitario de elaboración del producto p en la planta i .
- $StTm_{p,i}$: Tiempo de preparación de un lote de producción de producto p en la planta i .
- $PrCp_i$: Capacidad disponible de la planta de producción i en un periodo, en unidades de tiempo.
- $MsCp_i$: Capacidad de almacenamiento en unidades de masa en la instalación i .
- $ViCp_i$: Capacidad de almacenamiento en unidades de volumen en la instalación i .
- $Sl_{p,i}$: Ventas o volumen promedio por unidad de tiempo de producto p en la instalación i .
- Cb_i : Unidades de tiempo que se tienen como referencia para determinar las existencias a mantener en una instalación i .
- $ScArr_{p,j,t}$: Llegadas de producto p a la instalación j en el periodo t , resultantes de un proceso de planeación o de compras que se realizaron en un periodo anterior.
- $Lt_{f,j}$: Tiempo de transporte desde el nodo f al nodo j en unidades discretas de tiempo correspondientes a los periodos de planeación.

$PrDm_{p,j,t}$: Demanda de producto p en el detallista j prevista para el periodo t .

$Inv_{p,f,0}$: Inventario inicial (periodo cero) de producto p en la instalación f .

$RqGl_{p,q}$: Cantidad de material de retorno p requerido para una unidad de producto q .

$RtGlC_{p,j,t}$: Cantidad de material de retorno de tipo p , devuelta al detallista j en el periodo t .

$MD_{f,i}$: Mínimo número de unidades de un producto que se envían directamente desde el nodo f hasta el nodo i .

M : Número muy grande utilizado para crear restricciones disyuntivas.

4.2.3 Variables de decisión

En este apartado se presentan las variables de decisión asociadas al modelo y las variables auxiliares que se emplean para la modelización del sistema.

$Prdc_{p,i,t}$: Cantidad de producto tipo p que debe ser producido en la fábrica i en el periodo de planeación t .

$StU_{p,i,t}$: Variable binaria que indica la elaboración de un lote de producto tipo p en la fábrica i en el periodo de planeación t .

$Inv_{p,f,t}$: Cantidad de producto tipo p almacenado en la instalación f al finalizar el periodo de planeación t .

$Df_{p,i,t}$: Cantidad de rotura de inventario de producto tipo p en la instalación del detallista i al finalizar el periodo de planeación t .

$BGl_{p,f,t}$: Cantidad de materiales de retorno tipo p ($p \in GL$) comprados para ser usados en la fábrica f en la producción correspondiente al periodo de planeación t .

$VU_{i,k}$: Variable binaria que representa el uso del vehículo disponible k y su asignación al nodo (en este caso a la planta) i cuando su valor es uno.

$Ar_{i,j,k,t}$: Variable binaria cuyo valor es uno si el vehículo k viaja directamente entre i y j , esto es usando el arco $A_{i,j}$ en el periodo t , y cero de lo contrario.

$Dl_{p,f,i,k,t}$: Cantidad de producto p elaborada en la planta f que es entregada en el nodo i por el vehículo k , en el periodo t .

$Pk_{p,f,i,k,t}$: Cantidad de material de recuperación p que es enviada a la planta f desde el nodo i haciendo uso del vehículo k , en el periodo t .

$MiV_{i,k,t}$: Masa de los productos cargados en el vehículo k en el momento de abandonar el nodo i en el periodo t .

$ViV_{i,k,t}$: Volumen de los productos cargados en el vehículo k en el momento de abandonar el nodo i en el periodo t .

$Hr_{i,k,t}$: Hora de llegada o salida del vehículo k , del nodo i , en el periodo t .

$WT_{i,k,t}$: Tiempo de antelación en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo rígida del nodo i , en el periodo t .

$EA_{i,k,t}$: Tiempo de antelación en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i , en el periodo t .

$ED_{i,k,t}$: Tiempo de antelación en la salida del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i , en el periodo t .

$LA_{i,k,t}$: Tiempo de retardo en la llegada del vehículo k , con respecto al límite inferior de la ventana de tiempo suave del nodo i , en el periodo t .

$LD_{i,k,t}$: Tiempo de retardo en la salida del vehículo k , con respecto al límite superior de la ventana de tiempo suave del nodo i , en el periodo t .

$\alpha 1_{i,j,k,t}$ y $\alpha 2_{i,j,k,t}$: Variables continuas para representar las restricciones de discontinuidad que tienen ocasión por las políticas de volumen de los envíos directos entre el fabricante i y el detallista j en el vehículo k en el periodo t .

$\alpha 3_{i,j,k,t}$: Variables binarias para representar las restricciones de discontinuidad, que tienen ocasión por las políticas de volumen de los envíos directos entre el fabricante i y el detallista j , en el vehículo k en el periodo t .

4.2.4 Función objetivo

La función objetivo del modelo propuesto consiste en la minimización del coste global del sistema logístico analizado, es decir, los costes de producción, los costes de la logística que implica el colocar los productos al alcance del consumidor final y los debidos a la logística de retorno de los materiales reutilizables desde los detallistas a las plantas. El coste total resulta de la suma del coste de la producción (costes fijos y variables), el coste de gestión y mantenimiento de inventarios, el coste de déficit por rotura de inventarios, el coste de compra de los “materiales de retorno” requeridos para la fabricación (cuando son insuficientes), y el coste de transporte en ambos sentidos de la cadena de suministros.

Cada uno de los términos en la ecuación 4.1 representa un rubro del coste, en su orden: *coste variable de producción*, *costes de preparación*, *costes de mantenimiento de inventarios*, *costes de déficit por rotura de existencias*, *coste de adquisición*

de nuevos materiales, coste variable de transporte, coste fijo asociado al uso de los vehículos, coste de descarga asociado a la distribución de producto, coste de carga asociado a la recogida de los productos reutilizables, coste de espera por llegada temprana a un nodo con ventana de tiempo rígida, coste de penalización por llegadas fuera de la ventana de tiempo suave y coste de penalización por salida después de la hora preferida por el cliente.

En el modelo propuesto, los costes de carga y descarga se asumen por unidad entregada o recibida, pero pueden modelizarse como dependientes del número de paradas en una ruta o como dependientes del lugar o tipo de vehículo, etc.

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_{t \in T} \sum_{p \in Pd} \sum_{f \in Pl} U_{p,f} PrdCs_{p,f} Prdc_{p,f,t} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in Pd} \sum_{f \in Pl} U_{p,f} StUCs_{p,f} StU_{p,f,t} \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{p \in Pd} \sum_{i \in Fc} U_{p,i} InCs_{p,i} Inv_{p,i,t} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in Pr} \sum_{k \in Fc} U_{p,k} DfCs_{p,k} Df_{p,k,t} \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{p \in GL} \sum_{f \in Pl} U_{p,f} GlCs_{p,f} BGl_{p,f,t} + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in Vh} VTC_k TT_{i,j,k} Ar_{i,j,k,t} \\
 & + \sum_{i \in Pl} \sum_{k \in Vh} FTC_k VU_{i,k} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in Pr} \sum_{f \in Fc \setminus Rt} \sum_{i \in HL_f} \sum_{k \in Vh} (DlC) Dl_{p,f,i,k,t} \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{p \in GL} \sum_{f \in Fc \setminus Rt} \sum_{i \in HL_f} \sum_{k \in Vh} (PkC) Pk_{p,f,i,k,t} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in Vh} (WtC) WT_{i,k,t} \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in Vh} (EaC) EA_{i,k,t} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in Fc} \sum_{k \in Vh} (LdC) LD_{i,k,t}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.2.5 Restricciones

Dada la naturaleza del sistema logístico descrito en el Capítulo 2, concretamente en la sección 2.8, a continuación se presentan las restricciones de tal sistema.

Restricciones de producción

En la ecuación 4.2 se garantiza que el tiempo utilizado para el alistamiento de la producción y para la ejecución en si misma, no exceda la capacidad disponible, en cada uno de los periodos dentro del horizonte de planeación, en cada planta. La ecuación 4.3 establece si hay preparación para la producción de un lote de un determinado tipo de producto en una planta en el respectivo periodo. Además, la

ecuación 4.4 establece los requerimientos de procesamiento de material de retorno, por planta y por periodo.

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} PrTm_{p,i} Prdc_{p,i,t} + \sum_{p \in Pd} U_{p,i} StTm_{p,i} StU_{p,i,t} \leq PrCp_i \quad \forall i \in Pl, t \in T \quad (4.2)$$

$$Prdc_{p,i,t} \leq (M)U_{p,i} StU_{p,i,t} \quad \forall p \in Pd, i \in Pl, t \in T \quad (4.3)$$

$$Prdc_{p,i,t} = \sum_{q \in PR} U_{p,f} U_{q,f} RqGl_{p,q} Prdc_{q,i,t} \quad \forall p \in GL, i \in Pl, t \in T \quad (4.4)$$

Logística directa

El comportamiento de los flujos de producto hacia adelante se ha tipificado mediante tres ecuaciones: desde las plantas en la ecuación 4.5, a través de los nodos intermedios en la ecuación 4.6 y hasta los detallistas en la ecuación 4.7. Tales ecuaciones corresponden a lo que se detalla en la figura 2.3, respecto de los orígenes y destinos en los diferentes periodos de tiempo.

$$Inv_{p,f,t-1} + Prdc_{p,f,t} - \sum_{j \in HL_f} \sum_{k \in Vh} U_{p,f} U_{p,j} Dl_{p,f,j,k,t} = Inv_{p,f,t} - Df_{p,f,t} \quad (4.5)$$

$$\forall p \in Pr, f \in Pl, t \in T$$

$$Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{f \in LL_j} \sum_{k \in Vh} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} Dl_{p,f,j,k,t-Lt_{f,j}} - \sum_{g \in HL_j} \sum_{k \in Vh} U_{p,j} U_{p,g} Dl_{p,j,g,k,t} = Inv_{p,j,t} - Df_{p,j,t} \quad (4.6)$$

$$\forall p \in Pr, j \in Fc \setminus (Pl \cup Rt), t \in T$$

$$Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{f \in LL_j} \sum_{k \in Vh} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} Dl_{p,f,j,k,t-Lt_{f,j}} - PrDm_{p,j,t} = Inv_{p,j,t} - Df_{p,j,t} \quad (4.7)$$

$$\forall p \in Pr, j \in Rt, t \in T$$

Logística inversa

Las ecuaciones siguientes ilustran el comportamiento de los flujos de material de reutilización, desde los detallistas hacia las plantas, en tres etapas: hasta las plantas ecuación 4.8, a través de los eslabones intermedios de la cadena de suministros ecuación 4.9, y desde los detallistas del producto ecuación 4.10. Ver detalle en la figura 2.3.

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,f,t-1} + ScArr_{p,f,t} + \sum_{i \in HL_f} \sum_{k \in Vh} \sum_{t-Lt_{f,j} \geq 1} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,i,t-Lt_{f,j}} \\
 & - \sum_{g \in LL_j} U_{p,f} U_{q,f} RqGl_{p,q} Prdc_{q,f,t} = Inv_{p,f,t} - BGIC_{p,f,t} \quad (4.8) \\
 & \forall p \in GL, f \in Pl, t \in T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + \sum_{g \in HL_j} \sum_{k \in Vh} \sum_{t-Lt_{j,g} \geq 1} U_{p,j} U_{p,g} Pk_{p,j,g,k,t-Lt_{j,g}} \\
 & - \sum_{g \in LL_j} \sum_{k \in Vh} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,j,k,t} = Inv_{p,j,t} \quad (4.9) \\
 & \forall p \in GL, j \in Fc \setminus (Pl \cup Rt), t \in T
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & Inv_{p,j,t-1} + ScArr_{p,j,t} + RtGIC_{p,j,t} - \sum_{f \in LL_j} \sum_{k \in Vh} U_{p,f} U_{p,j} Pk_{p,f,j,t} = Inv_{p,j,t} \\
 & \forall p \in GL, j \in Rt, t \in T \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

Asignación y flujo de vehículos

Los vehículos usados son asignados a una planta a partir de la cual prestan su servicio, durante todo el horizonte de planeación, tal asignación se representa en la ecuación 4.11; la continuidad del flujo de los vehículos a través de los nodos se muestra en la ecuación 4.12, en la cual se garantiza que cada vehículo que entra a un nodo salga de él; en la ecuación 4.13 y en la ecuación 4.14, se representan respectivamente la salida de un vehículo de un nodo fuente (diferente a detallistas) y su regreso a él. Además, en la ecuación 4.15 se representa la posibilidad que tiene un vehículo de acceder a un nodo específico que puede estar condicionada por el tipo de vía, las instalaciones, el tráfico, etc.

$$\sum_{f \in Pl} VU_{f,k} \leq 1 \quad \forall k \in Vh \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in \text{Orig}_j} Ar_{i,j,k,t} - \sum_{i \in \text{Dest}_j} Ar_{j,i,k,t} = 0 \quad \forall j \in Fc \setminus Pl, k \in Vh, t \in T \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in Fc \setminus Pl} Ar_{i,j,k,t} \leq VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in Vh, t \in T \quad (4.13)$$

$$\sum_{i \in Fc \setminus Pl} Ar_{i,j,k,t} \leq VU_{j-ax,k} \quad \forall j \in DN, k \in Vh, t \in T \quad (4.14)$$

$$Ar_{i,j,k,t} \leq VA_{j,k} \quad \forall j \in Fc \parallel (i,j) \in A, k \in Vh, t \in T \quad (4.15)$$

Restricciones de capacidad

La ecuación 4.16, y la ecuación 4.17 representan las condiciones iniciales de capacidad de los vehículos tanto en masa como en volumen, permiten establecer una relación entre las variables carga en masa y volumen ($MiV_{i,k,t}$ y $ViV_{i,k,t}$) y el uso de un vehículo determinado ($VU_{i,k}$).

Las ecuaciones 4.18 y 4.19 representan las condiciones iniciales de carga de cada uno de los vehículos en su nodo de partida asignado, mientras que en las ecuaciones 4.20 y 4.21 se presentan el comportamiento de la carga a lo largo del recorrido, en masa y en volumen; y en las ecuaciones 4.22 y 4.23 se representa la carga que regresa a la planta.

$$MiV_{i,k,t} \leq MvCp_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.16)$$

$$ViV_{i,k,t} \leq VvCp_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.17)$$

$$MiV_{i,k,t} = \sum_{p \in Pr} \sum_{j \in HL_f} Ms_p Dl_{p,f,j,k,t} \quad \forall f \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.18)$$

$$ViV_{i,k,t} = \sum_{p \in Pr} \sum_{j \in HL_f} Vl_p Dl_{p,f,j,k,t} \quad \forall f \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
 MiV_{i,k,t} - \sum_{p \in Pr} Ms_p Dl_{p,f,j,k,t} + \sum_{p \in GL} Ms_p Pk_{p,f,j,k,t} \\
 - MiV_{j,k} \leq (1 - Ar_{i,j,k,t}) MvCp_k \\
 \forall (i,j) \in A \parallel j \in Fc \setminus Pl, i \in Orig_j, L_i = L_f \Rightarrow f = i, k \in Vh, f \in Pl, t \in T
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

$$\begin{aligned}
 ViV_{i,k,t} - \sum_{p \in Pr} Vl_p Dl_{p,f,j,k,t} + \sum_{p \in GL} Vl_p Pk_{p,f,j,k,t} \\
 - ViV_{j,k} \leq (1 - Ar_{i,j,k,t}) VvCp_k \\
 \forall (i,j) \in A \parallel j \in Fc \setminus Pl, i \in Orig_j, L_i = L_f \Rightarrow f = i, k \in Vh, f \in Pl, t \in T
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\sum_{p \in GL} \sum_{j \in HL_f} Ms_p Pk_{p,f,j,k,t} \leq MvCp_k VU_{i,k} \quad \forall f \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \tag{4.22}$$

$$\sum_{p \in GL} \sum_{j \in HL_f} Vl_p Pk_{p,f,j,k,t} \leq VvCp_k VU_{i,k} \quad \forall f \in Fc \setminus Rt, k \in Vh, t \in T \tag{4.23}$$

Restricciones de demanda

En vista de que es posible realizar entregas parciales cuando la demanda no puede ser satisfecha por un solo vehículo, con la ecuación 4.24 se permiten entregas parciales, de cantidades menores. Asimismo, en la ecuación 4.25 y en la ecuación 4.26 se presentan la demanda de productos finales en los nodos de los detallistas y de productos reutilizables en las plantas, respectivamente.

$$Dl_{p,f,j,k,t} \leq PrDm_{p,j,t} \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,j,k,t} \quad \forall p \in Pr, f \in Fc \setminus Rt, j \in Rt, k \in Vh, t \in T \tag{4.24}$$

$$\sum_{f \in LL_j} \sum_{k \in Vh} Dl_{p,f,j,k,t} = PrDm_{p,j,t} \quad \forall p \in Pr, j \in Rt, t \in T \tag{4.25}$$

$$Prdc_{p,f,t} = \sum_{i \in HL_f} \sum_{k \in Vh} Pk_{p,f,i,k,t} + BGl_{p,f,t} \quad \forall p \in GL, f \in Pl, t \in T \tag{4.26}$$

Recolección de materiales de recuperación en los nodos visitados

La ecuación 4.27 y la ecuación 4.28, garantizan que la recolección de materiales de retorno se realiza en los nodos visitados. Estas ecuaciones controlan que tanto masa como volumen de los productos, recogidos a lo largo de la ruta, no excedan la capacidad del vehículo.

$$\sum_{p \in GL} \sum_{f \in LL_j} Ms_p Pk_{p,f,j,k,t} \leq MvCp_k \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,j,k,t} \quad \forall j \in Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.27)$$

$$\sum_{p \in GL} \sum_{f \in LL_j} Vl_p Pk_{p,f,j,k,t} \leq VvCp_k \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,k} \quad \forall j \in Rt, k \in Vh, t \in T \quad (4.28)$$

Ventanas de tiempo

Para representar los tiempos de salida de los nodos y la llegada a los mismos, la ecuación 4.29 establece las horas de salida del nodo i y de llegada al nodo j . En esta ecuación, la variable $Ar_{i,j,k,t}$ se emplea para garantizar que hay un desplazamiento directo del vehículo k desde el nodo i al nodo j en el periodo t .

Las ventanas de tiempo rígidas en los nodos se representan por las ecuaciones 4.30 y 4.31 para los límites inferior y superior; a su vez, las ventanas de tiempo que tienen que ver con los vehículos y sus límites se pueden observar en las ecuaciones 4.32 y 4.33.

$$Hr_{i,k,t} + WT_{i,k,t} + TwSr_i + Ar_{i,j,k,t} TrT_{i,j,k} - Hr_{j,k,t} \leq (1 - Ar_{i,j,k,t}) TwUB_j \quad \forall (i, j) \in A, k \in Vh, t \in T \quad (4.29)$$

$$TwLB_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k,t} \leq Hr_{i,k,t} + WT_{i,k,t} \quad \forall i \in Fc, k \in Vh, t \in T \quad (4.30)$$

$$TwUB_j \sum_{i \in Orig_j} Ar_{i,j,k,t} \geq Hr_{j,k,t} \quad \forall j \in ((Fc \setminus Pl) \cup DN), k \in Vh, t \in T \quad (4.31)$$

$$Hr_{i,k,t} \geq Eh_k VU_{i,k} \quad \forall i \in Pl, k \in Vh, t \in T \quad (4.32)$$

$$Hr_{i,k,t} \leq Lh_k VU_{i,k} \quad \forall i \in DN, k \in Vh, t \in T \quad (4.33)$$

$$Hr_{i,k,t} = TwSLB_i \sum_{j \in Dest_i} Arc_{i,j,k,t} + LA_{i,k,t} - EA_{i,k,t} \quad \forall i \in Fc, k \in Vh, t \in T \quad (4.34)$$

$$Hr_{i,k,t} + TwSr_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k,t} = TwSUB_i \sum_{j \in Dest_i} Ar_{i,j,k,t} + LD_{i,k,t} - ED_{i,k,t} \quad \forall i \in Fc, k \in Vh, t \in T \quad (4.35)$$

Restricciones de almacenamiento

Se tienen dos tipos de restricciones de inventarios: la capacidad en unidades de masa en la ecuación 4.36 y en unidades de volumen en la ecuación 4.37, que acotan los valores máximos a almacenar para la totalidad del inventario; y el inventario de seguridad en la ecuación 4.38, como valor mínimo para cada uno de los productos.

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} Ms_p Inv_{p,i,t} \leq MsCp_i \quad \forall i \in Fc, t \in T \quad (4.36)$$

$$\sum_{p \in Pd} U_{p,i} Vl_p Inv_{p,i,t} \leq VlCp_i \quad \forall i \in Fc, t \in T \quad (4.37)$$

$$Inv_{p,i,t} \geq Sl_{p,i} Cb_i \quad \forall p \in Pr, i \in Fc, t \in T \quad (4.38)$$

Transportes directos entre plantas y detallistas

La ecuación 4.39 y la ecuación 4.40 representan el espacio de discontinuidad asociado a los envíos desde las plantas hasta los detallistas, que también puede extenderse a otro par de niveles de la cadena de suministro si es requerido, para que sólo sean realizados en caso de que superen un valor previamente determinado $MD_{f,i}$. La ecuación 4.39 asigna el valor de cero a los flujos prohibidos por esta política.

$$\sum_{p \in Pr} U_{p,f} U_{p,i} Dl_{p,f,i,k,t} = MD_{f,i} \alpha_{1f,i,t} + (M) \alpha_{2f,i,t} \quad (4.39)$$

$$\forall f \in Pl, i \in Rt, k \in Vh, t \in T \wedge U_{p,f} U_{p,i} = 1$$

$$\alpha_{1f,i,t} + \alpha_{2f,i,t} + \alpha_{3f,i,t} = 1 \quad (4.40)$$

$$\forall f \in Pl, i \in Rt, t \in T \wedge U_{p,f} U_{p,j} = 1$$

Tipos de variables

Los tipos de variables se garantizan mediante las ecuaciones 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45.

$$\begin{aligned}
Prdc_{p,f,t}, Inv_{p,f,t}, Df_{p,f,t}, BGl_{p,f,t} &\geq 0 \quad \forall p, f, t \\
Dl_{p,f,i,k,t}, Pk_{p,f,i,k,t} &\geq 0 \quad \forall p \in Pd, f \in Pl, i \in Rt, k \in Vh, t \in T \\
EA_{i,k,t}, LD_{i,k,t}, WT_{i,k,t}, Hr_{i,k,t}, \\
MiV_{i,k,t}, ViV_{i,k,t}, ED_{i,k,t}, LA_{i,k,t} &\geq 0 \quad \forall i \in Fc \cup DN, k \in Vh \\
\alpha 1_{f,i,k,t}, \alpha 2_{f,i,k,t} &\geq 0 \quad \forall f \in Pl, i \in Rt, k \in Vh, t \in T
\end{aligned} \tag{4.41}$$

$$StU_{p,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si se produce un lote de producto } p \text{ en la planta } i \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \tag{4.42}$$

$$VU_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{si se asigna el vehículo } k \text{ al nodo } i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \tag{4.43}$$

$$Ar_{i,j,k,t} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \text{ va directamente de } i \text{ a } j \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \tag{4.44}$$

$$\alpha 3_{f,j,k,t} = \begin{cases} 1 & \text{si no hay transporte directo entre } f \text{ y } j \text{ en el vehículo } k \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \tag{4.45}$$

4.3 Conclusiones

Tras la construcción del modelo integrado es posible concluir:

- El modelo de programación lineal entera mixta propuesto permite asistir la toma de decisiones relacionadas con manufactura, inventarios y distribución de productos y aprovisionamiento de materiales de retorno que son utilizados como parte de los productos.
- Como característica particular del modelo se destaca el hecho de estar construido para un horizonte temporal de varios periodos, y de considerar los tiempos de transporte en unidades discretas de tiempo para garantizar el aprovisionamiento y la distribución pero de manera continua al interior de

las rutas para determinar las horas en las cuales se visita cada nodo, y de esa forma poder dar satisfacción a las ventanas de tiempo.

- El modelo integrado incluye variables binarias para determinar la preparación de los lotes de producción, para generar espacios de discontinuidad cuando existen restricciones de flujo en determinados arcos de la red de suministros, para la asignación de los vehículos a las plantas y para determinar los arcos que recorre cada vehículo (recogiendo y entregando productos) desde que sale del nodo origen al cual es asignado, hasta que regresa a él.
- La cadena de suministros se modelizó teniendo en cuenta las características de los sistemas MRP y APS, entre las cuales están las que se destacan las listas de materiales para determinar los requerimientos de producto, los tiempos de retardo entre la colocación y la recepción de órdenes, y las restricciones de capacidad en cada uno de los nodos.
- Dada la cantidad de variables binarias que tiene este modelo, es un problema difícil de resolver.
- Desde el punto de vista de modelización el modelo propuesto viene a llenar un vacío al integrar la planeación de la producción con la logística inversa cuya función de aprovisionamiento, que surge de la necesidad de utilizar materiales provenientes de flujos de retorno. El hecho de considerar los flujos de materiales aguas arriba y aguas abajo permite tomar decisiones de transporte que minimizan el coste total.
- El modelo propuesto permite una integración completa entre de los sistemas de producción y de logística directa e inversa, en un ambiente en el cual el aprovisionamiento depende parcialmente de los materiales de retorno.

Capítulo 5

Evaluación de los modelos propuestos

En el presente capítulo se muestra la forma en la cual se realizó la evaluación de los modelos correspondientes a las dos etapas del modelo y se ilustra la forma en que tiene lugar la articulación de las mismas, la cual se ejemplifica mediante una instancia tipo.

5.1 Instancia base y estructura de la hoja de cálculo

Como punto de partida para la construcción y evaluación de los modelos propuestos, se construyeron instancias de prueba teniendo en cuenta los parámetros de los mismos, en primer lugar en formato de texto siguiendo la sintaxis de archivo de datos “.dat” para modelos de programación matemática escritos en el lenguaje *MathProg*, el cual es un subconjunto del *AMPL*. Se realizaron pruebas en el software *GLPK* (Gnu Linear Programming Kit), interface *GUSEK*, obteniendo resultados para la primera etapa del modelo. La segunda etapa no se pudo resolver satisfactoriamente con este software debido a su mayor complejidad, teniendo que migrar a un software de mayor capacidad.

Posteriormente, tras descartar el uso del software *GLPK* especialmente para el modelo propuesto para la segunda fase. Se evaluó y se adoptó el uso del software de optimización *Gurobi 6.5.1*, haciendo uso del lenguaje de programación *Python*.

Dada la posibilidad de leer los datos a partir de un archivo en formato de hoja de cálculo, se construyeron instancias de prueba en archivos de formato “.xls”. Los datos fueron organizados de acuerdo con sus características en las diferentes hojas

Tabla 5.1: Información requerida para los modelos presentados

Grupo de datos	Modelo de planeación de la producción	Modelo de ruteo de vehículos	Modelos de integrado
General	✓	✓	✓
Instalaciones	✓	✓	✓
Productos	✓	✓	✓
Productos e Instalaciones	✓	✓	✓
Producción	✓		✓
Llegadas programadas	✓		✓
Ventas promedio	✓		✓
Retorno de envases	✓		✓
Demanda	✓	✓	✓
Inventario	✓	✓	✓
Vehículos		✓	✓
Accesibilidad vehículos		✓	✓
Ventanas de tiempo vehículos		✓	✓

Fuente: El autor

que se relacionan en la tabla 5.1, en dicha tabla se indica además que modelo hace uso de cada grupo de datos.

La decisión de utilizar el formato de hoja de cálculo de excel obedeció a la facilidad para clasificar y ordenar los datos, y a la posibilidad de acceder a la información almacenada en este mediante el empleo del paquete *xlrd*, el cual es una herramienta desarrollada en *Python* para leer los valores almacenados en este tipo de formato.

En primer lugar se construyó una hoja de cálculo con los datos para la primera etapa del modelo bietapa, y una para la segunda etapa del mismo. Finalmente, tras estandarizar la información de entrada se construyó una única hoja de cálculo que puede alimentar cualquiera de los tres modelos propuestos y que posee la información necesaria para el modelo integrado, la tabla 5.2 presenta un listado de los niveles de la cadena de suministros y la cantidad de instalaciones de cada uno de ellos en el archivo de evaluación.

La información contenida en cada una de las hojas de cálculo del archivo de entrada suministrado en formato “.xls” es la que se relaciona a continuación, y se presenta de forma detallada en el Apéndice A:

General: Información general, costes de carga y descarga, costes por entrega tarde o temprana (ventanas de tiempo flexibles) y cantidad mínima requerida para la entrega directa entre plantas y un cliente determinado.

Nodos: Identificación del nodo, nivel de la cadena de suministros a la que pertenece, coordenadas x e y, límites inferior y superior de las ventanas de tiempo rígidas, días de cobertura para inventario de seguridad, capacidad de almacenamiento en unidades de masa y de volumen, y capacidad de producción, como se observa en la tabla A.1; y los tiempos estimados de transporte entre nodos (para que el material transportado pueda ser usado) se muestran en la tabla A.2.

Productos: Información del producto tal como código, nombre, tipo, masa y volumen, coste de transporte por unidad, coste de déficit, coste de material nuevo (que podrá suplirse con material de retorno), requerimiento de productos (materiales de retorno) para producir una unidad de producto. Tal información se presenta en la tabla A.3.

Asociación de productos a instalaciones: Parámetro binario igual a uno si el producto puede ser fabricado o almacenado en una instalación determinada, como se observa en la tabla A.4.

Información de producción: Tiempos y costes de producción y de preparación para cada uno de los productos en cada instalación. Esta información se presenta en las tablas A.5 y A.6

Producción ya programada: Información de las llegadas de producto previamente programadas, se utiliza para dar continuidad a la función de planeación a lo largo de varios periodos, dicha información se observa en la tabla A.7.

Ventas promedio: Ventas promedio, sirven de referencia para determinar los inventarios de seguridad, ver tabla A.8.

Materiales devueltos: Materiales de retorno devueltos por periodo, por tipo y por cliente, ver tabla A.10.

Demanda: Demanda por productos y por periodos se observan en la tabla A.9.

Inventarios: Niveles iniciales de inventario y costes de mantenimiento por unidad y por periodo, se muestran en la tabla A.11 y la tabla A.12, respectivamente.

Vehículos: Tipo de vehículo, cantidad disponible, capacidad en masa y volumen de transporte por vehículo, coste variable por distancia recorrida, coste fijo por vehículo, y velocidad de operación. Se muestran en la tabla A.13.

Tabla 5.2: Instalaciones en la instancia de evaluación

Nivel	Nodos
I	1 2 3
II	4
III	5 6
IV	7 8
V	9 10 11 12 13 14

Fuente: El autor

Ventanas de tiempo de los vehículos: Límites inferior y superior para las ventanas de tiempo rígidas y suaves, ver tabla A.14

Accesibilidad: Parámetro binario igual a uno si un determinado tipo de vehículo puede acceder a un nodo e igual a cero en caso contrario. Como ejemplo de ello, en la tabla A.15 se observa que los vehículos de mayor tamaño no están en capacidad de acceder a todos los nodos.

Los conjuntos y parámetros correspondientes a cada instancia fueron proporcionados al modelo a través de un programa en *python* que lee el archivo en formato de hoja de cálculo y almacena la información en un objeto de clase *instancia*, que contiene la información necesaria para cada problema. A partir de este se proporciona la información a los diferentes modelos.

5.2 Primera etapa: planeación de la producción

La primera etapa del modelo, *planeación de la producción*, se implementó en primer lugar en el software *GLPK*, haciendo uso de la interfaz gráfica *Gusek*. Se obtuvo resultados consistentes con la naturaleza del problema, aunque con el inconveniente de requerir un tiempo de ejecución alto y de que el formato del archivo de datos no hace que la información sea fácilmente actualizable.

Posteriormente, tras consultar algunos benchmarking de software para el tipo de problemas que se quiere resolver, se optó por el software de optimización *Gurobi 6.5.1*, el cual es un software de optimización de notable desempeño que puede ser utilizado mediante el lenguaje de programación *Python*.

Como resultado de la primera fase el software proporciona los resultados numéricos correspondientes a las variables de decisión en un archivo con extensión “.sol”, cuya estructura es una lista de variables con sus valores asociados. Además, con el propósito de alimentar secuencialmente la información de entrada de la segunda fase, se genera un objeto de *clase solución*.

Teniendo en cuenta la necesidad de una rápida interpretación por el responsable de la toma de decisiones, a partir del *objeto solución* se ha preparado también un informe en formato de hoja de cálculo “.xls” haciendo uso del paquete *xlwt*, que permite generar este tipo de archivos mediante el lenguaje de programación *Python*.

El archivo de hoja de cálculo generado, tras la ejecución de la primera fase, contiene los siguientes informes: *Resumen de resultados, informe de producción, informe de inventarios, informes de distribución de productos y recolección de envases, informe del comportamiento de las plantas por tipo de producto y periodo, informe del comportamiento de los demás nodos por tipo de producto y periodo, e informe de uso de las instalaciones*. Estos informes se observan en la sección B.1 del Apéndice B.

La tabla B.1 presenta el resumen de los resultados, en él se observa un listado de los costes en cada una de las categorías y las estadísticas propias del modelo y de su ejecución.

En la tabla B.2 se presenta el plan de producción indicando la cantidad a producir de cada producto en cada planta y periodo, así como los tiempos a utilizar en ello; y en la tabla B.3 se presentan los inventarios finales de producto y materiales de retorno en cada una de las instalaciones.

La tabla B.4 es una asignación preliminar de los envíos de productos y recogida de materiales de retorno, basada en rutas directas. Esta asignación es reemplazada en la segunda etapa con el modelo de ruteo de vehículos.

Para finalizar, la tabla B.5 y la tabla B.6 presentan el comportamiento de los productos en las plantas y demás nodos en la cadena de suministros; y la tabla B.7 muestra el uso de la capacidad tanto en volúmenes de almacenamiento como de producción.

Algunos de los resultados de las variables de la primera etapa tienen correspondencia con algunos parámetros (requisitos de información), en la ejecución de la segunda. De los resultados del informe de distribución y recogida del modelo de planeación, puede verse que de cada periodo se derivan uno o más modelos correspondientes a la segunda etapa, o de ruteo de vehículos. En cada uno de los periodos, se tienen en cuenta los niveles de la cadena de suministros de menor a mayor, a manera de ejemplo se consideró la cadena que se muestra en la tabla 5.2

5.3 Segunda etapa: ruteo de vehículos

La construcción de las rutas específicas para cada una de las instancias procede tras la ejecución del modelo de ruteo, el cual también se desarrolló utilizando el lenguaje de programación *Python* y el software de optimización *gurobi*. Pero, debido al tamaño y a la estructura del problema, al resolver instancias de un número de nodos considerable el tiempo de ejecución se incrementó de manera exageradamente alta.

En vista de que el tiempo de ejecución resultó ser muy alto, y a que gran parte de dicho tiempo se emplea en encontrar (tratar de encontrar) una solución factible a partir de la cual continúa el proceso de optimización, se adoptaron dos estrategias alternativas: Una heurística constructiva y un algoritmo genético. Con cada una de ellas es posible iniciar la exploración de soluciones en menor tiempo y proporcionar un punto de partida para la búsqueda que realiza el modelo de optimización de Programación entera mixta.

Con la solución obtenida mediante la heurística constructiva o el algoritmo genético se construye un archivo de extensión “.mst” que contiene una lista de variables y sus valores, y que se utiliza como solución inicial al problema de ruteo. La implementación tanto de la heurística como del algoritmo genético reducen el tiempo que tarda el software de optimización en hallar una solución inicial y en consecuencia el tiempo en el cual se consigue una solución razonablemente buena.

Al igual que en la primera etapa se generó un objeto solución que contiene los valores de las variables y a partir de él, se elaboró una hoja de cálculo que contiene los siguientes informes: *Resumen de resultados, rutas de los vehículos y tiempos, entregas y recogidas, resumen por vehículos, e informe de las ventanas de tiempo suaves*. Además, como soporte para la visualización de las rutas generadas mediante la implementación del modelo, se generan informes en formato gráfico en formato “.png” en los cuales se presenta gráficamente la ruta de cada vehículo asignado empleando un color diferente. Tales gráficos se construyen mediante el paquete de software *PIL*, en lenguaje *Python*.

En la sección B.2 del Apéndice B se presentan los resultados de la instancia evaluada, para cada una de las instancias de ruteo generadas. A continuación se presentan los informes generados para la primera instancia.

En la tabla B.8 se presentan los costes de transporte y, las estadísticas del modelo y de su ejecución.

La tabla B.9 presenta un informe de las rutas asignadas a cada uno de los vehículos, especificando inicio, paradas, llegada y tiempos en los cuales visita cada nodo. Además, la figura B.1 muestra gráficamente los recorridos.

Tabla 5.3: Variables de la etapa 1 cuyos valores son parámetros en la etapa 2

Etapa 1: Variables	Etapa 2: Parámetros
$Prdc_{p,i,t}$	
$Inv_{p,i,t}$	$PrDm_{p,j}$
$Df_{p,i,t}$	$GLDm_{p,i}$
$BGl_{p,i,t}$	$PrAv_{p,i}$
$Dl_{p,f,i,t}$	$GLAv_{p,i}$
$Pk_{p,f,i,t}$	

Fuente: El autor

La tabla B.10 presenta el listado de las entregas y recogidas especificando cantidades y tipos de productos por cada vehículo en cada nodo.

La tabla B.11, presenta un resumen de la información asociada al uso de cada vehículo indicando el tipo de vehículo, su identificación, su carga inicial tanto en unidades de masa como de volumen, horas de inicio y fin de recorrido, y la distancia total recorrida.

Finalmente, la tabla B.12 presenta la información asociada a las ventanas de tiempo flexibles.

5.3.1 Articulación de las dos etapas como estrategia de solución

En términos generales, la forma en que se articulan las dos etapas del modelo bietapa se describen en la subsección 3.5.1. En este apartado se presentan las consideraciones tenidas en cuenta a la hora de la implementación y evaluación del modelo prototipo.

Como puede observarse en la tabla 5.3 existe un conjunto de parámetros del modelo de ruteo correspondiente a la segunda etapa cuyos valores provienen de los resultados del modelo de planeación de la primera etapa, los cuales, si bien no tienen correspondencia directa, pueden calcularse mediante las relaciones existentes entre ellos.

El primer modelo responde al qué y cuándo producir y almacenar, y el segundo al cómo hacer el traslado de los respectivos productos a lo largo de la cadena de suministros. Bajo esa premisa la articulación de las dos etapas que se propone es la siguiente:

1. Ejecutar el primer modelo en cuyo caso se tienen periodo a periodo los volúmenes de producción, inventario y déficit en cada uno de los nodos bajo el supuesto simplificado de entregas directas.

2. Incorporar como parámetros del segundo modelo las variables asociadas a las entregas y recogidas de productos y materiales de retorno desde y hasta los diferentes nodos de la cadena de suministros.
3. Ejecutar los modelos correspondientes a la segunda etapa (uno por subproblema), dado que pueden presentarse varios subproblemas para un periodo determinado.

Desde el punto de vista de la logística directa y teniendo en cuenta la cadena de suministros objeto de estudio, puede observarse que la disponibilidad de producto terminado en cada una de las plantas, en cada periodo, para cada producto, es igual a la suma del inventario inicial (o del inventario del periodo anterior) y la producción de ese producto en las instalaciones objeto de análisis.

Además, si se tiene en cuenta que el modelo de ruteo no incorpora las variables de inventarios y que las entregas y recogidas de producto en la etapa uno satisfacen los requerimientos de la red de suministros, se puede asumir que:

- En cada uno de los subproblemas generados, de conformidad con el procedimiento establecido en la subsección 3.5.1, existen dos tipos de nodos bien diferenciados: Orígenes (*Orig*) y destinos (*Dest*), los primeros son emisores de producto final y receptores de materiales de retorno, y los segundos consumidores de producto final y emisores de materiales de retorno.
- Los flujos de productos y materiales de retorno proporcionados por la primera etapa del modelo, determinan lo realmente disponible y lo que realmente se demanda en cada uno de los nodos.
- Al totalizar lo enviado desde cada nodo y lo recibido en él, pueden determinarse los parámetros requeridos en cada una de las instancias. Cada instancia tiene sus orígenes y sus destinos en un periodo de tiempo dado t , por lo cual tales parámetros puede calcularse como se muestra en ecuación 5.1, ecuación 5.2, ecuación 5.3 y ecuación 5.4.

$$PrAv_{p,f,t} = \sum_{i \in Dest} Dl_{p,f,i,t}, \quad \forall p \in Prdt, \forall f \in Orig \quad (5.1)$$

$$GLAv_{p,i,t} = \sum_{f \in Orig} Pk_{p,f,i,t}, \quad \forall p \in EBo, \forall i \in Dest \quad (5.2)$$

$$PrDm_{p,j,t} = \sum_{i \in Orig} Dl_{p,f,i,t}, \quad \forall p \in Prdt, \forall f \in Dest \quad (5.3)$$

$$GLDm_{p,f,t} = \sum_{i \in Dest} Pk_{p,f,i,t}, \quad \forall p \in EBo, \forall f \in Orig \quad (5.4)$$

Las instancias correspondientes a la segunda fase se resuelven secuencialmente, de acuerdo con el modelo de ruteo establecido en la sección 3.7.

5.3.2 Heurística constructiva para solucionar el Modelo VRP enriquecido

Para reducir el tiempo que tarda el software en obtener una solución factible (asignación de vehículos y determinación de sus respectivas rutas de recogida y entrega) fue preciso implementar una heurística constructiva, a partir de la flota disponible y de acuerdo con reglas básicas de ruteo.

En dicha heurística, tanto la asignación de los vehículos como la elección del destino inmediato se realizan de manera aleatoria, pero de conformidad con un conjunto de reglas que garantizan el cumplimiento de las restricciones. Para cada asignación de vehículos y rutas se hace la evaluación de su coste total como medida de desempeño.

Posteriormente, se implementa un proceso aleatorio de búsqueda de mejores soluciones mediante la ejecución de un número grande de iteraciones y la selección del conjunto de rutas y vehículos de mejor desempeño; a partir de esta “mejor solución” se generan los archivos con extensión “.mst” que proporcionarán una solución factible para el problema representado por el modelo en *gurobi*.

La heurística constructiva implementada en *Python* opera mediante las siguientes funciones:

Construir conjunto de rutas: Construye un conjunto de rutas factible, empezando por rutas de logística hacia adelante (y recogida si procede), determina los vehículos usados y calcula el coste total de la respectiva asignación de vehículos y rutas.

Construir rutas de logística hacia adelante e inversa: El proceso de construcción de rutas se presenta en la figura 5.1, empezando por inicializar la información correspondiente a los parámetros disponibilidad, demanda, plantas, clientes y flota de vehículos disponible (inicialmente todos los vehículos), teniendo en cuenta las siguientes directrices.

- Ejecuta un ciclo en el cual incluyen sucesivamente rutas de vehículos mientras haya demanda sin satisfacer.
- La generación de una ruta empieza con la selección aleatoria de una planta que tenga productos disponibles, la cual inicia el vector correspondiente a la ruta, se asigna aleatoriamente un vehículo a la planta en mención, se inicializan los tiempos para la ruta (Inicio, hora de salida, tiempo de tardanza o de prontitud y hora de regreso al nodo inicial, si fuese el siguiente nodo visitado).

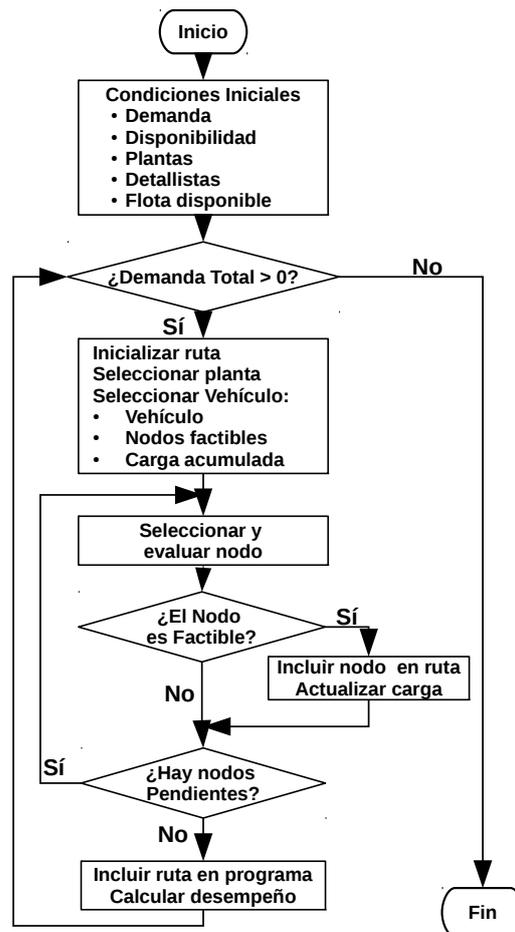


Figura 5.1: Algoritmo para la construcción de rutas

- Mientras existan nodos con demanda pendiente se evalúa la posibilidad de incluirlos en la ruta (para incluirlos se verifica que el vehículo cumpla las restricciones de capacidad y de ventanas de tiempo rígidas), si se incluye el nodo actualiza la ruta colocando el nodo al final, de no poder anexar ningún nodo a la ruta, adiciona a la ruta el nodo ficticio correspondiente al inicial.
- Si la longitud de la ruta es mayor a dos (visita al menos un nodo diferente al inicial), se incluye en el diccionario de rutas, de lo contrario se prueba otra asignación aleatoria.
- Cada que se genera una ruta se actualiza la demanda, la disponibilidad de productos y de vehículos.

Construir rutas de logística inversa: Funciona de manera similar a la anterior, sólo que el procedimiento presentado en la figura 5.1 inicia con las plantas que requieren materiales de retorno para ser procesados y las visitas se realizan únicamente para recoger tales materiales de los nodos en que se encuentran disponibles. Se ejecuta al final, pues es para satisfacer aquellas demandas de transporte de materiales de retorno que no pueden proveerse con las rutas mixtas.

Tras la generación de las rutas, se construyen dos archivos con extensión “.mst”, el primero contiene las rutas a través de las variables $Use_{i,k}$ y $Arc_{i,j,k}$ asociadas a la asignación de los vehículos y las rutas generadas; y el segundo la asignación de las cantidades a transportar en uno y otro sentido, con las variables $Dl_{p,f,i,k}$ y $Pk_{p,f,i,k}$, que corresponden a las entregas (recogidas) de producto (material de retorno) p desde (hacia) la planta f y hacia (desde) el cliente i haciendo uso del vehículo k . Tales archivos constituyen una solución factible para el problema.

5.3.3 Algoritmo genético para solucionar el Modelo VRP enriquecido

Se implementó un algoritmo genético para resolver el problema de ruteo de vehículos de múltiples plantas empleando la librería *pyevolve*, la cual proporciona una buena solución en un tiempo razonable. El funcionamiento del algoritmo genético se presenta en la figura 5.2. Los parámetros del algoritmo genético tales como el número de generaciones, las probabilidades de cruce y de mutación, y el tamaño de la población fueron establecidos mediante ensayo y error.

El cromosoma utilizado es de tipo *lista* de una dimensión, el cual genera una permutación de enteros en un rango definido, para cada cromosoma se hace una evaluación de la función objetivo, en este caso la función utilizada es el *Costo de ruta*, la cual se explica más adelante.

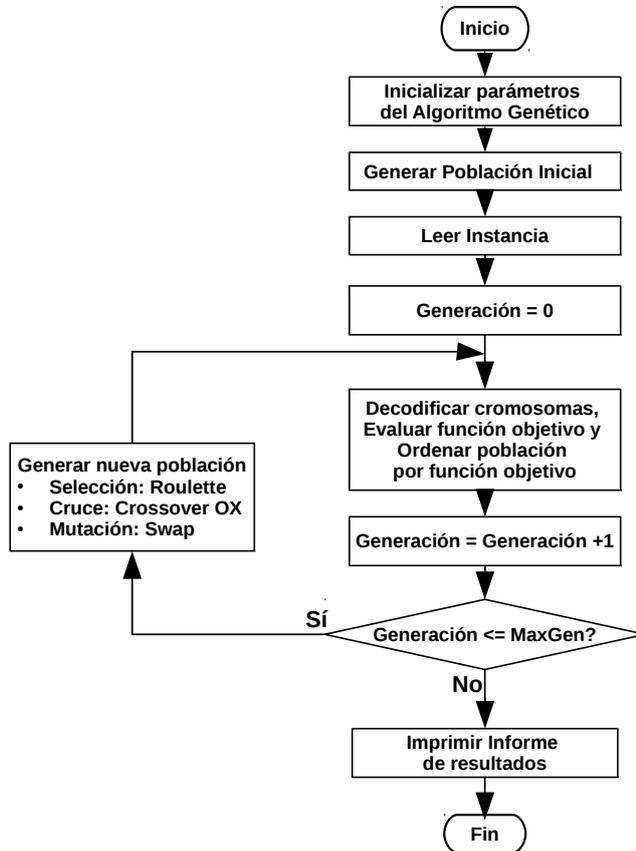


Figura 5.2: Algoritmo genético para la construcción de rutas

Los operadores de cruce empleados fueron del tipo *Edge* y *Crossover OX*, ampliamente utilizados para el problema TSP, para la selección se utilizó un operador de tipo ruleta en el cual los mejores desempeños en la función de adaptación presentan la mayor probabilidad de ser seleccionados.

Como resultado adicional, tras la ejecución del algoritmo genético se genera como resultado una representación de las rutas en un plano en formato “.png” para facilitar la visualización y la toma de decisiones.

Decodificación del cromosoma

Se implementó una rutina para *traducir* el genoma, definido como una permutación de enteros en un conjunto de rutas con sus respectivos vehículos asociados, la cual consiste en:

- Dado que los vehículos se identifican mediante enteros consecutivos, se extraen del cromosoma los valores correspondientes a los vehículos, en el mismo orden en que aparecen
- Se asignan las plantas a los vehículos de manera sucesiva, hasta asignar a todos los vehículos una planta.
- Los clientes se asignan a partir del cromosoma restante como el residuo resultante de dividir el número entero del vector individuo entre el total de nodos (plantas más clientes) más uno.

Como resultado se tiene un arreglo, tipo tupla, de tres listas así: ([Vehículos], [Plantas], [Clientes]). Después, por medio de una función se crean las rutas asociadas al individuo y se evalúa la función de adaptación (*RouteCreationAndEvaluation*).

A manera de ejemplo, se presenta una permutación de 81 enteros para un problema de cinco plantas y seis detallistas, en ella se resaltan en negrita los valores asociados a los vehículos.

Permutación: [39, **21**, **15**, 37, **17**, 56, 25, **12**, 75, 61, 41, 69, 79, 27, **14**, 80, 44, 22, 53, 76, 74, 34, 57, 46, 52, 42, **10**, 60, **3**, 30, **1**, 49, 51, **13**, 48, 66, **16**, 63, 70, 28, 81, 71, 72, 68, 26, **8**, 38, **11**, **4**, 62, 31, 59, **6**, 54, 24, 45, 35, **18**, **9**, 40, 43, 58, **2**, **20**, 47, 73, 32, 77, 65, 67, **5**, 23, 29, 78, 36, **19**, 64, 50, 55, 33, 7]

Tras extraer los vehículos en su orden de aparición, asignar las plantas y los valores de los nodos a visitar en los recorridos se tiene el cromosoma que se muestra a continuación:

Cromosoma: ([21, 15, 17, 12, 14, 10, 3, 1, 13, 16, 8, 11, 4, 6, 18, 9, 2, 20, 5, 19, 7], [1, 2, 3, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1, 2, 3, 5, 6, 1], [11, 9, 10, 9, 11, 9, 13, 11, 9, 11, 10, 10, 12, 13, 12, 10, 12, 11, 12, 12, 8, 8, 8, 9, 11, 8, 8, 11, 12, 12, 11, 13, 8, 10, 10, 10, 10, 9, 13, 8, 8, 11, 13, 12, 9, 12, 13, 9, 10, 13, 13, 9, 13, 13, 8, 8, 12, 10, 9, 11])

Finalmente, aplicando el procedimiento que se muestra en la figura 5.3, se obtiene el diccionario de rutas que se muestra seguidamente, en este caso la llave es el vehículo asignado y el vector asociado la ruta que debe realizar. En tal procedimiento la demanda total que se usa para condicionar el ciclo se refiere a la demanda de productos por los detallistas y la demanda de materiales de retorno por las plantas. La construcción de rutas inicia con las rutas mixtas (entrega y recogida) y, de no

satisfacerse la demanda de materiales de retorno, continua con rutas de recogida únicamente.

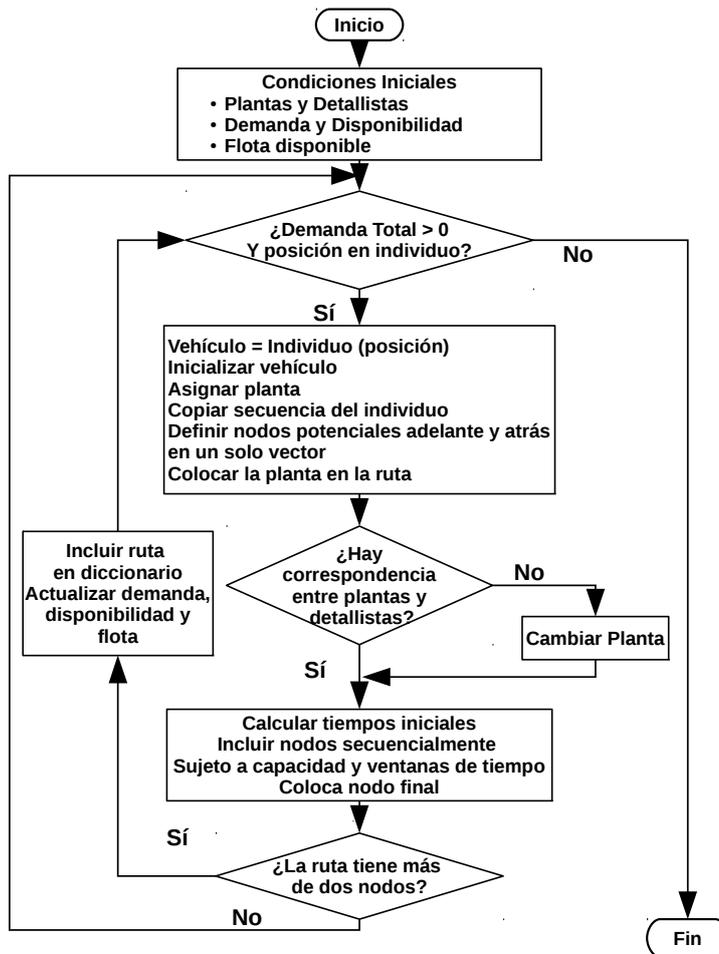


Figura 5.3: Decodificado del cromosoma para la construcción de las rutas

Rutas basadas en el cromosoma de ejemplo:

- 21 [1, 11, 9, 1001]
- 15 [2, 11, 9, 1002]
- 17 [3, 12, 1003]
- 12 [5, 10, 1005]
- 14 [6, 12, 1006]

1 [3, 10, 1003]

16 [1, 9, 1001]

Función de adaptación

La función de adaptación o función objetivo es minimizar el coste total del conjunto de rutas asociadas a la solución del problema. Esta función tiene en cuenta los costes asociados a la asignación de los vehículos, los costes asociados al transporte a lo largo de los diferentes arcos de la red, los costes de carga y descarga y los costes asociados a las ventanas de tiempo.

5.4 Software utilizado

En esta sección se presenta una breve descripción de las diferentes herramientas informáticas utilizadas en la construcción de los modelos propuestos.

5.4.1 GNU Linear Programming Kit GLPK e interfaz de usuario Gusek

El software *GLPK* es un software libre de programación lineal que hace uso del lenguaje de modelamiento GNU *MathProg*, el cual es un lenguaje de modelización para describir modelos de programación lineal y programación lineal entera (subconjunto del lenguaje *AMPL*).

Los modelos que se describen usando el lenguaje GNU *MathProg* constan de un conjunto de instrucciones y bloques de datos construidos por el usuario a partir de los elementos del lenguaje. Un programa conocido como traductor de modelos analiza la descripción y la convierte en estructuras de datos que se pueden usar para construir instancias de problemas de programación matemática o de manera directa para obtener la respuesta numérica del problema.

Con *MathProg* el modelo debe ser descrito en términos de *conjuntos*, *parámetros*, *variables*, *restricciones* y *objetivos*, que son conocidos como los *objetos del modelo*.

El usuario incluye objetos particulares del modelo por medio de un lenguaje de instrucciones, cada objeto del modelo se identifica con un nombre simbólico único que tiene un propósito referencial. Los *objetos del modelo*, incluidos los conjuntos, pueden ser arreglos multidimensionales construidos sobre conjuntos indexados (Makhorin, 2013).

La construcción preliminar de los modelos en el lenguaje *MathProg* fue realizada haciendo uso del software *GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit)* el cual es una interfaz que permite una fácil interacción con el mismo (Bettoni, 2010).

5.4.2 Gurobi

El Software de optimización *Gurobi* es usado por cerca de 700 empresas en cerca de dos docenas de industrias para convertir los datos en decisiones más inteligentes. Este software permite expresar los problemas de negocios en forma de los modelos matemáticos, y luego considera automáticamente miles de millones o incluso billones de posibles soluciones para encontrar la mejor. El solucionador puede ser utilizado como un asistente de toma de decisiones, para ayudar a guiar las decisiones de un experto cualificado, o como una herramienta totalmente automatizada para tomar decisiones sin intervención humana (Gurobi Optimization, 2014).

Gurobi ha sido utilizado para producir mejoras medibles en funciones de negocio de alto valor, que incluyen la producción, distribución, compras, finanzas, inversiones de capital y recursos humanos, etc. Es un software robusto y escalable, capaz de resolver los problemas que afectan a millones de variables de decisión.

Reconocido como el solucionador de vanguardia para la programación matemática, *Gurobi 6.0* fue diseñado para aprovechar las arquitecturas modernas y procesadores multi-núcleo, utilizando las últimas implementaciones de los últimos algoritmos. Lo cual permite a los usuarios una mayor flexibilidad en la forma en que modelan sus problemas, y aumenta su capacidad de añadir más complejidad a sus modelos con el fin de representar mejor los problemas del mundo real que están resolviendo.

El software de optimización *Gurobi* posee solucionadores para:

- Programación lineal (LP, del inglés *Linear Programming*)
- Programación lineal entera mixta (MILP, del inglés *Mixed Integer Linear Programming*)
- Programación cuadrática entera mixta (MIQP, del inglés *Mixed Integer Quadratic Programming*)
- Programación cuadrática (QP, del inglés *Quadratic Programming*)
- Programación cuadrática restringida (QCP, del inglés *Quadratic Constrained Programming*)
- Programación cuadrática entera mixta restringida (MIQCP, del inglés *Mixed Integer Quadratic Constrained Programming*)

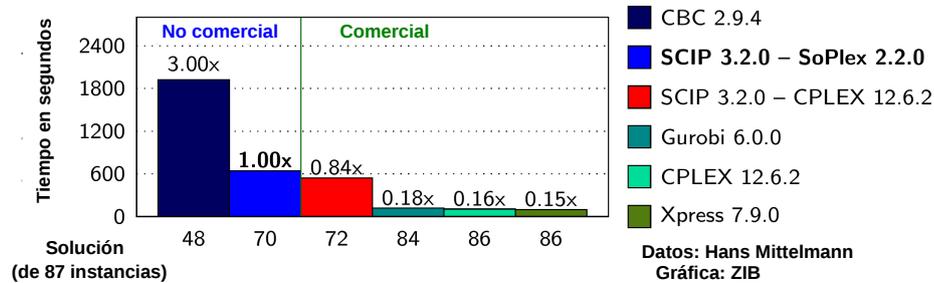


Figura 5.4: Benchmarking de software de optimización

Esto es posible, en parte, porque no dependen del código heredado, y han construido cada uno de sus solucionadores desde cero utilizando los últimos avances algorítmicos y técnicas de aplicación. No hay límite de tamaño fijo.

Además, este software de optimización posee soportes para diferentes lenguajes de programación y modelizado:

- Interfaces orientadas a objetos de *C++*, *Java*, *.NET* y *Python*
- Interfaces de Matrix orientada para *C*, *MATLAB®* y *R*
- Enlaces a lenguajes de modelado estándar: *AIMMS*, *AMPL*, *GAMS* y *MPL*
- Enlaces a *Excel* a través de las plataformas *Premium Solver* y *Risk Solver*

La interfaz interactiva de *Gurobi* se basa en la *Application Programming Interface* (API) *Python* orientada a objetos, que le brinda la capacidad de utilizarla para facilitar el acceso para ejecutar y probar modelos, o como un entorno de desarrollo para construir modelos complejos y luego la transición estos modelos a aplicaciones. El lenguaje de programación *Python* ofrece una amplia gama de bibliotecas preconstruidos para soportar el desarrollo de aplicaciones, incluyendo capacidades de acceso de datos excepcional (Gurobi Optimization, 2014).

Gurobi es una gran alternativa que junto con *CPLEX* y *XPRESS* se disputa el liderazgo en desempeño y aventaja a los software libres de optimización como puede verse en el estudio realizado por Koch y cols. (2011) el cual se actualiza en Mittelmann (s.f.), cuya gráfica se presenta en la figura 5.4, (*SCIP*, s.f.).

La facilidad para la modelización y el desarrollo de prototipos y aplicaciones, haciendo uso del lenguaje de programación *Python*, es una de sus grandes venta-

jas. Las librerías preincorporadas de *Python* apoyan el desarrollo de aplicaciones, permitiendo ahorrar tiempo y esfuerzo en un único entorno integrado para el modelado.

5.4.3 Lenguaje de programación Python

Python es un lenguaje de programación potente y fácil de aprender. *Python* tiene unas estructuras de datos eficientes de alto nivel y un enfoque simple y efectivo de programación orientada a objetos. Su sintaxis elegante y su naturaleza interpretada, lo hacen ideal para un rápido desarrollo en muchas áreas, sobre muchas plataformas, debido a que los desarrolladores pueden usar menos líneas de código para expresar un concepto, de lo que podrían hacerlo en otros lenguajes (Foundation, 2015).

Por otro lado, *Python* ofrece mucho más chequeo de error que *C*, y siendo un lenguaje de muy alto nivel, tiene tipos de datos de alto nivel incorporados como arreglos de tamaño flexible y diccionarios. *Python* permite separar los programas en módulos que pueden reusarse en otros programas en *Python*, viene con una gran colección de módulos estándar que pueden ser usados como base de los propios programas. Algunos de estos módulos proveen funcionalidades como entrada/salida a archivos, llamadas al sistema, sockets, e incluso interfaces a sistemas de interfaz gráfica de usuario (Downey, Elkner, Meyers, Becerra Sandoval, y Pontificia Universidad Javeriana (Cali)., 2009; Foundation, 2015).

Python es un lenguaje interpretado, lo cual permite ahorrar tiempo durante el desarrollo ya que no es necesario compilar ni enlazar. El intérprete puede usarse interactivamente, lo que facilita experimentar con características del lenguaje, escribir programas descartables, o probar funciones cuando se hace desarrollo de programas de abajo hacia arriba. *Python* permite escribir programas compactos y legibles, típicamente más cortos que sus programas equivalentes en *C*, *C++* o *Java* por varios motivos:

- Los tipos de datos de alto nivel permiten expresar operaciones complejas en una sola instrucción.
- La agrupación de instrucciones se hace por sangría en vez de llaves de apertura y cierre.
- No es necesario declarar variables ni argumentos.

Para el propósito particular de esta tesis, se hizo uso de aplicaciones como *xlrd* que se usa para leer datos desde un archivo de hoja de cálculo, en el caso de los parámetros de entrada de los modelos; y *xlwt* para crear nuevas hojas de cálculo, cuando de generar informes de resultados se trata. Además, se utilizó la librería *PIL* para la generación de informes gráficos en formato “.png”.

5.4.4 Pyevolve

Pyevolve es una librería para computación evolutiva escrita en *Python*. Fue creada dada la fortaleza de *Python* como lenguaje de programación y su potencial para el desarrollo de algoritmos evolutivos. La librería *Pyevolve* viene a llenar un vacío existente en algoritmos genéticos bajo lenguaje de programación *Python*, teniendo en cuenta la creciente importancia de este tipo de herramientas de optimización.

Los principales objetivos de *Pyevolve* son contar con una librería escrita en *Python* puro para maximizar el aspecto multiplataforma, fácil de usar para el usuario final, en la que el usuario pueda ver las estadísticas de evolución de manera gráfica e interactuar con ellas de ser necesario. La interfaz de programación de aplicaciones API debe ser extensible de modo que el usuario pueda crear nuevas formas de representación, operadores tanto de cruce y mutación como de selección, etc, se caracteriza por un desempeño ágil cuyo diseño puede ser optimizado.

Pyevolve implementa las características más comunes como son los procedimientos de selección por ruleta, torneo, ranking, etc. Esquemas de escalamiento como escalamiento lineal, etc. Posee parámetros por defecto, operadores por defecto y valores para todas las opciones. *Pyevolve* es de código abierto (*open source*) (Perone, 2010).

5.5 Conclusiones

- El modelo de programación lineal entera mixta utilizado en la primera etapa funciona adecuadamente tanto en el software *GLPK* como en el software *Gurobi*, sin embargo es más eficiente la implementación en *Gurobi* debido a que la lectura de los datos se hace a partir de un formato de hoja de cálculo y a que el software de optimización es más robusto.
- Se generan informes apropiados para asistir la toma de decisiones, los cuales se caracterizan por la facilidad en la presentación de la información.
- Se construyeron aplicaciones apropiadas para llevar la información de las variables de la primera fase que sirven de parámetros a las instancias correspondientes a la segunda fase, a partir de los materiales transportados entre los nodos.
- El modelo de ruteo de vehículos que en una segunda etapa, realiza la asignación detallada de los vehículos, recorridos y volúmenes a transportar resultó ser muy ineficiente al ser realizado en el software *GLPK* por lo cual tuvo que migrarse a *gurobi*.
- Si bien la implementación del modelo correspondiente a la segunda etapa es más eficiente en *gurobi*, el tiempo requerido para generar una solución

básica factible para el problema es considerablemente alto. Por tal motivo fue necesario implementar una heurística constructiva y un algoritmo genético para generar soluciones factibles al problema de ruteo.

- Una vez resuelto el problema de la segunda fase se generaron informes apropiados para facilitar la interpretación de los resultados.
- Se hizo uso de software de programación de alto nivel junto con librerías apropiadas para la lectura y escritura de archivos de hoja de cálculo, y para la construcción de la heurística constructiva y el algoritmo genético, además del software de optimización *Gurobi*.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de esta tesis se ha trabajado respecto a dos conceptos fundamentales: la logística inversa, como forma de dar una segunda oportunidad a los materiales y contribuir a la construcción de un medio ambiente sano, y la integración de la gestión de la producción con la gestión de la logística de una compañía de producción que emplea materiales de retorno como entrada para realizar su proceso. En este capítulo se presentan unas reflexiones a modo de conclusiones y se identifican algunas líneas de trabajo que dan continuidad a lo aquí expuesto.

6.1 Conclusiones

A lo largo de la investigación desarrollada con el objetivo de: *Desarrollar un modelo para la toma de decisiones relacionadas con la planeación de la producción y de la logística directa (de distribución) e inversa para una cadena de suministros cuyo abastecimiento depende parcialmente de los retornos, haciendo uso de técnicas de optimización propias de la investigación de operaciones*, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Es posible modelizar sistemas logísticos complejos haciendo uso de la programación matemática, más concretamente de la programación lineal entera mixta, como una alternativa para la toma de decisiones.
- La integración de la gestión de la producción y la gestión de la logística tanto directa como inversa implican gran variedad de particularidades y condicionamientos. Estas características hacen de ella un área de investigación de especial interés, que en un ambiente multiplanta, multiproducto con flota

heterogénea de vehículos como el que se analiza requieren la inclusión de un número considerable de variables binarias, aún en pequeñas instancias.

- La integración desarrollada en dos etapas: una primera que incluye la planificación de la producción, los inventarios y una primera aproximación a las rutas de distribución en la que se determina que eslabón de la cadena de suministros debe enviar los productos al eslabón siguiente; y una segunda que implica el ruteo específico de los vehículos, con la posibilidad de visitar más de un nodo por ruta y de que un nodo sea visitado por más de un vehículo, permite encontrar soluciones acordes con la naturaleza del problema estudiado en un tiempo razonablemente menor al empleado al realizar un solo modelo que integra todas las decisiones.
- Debido a las características del software empleado para enfrentar el problema, lenguaje de programación Python y software de optimización Gurobi, fue posible mejorar el desempeño del modelo de ruteo con la implementación de una heurística constructiva y de un proceso iterativo de búsqueda que permitió crear una solución inicial previa a la ejecución del modelo de programación matemática. Esta implantación permitió reducir el tiempo de ejecución alcanzando valores razonablemente buenos.
- Además, la implementación de metaheurísticas como lo es el algoritmo genético construido en el software pyevolve, lenguaje de programación Python, permiten o bien reducir el tiempo de ejecución al proporcionar una solución inicial o bien una buena respuesta en un tiempo razonable. El algoritmo genético se implementó teniendo como función de desempeño el coste total.
- La formulación que integra toda la cadena de suministros en un único modelo de programación lineal entera, demanda un tiempo de ejecución que resulta exagerado para su aplicación práctica, pero que puede ser objeto de mejoramiento a partir de las técnicas aquí esbozadas.

Como resultados de la presente tesis se derivan los siguientes artículos:

Artículo presentado en congreso:

- Parra Peña, J., Vicens Salort, Eduardo, Ortiz Bas, Ángel, 2013. A model for coordination of production planning, forward and reverse logistics management in a multi-product and multi-plant environment, with reusable bottles constraints, in: Industrial Engineering and Complexity Management. Presented at the 7th International Conference On Industrial Engineering And Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización (CIO), y XIX International Conference On Industrial Engineering And Operations Management (ICIEOM), Valladolid.

Artículos por publicar:

- Parra Peña, J., Vicens Salort, Eduardo, Ortiz Bas, Ángel., A model for coordination of production planning, forward and reverse logistics management in a multi-product and multi-plant environment, with reusable materials constraints
- Parra Peña, J., Vicens Salort, Eduardo, Ortiz Bas, Ángel., A model for vehicle routing problem with pickup and delivery with time windows for an environment multi-plant, multi-commodity using a heterogeneous vehicle fleet
- Parra Peña, J., Vicens Salort, Eduardo, Ortiz Bas, Ángel., A genetic algorithm for vehicle routing problem with pickup and delivery with time windows for an environment multi-plant, multi-commodity using heterogeneous vehicle fleet

6.2 Trabajo futuro

La construcción de conocimiento en la gestión integrada de la producción y de la logística directa e inversa tiene gran potencial, y de acuerdo con el trabajo realizado en esta tesis, es posible manifestar que existen oportunidades de mejora y por ende de desarrollo de investigación futura, entre otros en los siguientes aspectos:

- Es importante trabajar en alternativas que permitan reducir los tiempos de ejecución de modo que puedan implementarse soluciones integradas para toda la cadena de suministros, se vislumbra como una línea de trabajo futuro el diseño de metodologías que a partir de la combinación de estrategias de optimización como las heurísticas y los métodos de optimización clásicos permitan obtener soluciones aceptables en un tiempo apropiado a la naturaleza de las decisiones para las cuales son construidos.
- Otro aspecto de importancia es la incorporación de nuevas restricciones como son la posibilidad de que un vehículo realice más de un viaje por periodo, con los consecuentes beneficios que pueda implicar en términos de reducción de coste, o la posibilidad de asignar vehículos para rutas o distancias mayores en las que se comprometa más de un periodo de trabajo.
- Es conveniente en un futuro incluir otras restricciones asociadas con los tiempos de descanso de un trabajador dentro de la jornada, pues de momento se encuentran incorporados a los tiempos de servicio prestado por el personal y no se puede ejercer un control puntual de los mismos.

- Interconexión de la gestión de rutas aquí presentada (basada en distancias) con software de carácter geográfico, que permita una mejor determinación de los tiempos de desplazamiento entre nodos.
- Incorporación de comportamientos estocásticos en la modelización para responder de manera más confiable a los problemas del sistema que se analiza.
- A pesar de que la alimentación de los datos se hace usando un formato estándar en un libro de excel (extensión .xls) resulta conveniente la evaluación de otras alternativas de alimentación de la información como son los formatos de base de datos, los cuales son de común aplicación en las instalaciones industriales.

Apéndice A

Datos instancia de evaluación

En el presente apéndice se presenta la información utilizada en la instancia de prueba, teniendo en cuenta la estructura de tablas del archivo de hoja de cálculo mencionada en la sección 5.1, a partir del cual se alimentan los diferentes modelos. La información que se presenta corresponde esencialmente a las instalaciones, productos y vehículos que interactúan en una empresa productora de bebidas embotelladas.

La instancia utilizada para evaluar el modelo bietapa se caracteriza por estar compuesta por catorce nodos distribuidos así: tres plantas de producción (PLN), un centro logístico (DSL), dos almacenes reguladores (SCR), dos distribuidores (DTB) y seis detallistas (CST).

Además se trata de una Cadena de suministros en la cual se considera la existencia de seis productos así: dos productos que incluyen materiales de retorno (RB), dos productos que no incluyen materiales de retorno (NR) y dos materiales de retorno (GC).

A.1 Información asociada a las instalaciones

La información asociada a las diferentes instalaciones que hacen parte de la cadena de suministros se observan en la tabla A.1, en la cual se presentan entre otros la localización, el rol dentro de la cadena, el nivel al que pertenece, los límites de las ventanas de tiempo asociadas y las capacidades. Además, en la tabla A.2 se presentan los tiempos de transporte tras los cuales puede contarse con un producto que proviene de otro eslabón dentro de la cadena de suministros.

Tabla A.1: Información de las Instalaciones

Id	Tipo	Nivel	Coord	Coord	Lim	Lim	Tiempo	Lim	Lim	Días	Cap	Cap	Cap
No-	No-	CdS	X	Y	Inf	Sup	Car-	Inf	Sup	cob	Ma-	Vol	Prdc
do	do				TW	TW	ga	TWS	TWS		sa		
1	PLN	1	520	640	29	1488	35	347	430	7	9000	9000	5000
2	PLN	1	490	490	2	1509	31	99	423	7	11000	11000	5000
3	PLN	1	500	250	17	1508	40	137	329	7	7000	7000	5000
4	DSL	2	200	260	13	1493	27	111	250	7	11000	11000	
5	SCR	3	400	300	2	1486	39	15	22	14	48000	120000	
6	SCR	3	210	470	10	1492	29	155	387	14	18000	54000	
7	DTB	4	170	630	2	1508	34	142	165	14	21000	21000	
8	DTB	4	310	620	22	1488	26	312	404	14	13000	13000	
9	CST	5	520	330	7	1494	22	249	481	7	13000	13000	
10	CST	5	510	210	2	1486	39	15	22	7	9000	9000	
11	CST	5	420	410	10	1492	29	155	387	7	9000	9000	
12	CST	5	310	320	2	1508	34	142	165	7	11000	11000	
13	CST	5	370	520	22	1488	26	312	404	7	9000	9000	
14	CST	5	450	390	7	1494	22	249	481	7	16000	16000	

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.2: Lead Time de transporte

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
5	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

A.2 Información relacionada con los productos

Las características más representativas de los productos se presentan en la tabla A.3, estas son: Identificación, tipo de producto, masa y volumen, costes de transporte por distancia (para la primera etapa del modelo), coste de déficit o de compra (si se trata de materiales que deben comprarse ante la insuficiencia de los materiales de retorno) y, la estructura de los productos.

Tabla A.3: Información de los Productos

Id	Prd	Tipo Prd	Masa	Vol	Coste Dist	Coste Déf	Coste mat	A	C	B	E	D	F
A	RT1	RB	1.0	1.0	0.016	1000	0	0	0	0	0	0	0
B	RT2	RB	1.0	1.0	0.014	1000	0	0	0	0	0	0	0
C	NR1	NR	1.0	1.0	0.015	1000	0	0	0	0	0	0	0
D	A1	NR	1.0	1.0	0.015	1000	0	0	0	0	0	0	0
E	B1	GC	0.4	1.0	0.012	0	45	1	0	0	0	0	0
F	B2	GC	0.3	1.0	0.012	0	50	0	1	0	0	0	0

Fuente: Resultados del modelo.

Además de la información relacionada con instalaciones y productos, la tabla A.4 presenta un parámetro binario igual a uno si un producto puede ser producido, almacenado o distribuido en un determinado nodo, y cero de lo contrario.

Tabla A.4: Productos en instalaciones

Id Prod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
C	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
B	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
E	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
D	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
F	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fuente: Resultados del modelo.

A.3 Información relacionada con la producción

La tabla A.5 y la tabla A.6 presentan los tiempos y costes de producción y de preparación en las plantas de fabricación.

Tabla A.5: Tiempos de procesamiento

Plants→	Tiempos de Producción			Tiempos de Preparación		
	1	2	3	1	2	3
RT1	0.15	0.25	0.0	120.0	150.0	0.0
NR1	0.15	0.25	0.0	180.0	150.0	0.0
RT2	0.2	0.3	0.0	120.0	150.0	0.0
B1	0.1	0.05	0.0	8.0	5.0	0.0
A1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	20.0
B2	0.1	0.05	0.0	12.0	8.0	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.6: Costes de procesamiento

Plants→	Costes de Producción			Costes de Preparación		
	1	2	3	1	2	3
RT1	0.5	0.4	0.0	2400.0	2500.0	0.0
NR1	0.3	0.3	0.0	1500.0	1800.0	0.0
RT2	0.4	0.6	0.0	3900.0	3000.0	0.0
B1	0.05	0.01	0.0	1000.0	1000.0	0.0
A1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	2000.0
B2	0.05	0.02	0.0	1500.0	1000.0	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

A.4 Información de planes de producción y o distribución previos

Con el fin de facilitar la articulación de los planes de producción para diferentes periodos, la tabla A.7 contiene los datos de los movimientos de materiales en curso que deben llegar en un periodo determinado. La tabla A.8 almacena los promedios

de ventas de los periodos anteriores, que se usarán como base para la determinación de los inventarios de seguridad.

Tabla A.7: Llegadas programadas

t	Prod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Id														
2	RT1	0	0	0	0	2000	3750	1250	2750	2750	3250	2700	2750	1250	0
2	RT2	0	0	0	0	3250	3000	2750	2750	2750	3000	4000	4000	1500	0
2	NR1	0	0	0	4000	4000	3500	3000	3000	4000	3000	3000	3000	0	2500
2	A1	0	0	0	2000	4000	3500	3000	3000	4000	3000	3000	3000	0	2500

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.8: Ventas promedio

Prod	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Id														
RT1	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0
RT2	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0
NR1	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10
A1	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10

Fuente: Resultados del modelo.

A.5 Información relacionada con la demanda

La demanda externa se basa en pronósticos tanto de la demanda como del retorno de materiales en cada uno de los clientes minoristas, en la tabla A.9 y en la tabla A.10 se presenta dicha información indexada en el tiempo.

Tabla A.9: Demanda de productos

Periodo	Prod Id	9	10	11	12	13	14
1	RT1	2750	2500	2750	2750	2750	0
1	RT2	2750	2500	2500	2500	2500	0

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Prod Id	9	10	11	12	13	14
1	NR1	2500	2750	2750	2750	0	2750
1	A1	2000	2500	3000	2500	0	2500
2	RT1	1250	2500	1250	1250	1250	0
2	RT2	1500	1000	1250	1250	1250	0
2	NR1	1000	1250	1000	1000	0	1000
2	A1	1500	1500	1500	1500	0	1500
3	RT1	1250	1250	1250	1250	1250	0
3	RT2	1500	1500	2000	2000	2000	0
3	NR1	1500	1250	1000	1000	0	1000
3	A1	1500	1250	1000	1000	0	1000
4	RT1	11250	11250	10750	9250	7500	0
4	RT2	1500	1250	2500	12500	6250	0
4	NR1	1500	1500	2250	2250	0	2250
4	A1	1500	1500	2250	2250	0	2250
5	RT1	1500	2000	3250	3250	3250	0
5	RT2	1250	2000	3750	3750	3750	0
5	NR1	1250	1000	3250	3250	0	3250
5	A1	1250	1000	3250	3250	0	3250
6	RT1	1000	3750	3750	3750	3750	0
6	RT2	1500	1750	3250	3250	3250	0
6	NR1	1500	1750	3250	3250	0	3250
6	A1	1500	1750	3250	3250	0	3250

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.10: Materiales de retorno devueltos

Periodo	Prod Id	9	10	11	12	13	14
1	B1	12000	17500	7500	7000	7000	7000
1	B2	8000	12500	16500	6000	6000	6000
2	B1	5500	5000	5500	5500	5500	5500
2	B2	5500	5000	5000	5000	5000	5000
3	B1	2500	5000	2500	2500	2500	2500
3	B2	3000	2000	2500	2500	2500	2500
4	B1	2500	2500	2500	2500	2500	2500
4	B2	3000	3000	4000	4000	4000	4000
5	B1	22500	21000	22000	19000	15000	24500
5	B2	3000	2500	5000	18000	5000	5000
6	B1	3000	4000	6500	6500	6500	6500
6	B2	2500	4000	7500	7500	7500	7500

Fuente: Resultados del modelo.

A.6 Información de inventarios

La información de inventarios que se requiere para la ejecución de los modelos consiste en los niveles de inventario inicial en cada eslabón de la cadena de suministro, que se presentan en la tabla A.11 y los costes de mantenimiento de inventarios en cada uno de ellos, estos últimos se observan en la tabla A.12.

Tabla A.11: Inventario inicial

Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Prod														
RT1	844	671	0	546	350	826	1000	899	907	446	375	556	2338	0
NR1	0	895	1400	764	700	1321	2000	1199	1059	780	657	973	0	6400
RT2	844	559	0	655	350	826	1000	749	907	557	469	695	1929	0
B1	1407	1141	0	1114	875	1684	2500	1528	1512	1137	1875	1389	117	0
A1	0	0	2100	1310	350	661	1500	600	605	446	375	556	0	1600
B2	1407	2236	0	1114	875	1684	2500	1528	1512	1137	750	1334	117	0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.12: Costes de Inventario

Nombre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Prod														
RT1	0.06	0.06	0.0	0.0	0.04	0.04	0.02	0.02	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
NR1	0.06	0.06	0.0	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6
RT2	0.06	0.06	0.0	0.0	0.04	0.04	0.02	0.02	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
B1	0.06	0.06	0.0	0.0	0.04	0.04	0.01	0.01	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
A1	0.0	0.0	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.6	0.6	0.6	0.6	0.0	0.6
B2	0.06	0.06	0.0	0.0	0.04	0.04	0.02	0.01	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

A.7 Información asociada a los vehículos

En esta última sección se presenta la información relacionada con los vehículos que realizan el transporte en las dos direcciones en la cadena de suministros. En la tabla A.13 se presenta información general relacionada con los vehículos: tipo, cantidad disponible de cada tipo, capacidad en masa y en volumen, el coste variable de operación por distancia, los costes fijos y la velocidad de operación. Además, en la tabla A.14 se presentan los límites asociados a las ventanas de tiempo para cada uno de los vehículos con este tipo de restricciones.

Tabla A.13: Información de los vehículos

Tipo Veh	Cantidad	Capac masa	Capac volumen	Coste variable por dist	Coste fijo	Velocidad
Van	6	5000.0	5000.0	20.0	400.0	2.0
Truck	7	8000.0	8000.0	25.0	600.0	2.0
Trailer	8	15000.0	15000.0	30.0	800.0	2.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla A.14: Información de las ventanas de tiempo para los vehículos

Tipo Veh	Id Veh	Lím Inf TW Rígida	Lím Inf TW suave	Lím Sup TW suave	Lím Sup TW Rígida
Van	1	5.0	6.0	505.0	1016.0
Van	2	9.0	14.0	488.0	1012.0
Van	3	24.0	24.0	503.0	1012.0
Van	4	5.0	6.0	505.0	1016.0
Van	5	9.0	14.0	488.0	1012.0
Van	6	24.0	24.0	503.0	1012.0
Truck	7	17.0	21.0	485.0	1010.0
Truck	8	20.0	20.0	503.0	1018.0
Truck	9	20.0	25.0	484.0	1002.0
Truck	10	8.0	9.0	501.0	1014.0
Truck	11	3.0	27.0	502.0	1020.0
Truck	12	6.0	26.0	498.0	1010.0
Truck	13	4.0	18.0	489.0	992.0
Trailer	14	2.0	14.0	482.0	992.0
Trailer	15	3.0	26.0	505.0	1012.0
Trailer	16	2.0	21.0	493.0	1020.0
Trailer	17	4.0	10.0	491.0	986.0

Continúa en la página siguiente...

A.7 Información asociada a los vehículos

Tipo Veh	Id Veh	Lím Inf TW Rígida	Lím Inf TW suave	Lím Sup TW suave	Lím Sup TW Rígida
Trailer	18	18.0	27.0	490.0	1016.0
Trailer	19	19.0	28.0	491.0	1017.0
Trailer	20	20.0	29.0	492.0	1018.0
Trailer	21	21.0	30.0	493.0	1019.0

Fuente: Resultados del modelo.

Finalmente, se presenta la tabla de accesibilidad de los vehículos a los diferentes nodos en forma del parámetro binario de la tabla A.15, según el cual un valor igual a uno representa la posibilidad de que un vehículo de determinado tipo acceda a un nodo específico.

Tabla A.15: Accesibilidad de los vehículos a los nodos

Tipo Veh	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Van	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Truck	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Trailer	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1

Fuente: Resultados del modelo.

Apéndice B

Resultados instancia de evaluación

En el presente apéndice se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución de los mismos con los datos presentados en el Apéndice A. Tales resultados obedecen a la etapa de planeación de la producción que se presentan en la sección B.1 y a los correspondientes al ruteo de vehículos para cada una de las instancias resultantes los cuales están en la sección B.2.

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

En primer lugar se presenta un resumen de resultados en la tabla B.1, en el cual se aprecian los correspondientes valores para los diferentes costes asociados, y la información proporcionada por el software *gurobi* en cuanto a las características del modelo y su ejecución. De acuerdo con la naturaleza del problema y el enfoque de solución, en esta primera etapa los costes de entrega y recogida no serán tenidos en cuenta en el coste total, el cual incluirá los costes de transporte resultado de las instancias de ruteo, que se presentan en la siguiente sección.

Tabla B.1: Resumen de resultados

Concepto	Valor
Total Production Cost	65364.75
Total Set Up Cost	50000.00
Total Inventory Cost	91014.22
Total Deficit Cost	0.00
Total New Glass Containers Cost	0.00

Continúa en la página siguiente...

Concepto	Valor
Total Delivery Cost	696610.78
Total Pickup Cost	669360.10
Total Cost before transport	206378.97
TOTAL COST	1572349.85
Model name:	AgregatedRichVRPData
Model sense (minimization or maximization):	1
Number of variables:	397.00
Number of linear constraints:	114.00
Number of SOS constraints:	0.00
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix:	591.00
Number of integer variables:	21.00
Number of binary variables:	21.00
Current relative MIP optimality gap:	9.92
Runtime for most recent optimization:	1.83
Number of solutions found:	1.00
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization:	313.00

Fuente: Resultados del modelo.

En la tabla B.2 se presentan los resultados de las variables de decisión asociadas con la producción de productos terminados y de procesamiento de materiales de retorno que tienen lugar en las diferentes plantas y periodos.

Tabla B.2: Información de Producción

Periodo	Planta	Producto	Preparación	Cantidad a producir	Tiempo de preparación	Tiempo de producción
1	1	A	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1	B	1.00	16226.67	120.00	3245.33
1	1	E	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1	F	1.00	16226.67	12.00	1622.67
1	2	A	1.00	16150.00	150.00	4037.50
1	2	C	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2	B	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2	E	1.00	16150.00	5.00	807.50
1	2	F	0.00	0.00	0.00	0.00
1	3	D	1.00	8744.00	20.00	2623.20
2	1	A	1.00	17448.00	120.00	2617.20
2	1	B	1.00	1260.00	120.00	252.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Planta	Producto	Preparación	Cantidad a producir	Tiempo de preparación	Tiempo de producción
2	1	E	1.00	17448.00	8.00	1744.80
2	1	F	1.00	1260.00	12.00	126.00
2	2	A	1.00	16150.00	150.00	4037.50
2	2	C	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	B	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	E	1.00	16150.00	5.00	807.50
2	2	F	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3	D	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	A	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	B	1.00	15405.00	120.00	3081.00
3	1	E	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	F	1.00	15405.00	12.00	1540.50
3	2	A	1.00	13041.67	150.00	3260.42
3	2	C	1.00	3130.00	150.00	782.50
3	2	B	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2	E	1.00	13041.67	5.00	652.08
3	2	F	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3	D	1.00	15993.00	20.00	4797.90
4	1	A	1.00	5000.00	120.00	750.00
4	1	B	1.00	11633.33	120.00	2326.67
4	1	E	1.00	5000.00	8.00	500.00
4	1	F	1.00	11633.33	12.00	1163.33
4	2	A	1.00	7958.33	150.00	1989.58
4	2	C	1.00	9230.00	150.00	2307.50
4	2	B	0.00	0.00	0.00	0.00
4	2	E	1.00	7958.33	5.00	397.92

Fuente: Resultados del modelo.

La tabla B.3 presenta los volúmenes de inventario de productos y materiales de retorno en cada una de las instalaciones de la cadena de suministros.

Tabla B.3: Información de inventarios

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
1	1	A	431.00	0.00
1	1	B	181.00	0.00
1	1	E	1407.00	0.00
1	1	F	1407.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
1	2	C	895.00	0.00
1	2	B	230.00	0.00
1	2	E	1141.00	0.00
1	2	F	2236.00	0.00
1	3	D	1100.00	0.00
1	4	C	4764.00	0.00
1	4	D	3310.00	0.00
1	5	A	976.00	0.00
1	5	C	4410.00	0.00
1	5	B	3587.00	0.00
1	5	E	875.00	0.00
1	5	D	4350.00	0.00
1	5	F	875.00	0.00
1	6	A	4527.20	0.00
1	6	C	4821.00	0.00
1	6	B	3826.00	0.00
1	6	E	1684.00	0.00
1	6	D	3647.00	0.00
1	6	F	1684.00	0.00
1	7	A	2250.00	0.00
1	7	C	5000.00	0.00
1	7	B	3750.00	0.00
1	7	E	2500.00	0.00
1	7	D	4500.00	0.00
1	7	F	2500.00	0.00
1	8	A	1308.80	0.00
1	8	C	4036.00	0.00
1	8	B	3108.00	0.00
1	8	E	614.20	0.00
1	8	D	2405.00	0.00
1	8	F	1528.00	0.00
1	9	A	907.00	0.00
1	9	C	2559.00	0.00
1	9	B	907.00	0.00
1	9	E	6022.00	0.00
1	9	D	2605.00	0.00
1	10	A	1196.00	0.00
1	10	C	1030.00	0.00
1	10	B	1057.00	0.00
1	10	D	946.00	0.00
1	11	A	325.00	0.00
1	11	C	907.00	0.00
1	11	B	1969.00	0.00
1	11	E	241.67	0.00
1	11	D	375.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
1	11	F	5182.33	0.00
1	12	A	556.00	0.00
1	12	C	1223.00	0.00
1	12	B	2195.00	0.00
1	12	D	1056.00	0.00
1	13	A	838.00	0.00
1	13	B	929.00	0.00
1	13	E	7117.00	0.00
1	13	F	116.00	0.00
1	14	C	6150.00	0.00
1	14	D	1600.00	0.00
2	1	B	5064.87	0.00
2	1	E	3935.13	0.00
2	2	A	7650.00	0.00
2	2	C	884.00	0.00
2	2	B	230.00	0.00
2	2	F	2236.00	0.00
2	3	D	6844.00	0.00
2	4	C	4764.00	0.00
2	4	D	3310.00	0.00
2	5	A	976.00	0.00
2	5	C	3160.00	0.00
2	5	B	3587.00	0.00
2	5	E	27901.00	0.00
2	5	D	4233.50	0.00
2	5	F	24878.50	0.00
2	6	A	4277.20	0.00
2	6	C	3974.00	0.00
2	6	B	3826.00	0.00
2	6	E	1684.00	0.00
2	6	D	2543.80	0.00
2	6	F	9018.00	0.00
2	7	A	2250.00	0.00
2	7	C	5000.00	0.00
2	7	B	3750.00	0.00
2	7	E	2500.00	0.00
2	7	D	4500.00	0.00
2	7	F	2500.00	0.00
2	8	A	1308.80	0.00
2	8	C	3036.00	0.00
2	8	B	3108.00	0.00
2	8	E	0.00	0.00
2	8	D	1624.70	0.00
2	8	F	3922.50	0.00
2	9	A	70.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
2	9	C	1559.00	0.00
2	9	B	70.00	0.00
2	9	D	1105.00	0.00
2	10	A	70.00	0.00
2	10	C	70.00	0.00
2	10	B	70.00	0.00
2	10	D	446.00	0.00
2	11	A	70.00	0.00
2	11	C	70.00	0.00
2	11	B	1048.00	0.00
2	11	D	70.00	0.00
2	11	F	2003.53	0.00
2	12	A	70.00	0.00
2	12	C	223.00	0.00
2	12	B	945.00	0.00
2	12	D	70.00	0.00
2	13	A	889.00	0.00
2	13	B	70.00	0.00
2	13	F	5116.00	0.00
2	14	C	5150.00	0.00
2	14	D	100.00	0.00
3	1	A	2081.20	0.00
3	1	F	6918.80	0.00
3	2	E	3500.00	0.00
3	2	F	2236.00	0.00
3	4	C	2514.00	0.00
3	4	D	3310.00	0.00
3	5	A	140.00	0.00
3	5	C	1660.00	0.00
3	5	B	140.00	0.00
3	5	E	30233.00	0.00
3	5	D	1983.50	0.00
3	5	F	35378.50	0.00
3	6	A	140.00	0.00
3	6	C	3974.00	0.00
3	6	B	140.00	0.00
3	6	E	7184.00	0.00
3	6	D	2543.80	0.00
3	6	F	14018.00	0.00
3	7	A	140.00	0.00
3	7	C	5000.00	0.00
3	7	B	140.00	0.00
3	7	E	2500.00	0.00
3	7	D	4500.00	0.00
3	7	F	2500.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
3	8	A	1308.80	0.00
3	8	C	170.00	0.00
3	8	B	601.67	0.00
3	8	D	1624.70	0.00
3	8	F	3922.50	0.00
3	9	A	3820.00	0.00
3	9	C	70.00	0.00
3	9	B	70.00	0.00
3	9	D	605.00	0.00
3	10	A	70.00	0.00
3	10	C	70.00	0.00
3	10	B	340.67	0.00
3	10	D	196.00	0.00
3	11	A	70.00	0.00
3	11	C	70.00	0.00
3	11	B	70.00	0.00
3	11	D	70.00	0.00
3	12	A	70.00	0.00
3	12	C	70.00	0.00
3	12	B	70.00	0.00
3	12	D	70.00	0.00
3	13	A	70.00	0.00
3	13	B	3995.13	0.00
3	14	C	4150.00	0.00
3	14	D	100.00	0.00
4	1	B	905.00	0.00
4	1	E	2500.00	0.00
4	1	F	3633.33	0.00
4	2	A	3041.67	0.00
4	2	E	458.33	0.00
4	2	F	2236.00	0.00
4	3	D	7000.00	0.00
4	4	C	70.00	0.00
4	4	D	3310.00	0.00
4	5	A	140.00	0.00
4	5	C	660.00	0.00
4	5	B	140.00	0.00
4	5	E	30233.00	0.00
4	5	D	1127.30	0.00
4	5	F	40378.50	0.00
4	6	A	140.00	0.00
4	6	C	3168.00	0.00
4	6	B	140.00	0.00
4	6	E	9684.00	0.00
4	6	D	150.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
4	6	F	16518.00	0.00
4	7	A	140.00	0.00
4	7	C	2240.00	0.00
4	7	B	140.00	0.00
4	7	E	2500.00	0.00
4	7	D	4500.00	0.00
4	7	F	2500.00	0.00
4	8	A	140.00	0.00
4	8	C	140.00	0.00
4	8	B	601.67	0.00
4	8	D	1624.70	0.00
4	8	F	3922.50	0.00
4	9	A	70.00	0.00
4	9	C	70.00	0.00
4	9	B	70.00	0.00
4	9	D	105.00	0.00
4	10	A	70.00	0.00
4	10	C	70.00	0.00
4	10	B	70.00	0.00
4	10	D	70.00	0.00
4	11	A	70.00	0.00
4	11	C	70.00	0.00
4	11	B	70.00	0.00
4	11	D	70.00	0.00
4	12	A	70.00	0.00
4	12	C	70.00	0.00
4	12	B	70.00	0.00
4	12	D	70.00	0.00
4	13	A	70.00	0.00
4	13	B	70.00	0.00
4	14	C	1900.00	0.00
4	14	D	70.00	0.00
5	2	F	2236.00	0.00
5	4	C	70.00	0.00
5	4	D	70.00	0.00
5	5	A	140.00	0.00
5	5	C	140.00	0.00
5	5	B	140.00	0.00
5	5	E	30233.00	0.00
5	5	D	140.00	0.00
5	5	F	46378.50	0.00
5	6	A	140.00	0.00
5	6	C	140.00	0.00
5	6	B	140.00	0.00
5	6	E	12184.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
5	6	D	140.00	0.00
5	6	F	20518.00	0.00
5	7	A	140.00	0.00
5	7	C	2018.00	0.00
5	7	B	140.00	0.00
5	7	E	2500.00	0.00
5	7	D	4500.00	0.00
5	7	F	2500.00	0.00
5	8	A	140.00	0.00
5	8	C	140.00	0.00
5	8	B	140.00	0.00
5	8	D	140.00	0.00
5	8	F	3922.50	0.00
5	9	A	70.00	0.00
5	9	C	70.00	0.00
5	9	B	70.00	0.00
5	9	E	12720.00	0.00
5	9	D	70.00	0.00
5	10	A	70.00	0.00
5	10	C	70.00	0.00
5	10	B	70.00	0.00
5	10	E	6220.00	0.00
5	10	D	70.00	0.00
5	10	F	2500.00	0.00
5	11	A	70.00	0.00
5	11	C	70.00	0.00
5	11	B	70.00	0.00
5	11	E	8720.00	0.00
5	11	D	70.00	0.00
5	12	A	70.00	0.00
5	12	C	70.00	0.00
5	12	B	70.00	0.00
5	12	E	10720.00	0.00
5	12	D	70.00	0.00
5	13	A	70.00	0.00
5	13	B	70.00	0.00
5	13	E	8860.00	0.00
5	14	C	70.00	0.00
5	14	D	348.00	0.00
6	1	E	2622.50	0.00
6	2	E	8764.00	0.00
6	2	F	2236.00	0.00
6	4	C	70.00	0.00
6	4	D	70.00	0.00
6	5	A	140.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
6	5	C	140.00	0.00
6	5	B	140.00	0.00
6	5	E	65061.50	0.00
6	5	D	140.00	0.00
6	5	F	54378.50	0.00
6	6	A	140.00	0.00
6	6	C	140.00	0.00
6	6	B	140.00	0.00
6	6	E	14711.50	0.00
6	6	D	140.00	0.00
6	6	F	38518.00	0.00
6	7	A	140.00	0.00
6	7	C	2018.00	0.00
6	7	B	140.00	0.00
6	7	E	2500.00	0.00
6	7	D	4500.00	0.00
6	7	F	2500.00	0.00
6	8	A	140.00	0.00
6	8	C	140.00	0.00
6	8	B	140.00	0.00
6	8	E	3517.50	0.00
6	8	D	140.00	0.00
6	8	F	8922.50	0.00
6	9	A	70.00	0.00
6	9	C	70.00	0.00
6	9	B	70.00	0.00
6	9	E	12720.00	0.00
6	9	D	70.00	0.00
6	10	A	70.00	0.00
6	10	C	70.00	0.00
6	10	B	70.00	0.00
6	10	E	8720.00	0.00
6	10	D	70.00	0.00
6	11	A	70.00	0.00
6	11	C	70.00	0.00
6	11	B	70.00	0.00
6	11	E	8720.00	0.00
6	11	D	70.00	0.00
6	12	A	70.00	0.00
6	12	C	70.00	0.00
6	12	B	70.00	0.00
6	12	E	10720.00	0.00
6	12	D	70.00	0.00
6	13	A	70.00	0.00
6	13	B	70.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Instalaciones	Producto	Inventario	Déficit o compras
6	13	E	8860.00	0.00
6	14	C	70.00	0.00
6	14	D	70.00	0.00

Fuente: Resultados del modelo.

La tabla B.4 presenta de manera orientativa una posible asignación de productos y materiales de retorno a ser enviados o recogidos, a partir de la cual se construyen los datos respectivos para cada una de las instancias.

Tabla B.4: Entregas y recogidas

Periodo	Origen	Destino	Producto	Cant. En-treg.	Cant. Reco-gida
1	1	8	E	0.00	913.80
1	1	9	A	413.00	0.00
1	1	9	B	663.00	0.00
1	1	11	E	0.00	1614.33
1	1	11	F	0.00	11213.17
1	1	13	F	0.00	3606.50
1	2	9	E	0.00	7490.00
1	2	11	A	671.00	0.00
1	2	11	B	329.00	0.00
1	2	11	E	0.00	7519.00
1	3	10	D	1000.00	0.00
1	5	9	F	0.00	9512.00
1	5	10	A	1374.00	0.00
1	5	10	C	290.00	0.00
1	5	10	B	13.00	0.00
1	5	10	E	0.00	18637.00
1	5	10	F	0.00	13637.00
1	5	11	F	0.00	854.50
1	5	12	E	0.00	8389.00
1	6	12	A	48.80	0.00
1	6	12	D	514.00	0.00
1	6	12	F	0.00	7334.00
1	8	11	A	324.00	0.00
1	8	11	C	163.00	0.00
1	8	11	D	1195.00	0.00
1	8	12	A	715.20	0.00
1	8	13	A	1301.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Origen	Destino	Producto	Cant. En-treg.	Cant. Reco-gida
1	8	13	B	391.00	0.00
1	8	13	F	0.00	2394.50
2	1	8	E	0.00	614.20
2	1	9	B	1500.00	0.00
2	1	10	B	1770.67	0.00
2	1	11	B	1022.00	0.00
2	1	11	E	0.00	281.67
2	1	11	F	0.00	8178.80
2	1	12	B	1125.00	0.00
2	1	13	A	431.00	0.00
2	1	13	B	5925.13	0.00
2	1	13	E	0.00	12617.00
2	2	9	A	5000.00	0.00
2	2	9	C	11.00	0.00
2	2	9	E	0.00	11522.00
2	2	10	A	1250.00	0.00
2	2	10	E	0.00	2668.00
2	2	11	A	1250.00	0.00
2	2	11	E	0.00	5460.00
2	2	12	A	1000.00	0.00
2	3	9	D	1000.00	0.00
2	3	10	D	1000.00	0.00
2	3	14	D	1000.00	0.00
2	5	9	F	0.00	5500.00
2	5	10	C	1250.00	0.00
2	5	10	E	0.00	2332.00
2	5	10	F	0.00	5000.00
2	5	11	D	116.50	0.00
2	6	11	D	103.20	0.00
2	6	12	A	250.00	0.00
2	6	12	C	847.00	0.00
2	6	12	E	0.00	5500.00
2	6	12	D	1000.00	0.00
2	6	12	F	0.00	5000.00
2	8	11	C	1000.00	0.00
2	8	11	D	780.30	0.00
3	1	9	B	1500.00	0.00
3	1	11	A	5700.00	0.00
3	1	11	B	2500.00	0.00
3	1	11	F	0.00	4503.53
3	1	12	A	2166.80	0.00
3	1	13	A	7500.00	0.00
3	1	13	B	2324.87	0.00
3	1	13	E	0.00	2500.00
3	1	13	F	0.00	7616.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Origen	Destino	Producto	Cant. En- treg.	Cant. Reco- gida
3	2	9	A	7500.00	0.00
3	2	9	C	884.00	0.00
3	2	9	E	0.00	2500.00
3	2	10	A	11250.00	0.00
3	2	10	B	230.00	0.00
3	2	10	E	0.00	5000.00
3	2	11	A	5050.00	0.00
3	2	11	E	0.00	2500.00
3	3	9	D	1000.00	0.00
3	3	10	D	1374.00	0.00
3	3	11	D	2250.00	0.00
3	3	14	D	2220.00	0.00
3	4	12	C	2250.00	0.00
3	5	9	F	0.00	3000.00
3	5	10	C	1500.00	0.00
3	5	10	B	749.33	0.00
3	5	10	F	0.00	2000.00
3	5	12	A	836.00	0.00
3	5	12	B	2697.67	0.00
3	5	12	D	2250.00	0.00
3	6	12	A	4137.20	0.00
3	6	12	B	3686.00	0.00
3	6	12	E	0.00	2500.00
3	6	12	F	0.00	2500.00
3	7	12	A	2110.00	0.00
3	7	12	B	3610.00	0.00
3	8	9	C	616.00	0.00
3	8	11	C	2250.00	0.00
3	8	12	B	2506.33	0.00
4	1	9	B	1250.00	0.00
4	1	10	B	2000.00	0.00
4	1	11	B	3750.00	0.00
4	1	11	F	0.00	4000.00
4	1	12	B	3750.00	0.00
4	1	13	A	2081.20	0.00
4	1	13	B	3750.00	0.00
4	1	13	E	0.00	2500.00
4	1	13	F	0.00	4000.00
4	2	9	A	1500.00	0.00
4	2	9	C	1250.00	0.00
4	2	9	E	0.00	2500.00
4	2	10	A	2000.00	0.00
4	2	10	E	0.00	2500.00
4	2	11	A	3250.00	0.00
4	2	11	C	460.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	Origen	Destino	Producto	Cant. En-treg.	Cant. Reco-gida
4	2	11	E	0.00	2500.00
4	2	12	A	3250.00	0.00
4	2	14	C	1420.00	0.00
4	3	9	D	1215.00	0.00
4	3	10	D	1000.00	0.00
4	3	11	D	3250.00	0.00
4	3	14	D	3528.00	0.00
4	4	12	C	2444.00	0.00
4	5	9	F	0.00	3000.00
4	5	10	C	1000.00	0.00
4	5	10	F	0.00	3000.00
4	5	12	D	856.20	0.00
4	6	12	C	806.00	0.00
4	6	12	E	0.00	2500.00
4	6	12	D	2393.80	0.00
4	6	12	F	0.00	4000.00
4	7	11	C	2760.00	0.00
4	8	11	C	30.00	0.00
4	8	13	A	1168.80	0.00
5	1	9	B	1500.00	0.00
5	1	10	B	1750.00	0.00
5	1	11	B	3250.00	0.00
5	1	12	A	1250.00	0.00
5	1	12	B	2788.33	0.00
5	1	13	A	3750.00	0.00
5	1	13	B	3250.00	0.00
5	1	13	E	0.00	2622.50
5	2	9	A	1000.00	0.00
5	2	9	C	1500.00	0.00
5	2	10	A	3750.00	0.00
5	2	10	C	1230.00	0.00
5	2	11	A	3750.00	0.00
5	2	11	C	3250.00	0.00
5	2	11	E	0.00	8764.00
5	2	12	A	2500.00	0.00
5	2	14	C	3250.00	0.00
5	3	9	D	1500.00	0.00
5	3	10	D	1750.00	0.00
5	3	11	D	1000.00	0.00
5	3	14	D	2750.00	0.00
5	4	12	D	3240.00	0.00
5	5	9	E	0.00	9780.00
5	5	9	F	0.00	3000.00
5	5	10	C	520.00	0.00
5	5	10	E	0.00	14780.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	Origen	Destino	Producto	Cant. En-treg.	Cant. Reco-gida
5	5	11	E	0.00	4516.00
5	5	11	D	765.30	0.00
5	5	11	F	0.00	5000.00
5	5	12	E	0.00	5752.50
5	5	14	D	222.00	0.00
5	6	12	C	3028.00	0.00
5	6	12	E	0.00	2527.50
5	6	12	D	10.00	0.00
5	6	12	F	0.00	18000.00
5	7	12	C	222.00	0.00
5	8	11	D	1484.70	0.00
5	8	12	B	461.67	0.00
5	8	13	E	0.00	3517.50
5	8	13	F	0.00	5000.00
6	2	11	E	0.00	6500.00
6	2	11	F	0.00	7500.00
6	5	9	E	0.00	3000.00
6	5	9	F	0.00	2500.00
6	5	10	E	0.00	1500.00
6	5	10	F	0.00	6500.00
6	5	12	E	0.00	6500.00
6	5	12	F	0.00	7500.00
6	8	13	E	0.00	6500.00
6	8	13	F	0.00	7500.00

Fuente: Resultados del modelo.

Finalmente, en la tabla B.5, la tabla B.6 y en la tabla B.7 se presenta el comportamiento de las plantas y demás nodos, y el uso de la capacidad tanto en volúmenes de almacenamiento como de producción.

Tabla B.5: Comportamiento plantas

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Nodo: 1, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		0.00	17448.00	0.00	5000.00	0.00	0.00
Inventory	844.0	431.00	0.00	2081.20	0.00	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		413.00	431.00	15366.80	2081.20	5000.00	0.00
Demand							
Nodo: 1, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		16226.67	1260.00	15405.00	11633.33	0.00	0.00
Inventory	844.0	181.00	5064.87	0.00	905.00	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		663.00	11342.80	6324.87	14500.00	12538.33	0.00
Demand							
Nodo: 1, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		0.00	17448.00	0.00	5000.00	0.00	0.00
Inventory	1407.0	1407.00	3935.13	0.00	2500.00	0.00	2622.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	2528.13	13512.87	2500.00	2500.00	2622.50
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 1, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		16226.67	1260.00	15405.00	11633.33	0.00	0.00
Inventory	1407.0	1407.00	0.00	6918.80	3633.33	0.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	14819.67	8178.80	12119.53	8000.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 2, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		16150.00	16150.00	13041.67	7958.33	0.00	0.00
Inventory	671.0	0.00	7650.00	0.00	3041.67	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		671.00	8500.00	23800.00	10000.00	11000.00	0.00
Demand							
Nodo: 2, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Production		0.00	0.00	3130.00	9230.00	0.00	0.00
Inventory	895.0	895.00	884.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	11.00	884.00	3130.00	9230.00	0.00
Demand							
Nodo: 2, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Inventory	559.0	230.00	230.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		329.00	0.00	230.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 2, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		16150.00	16150.00	13041.67	7958.33	0.00	0.00
Inventory	1141.0	1141.00	0.00	3500.00	458.33	0.00	8764.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	15009.00	19650.00	10000.00	7500.00	8764.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 2, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Inventory	2236.0	2236.00	2236.00	2236.00	2236.00	2236.00	2236.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 3, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		8744.00	0.00	15993.00	0.00	0.00	0.00
Inventory	2100.0	1100.00	6844.00	0.00	7000.00	0.00	0.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		1000.00	3000.00	6844.00	8993.00	7000.00	0.00
Demand							

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.6: Comportamiento otros nodos

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Nodo: 4, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	764.0	4764.00	4764.00	2514.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	2250.00	2444.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 4, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1310.0	3310.00	3310.00	3310.00	3310.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	3240.00	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	350.0	976.00	976.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		1374.00	0.00	836.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	700.0	4410.00	3160.00	1660.00	660.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		290.00	1250.00	1500.00	1000.00	520.00	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	350.0	3587.00	3587.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3250.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		13.00	0.00	3447.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	875.0	875.00	27901.00	30233.00	30233.00	30233.00	65061.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	27026.00	2332.00	0.00	0.00	34828.50
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	350.0	4350.00	4233.50	1983.50	1127.30	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	116.50	2250.00	856.20	987.30	0.00
Demand							
Nodo: 5, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	875.0	875.00	24878.50	35378.50	40378.50	46378.50	54378.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	24003.50	10500.00	5000.00	6000.00	8000.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered Demand		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nodo: 6, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	826.0	4527.20	4277.20	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered Demand		48.80	250.00	4137.20	0.00	0.00	0.00
Nodo: 6, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1321.0	4821.00	3974.00	3974.00	3168.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered Demand		0.00	847.00	0.00	806.00	3028.00	0.00
Nodo: 6, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	826.0	3826.00	3826.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered Demand		0.00	0.00	3686.00	0.00	0.00	0.00
Nodo: 6, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1684.0	1684.00	1684.00	7184.00	9684.00	12184.00	14711.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	5500.00	2500.00	2500.00	2527.50
Delivered Demand		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nodo: 6, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	661.0	3647.00	2543.80	2543.80	150.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		514.00	1103.20	0.00	2393.80	10.00	0.00
Demand							
Nodo: 6, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1684.0	1684.00	9018.00	14018.00	16518.00	20518.00	38518.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	7334.00	5000.00	2500.00	4000.00	18000.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1000.0	2250.00	2250.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		1250.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	2110.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	2000.0	5000.00	5000.00	5000.00	2240.00	2018.00	2018.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	2760.00	222.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1000.0	3750.00	3750.00	140.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered		0.00	0.00	3610.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	2500.0	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1500.0	4500.00	4500.00	4500.00	4500.00	4500.00	4500.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 7, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	2500.0	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00	2500.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	899.0	1308.80	1308.80	1308.80	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		2340.20	0.00	0.00	1168.80	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	1199.0	4036.00	3036.00	170.00	140.00	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		163.00	1000.00	2866.00	30.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	749.0	3108.00	3108.00	601.67	601.67	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		391.00	0.00	2506.33	0.00	461.67	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1528.0	614.20	0.00	0.00	0.00	0.00	3517.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3517.50
Delivered		913.80	614.20	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	600.0	2405.00	1624.70	1624.70	1624.70	140.00	140.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		1195.00	780.30	0.00	0.00	1484.70	0.00
Demand							
Nodo: 8, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1528.0	1528.00	3922.50	3922.50	3922.50	3922.50	8922.50
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	2394.50	0.00	0.00	0.00	5000.00
Demand							

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand							
Nodo: 9, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	907.0	907.00	70.00	3820.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	413.00	5000.00	7500.00	1500.00	1000.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1250.00	1250.00	11250.00	1500.00	1000.00
Nodo: 9, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1059.0	2559.00	1559.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	11.00	1500.00	1250.00	1500.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1000.00	1500.00	1500.00	1250.00	1500.00
Nodo: 9, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	907.0	907.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	663.00	1500.00	1500.00	1250.00	1500.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1500.00	1500.00	1500.00	1250.00	1500.00
Nodo: 9, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1512.0	6022.00	0.00	0.00	0.00	12720.00	12720.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		7490.00	11522.00	2500.00	2500.00	9780.00	3000.00
Demand							
Nodo: 9, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	605.0	2605.00	1105.00	605.00	105.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	1000.00	1000.00	1215.00	1500.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2000.00	1500.00	1500.00	1500.00	1250.00	1500.00
Nodo: 9, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1512.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		9512.00	5500.00	3000.00	3000.00	3000.00	2500.00
Demand							
Nodo: 10, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	446.0	1196.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3250.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	1374.00	1250.00	11250.00	2000.00	3750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	2500.00	1250.00	11250.00	2000.00	3750.00
Nodo: 10, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	780.0	1030.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	290.00	1250.00	1500.00	1000.00	1750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1250.00	1250.00	1500.00	1000.00	1750.00
Nodo: 10, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	557.0	1057.00	70.00	340.67	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	13.00	1770.67	979.33	2000.00	1750.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1000.00	1500.00	1250.00	2000.00	1750.00
Nodo: 10, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1137.0	0.00	0.00	0.00	0.00	6220.00	8720.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		18637.00	5000.00	5000.00	2500.00	14780.00	1500.00
Demand							
Nodo: 10, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	446.0	946.00	446.00	196.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	1000.00	1000.00	1374.00	1000.00	1750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1500.00	1250.00	1500.00	1000.00	1750.00
Nodo: 10, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1137.0	0.00	0.00	0.00	0.00	2500.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		13637.00	5000.00	2000.00	3000.00	0.00	6500.00
Demand							
Nodo: 11, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	375.0	325.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	995.00	1250.00	10750.00	3250.00	3750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1250.00	1250.00	10750.00	3250.00	3750.00
Nodo: 11, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	657.0	907.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	163.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1000.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Nodo: 11, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	469.0	1969.00	1048.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	329.00	1022.00	2500.00	3750.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1250.00	2000.00	2500.00	3750.00	3250.00
Nodo: 11, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1875.0	241.67	0.00	0.00	0.00	8720.00	8720.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		9133.33	5741.67	2500.00	2500.00	13280.00	6500.00
Demand							
Nodo: 11, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	375.0	375.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	1195.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		3000.00	1500.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Nodo: 11, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	750.0	5182.33	2003.53	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered Demand		12067.67	8178.80	4503.53	4000.00	5000.00	7500.00
Nodo: 12, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	556.0	556.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2750.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	764.00	1250.00	9250.00	3250.00	3750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1250.00	1250.00	9250.00	3250.00	3750.00
Nodo: 12, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	973.0	1223.00	223.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	847.00	2250.00	3250.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1000.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Nodo: 12, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	695.0	2195.00	945.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		4000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	1125.00	12500.00	3750.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1250.00	2000.00	12500.00	3750.00	3250.00
Nodo: 12, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1389.0	0.00	0.00	0.00	0.00	10720.00	10720.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		8389.00	5500.00	2500.00	2500.00	8280.00	6500.00
Demand							
Nodo: 12, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Inventory	556.0	1056.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		3000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	514.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1500.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Nodo: 12, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1334.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered		7334.00	5000.00	2500.00	4000.00	18000.00	7500.00
Demand							
Nodo: 13, Producto: A							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	2338.0	838.00	889.00	70.00	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		1250.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	1301.00	431.00	7500.00	3250.00	3750.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2750.00	1250.00	1250.00	7500.00	3250.00	3750.00
Nodo: 13, Producto: B							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1929.0	929.00	70.00	3995.13	70.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		1500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	391.00	5925.13	2324.87	3750.00	3250.00
Delivered		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demand		2500.00	1250.00	2000.00	6250.00	3750.00	3250.00
Nodo: 13, Producto: E							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	117.0	7117.00	0.00	0.00	0.00	8860.00	8860.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Periodo	0	1	2	3	4	5	6
Delivered Demand		0.00	12617.00	2500.00	2500.00	6140.00	6500.00
Nodo: 13, Producto: F							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	117.0	116.00	5116.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Deficit							
Scheduled arrivals		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Delivered Demand		6001.00	0.00	7616.00	4000.00	5000.00	7500.00
Nodo: 14, Producto: C							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	6400.0	6150.00	5150.00	4150.00	1900.00	70.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	0.00	0.00	1420.00	3250.00
Delivered Demand		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2750.00	1000.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00
Nodo: 14, Producto: D							
Period	0	1	2	3	4	5	6
Production		—	—	—	—	—	—
Inventory	1600.0	1600.00	100.00	100.00	70.00	348.00	70.00
Deficit		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Scheduled arrivals		2500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Received		0.00	0.00	1000.00	2220.00	3528.00	2972.00
Delivered Demand		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2500.00	1500.00	1000.00	2250.00	3250.00	3250.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.7: Uso de las instalaciones

Periodo	1	2	3	4	5	6
Facility: 1						
Period	1	2	3	4	5	6
Production Time	5000.00	5000.00	4753.50	5000.00	0.00	0.00
% Used Capacity	0.97	0.95	0.92	0.95	0.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.1 Resultados del modelo de planeación de la producción

Periodo	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	1596.90	6638.92	4156.84	2995.00	0.00	1049.00
Inventory Volume	3426.00	9000.00	9000.00	7038.33	0.00	2622.50
% Mass storage	0.18	0.74	0.46	0.33	0.00	0.12
% Volm storage	0.38	1.00	1.00	0.78	0.00	0.29
Facility: 2						
Period	1	2	3	4	5	6
Production Time	5000.00	5000.00	5000.00	5000.00	0.00	0.00
% Used Capacity	0.97	0.97	0.94	0.94	0.00	0.00
Inventory Mass	2252.20	9434.80	2070.80	3895.80	670.80	4176.40
Inventory Volume	4502.00	11000.00	5736.00	5736.00	2236.00	11000.00
% Mass storage	0.20	0.86	0.19	0.35	0.06	0.38
% Volm storage	0.41	1.00	0.52	0.52	0.20	1.00
Facility: 3						
Period	1	2	3	4	5	6
Production Time	2643.20	0.00	4817.90	0.00	0.00	0.00
% Used Capacity	0.52	0.00	0.96	0.00	0.00	0.00
Inventory Mass	1100.00	6844.00	0.00	7000.00	0.00	0.00
Inventory Volume	1100.00	6844.00	0.00	7000.00	0.00	0.00
% Mass storage	0.16	0.98	0.00	1.00	0.00	0.00
% Volm storage	0.16	0.98	0.00	1.00	0.00	0.00
Facility: 4						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	8074.00	8074.00	5824.00	3380.00	140.00	140.00
Inventory Volume	8074.00	8074.00	5824.00	3380.00	140.00	140.00
% Mass storage	0.73	0.73	0.53	0.31	0.01	0.01
% Volm storage	0.73	0.73	0.53	0.31	0.01	0.01
Facility: 5						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	13935.50	30580.45	26630.25	26274.05	26566.75	42898.15
Inventory Volume	15073.00	64736.00	69535.00	72678.80	77171.50	120000.00
% Mass storage	0.29	0.64	0.55	0.55	0.55	0.89
% Volm storage	0.13	0.54	0.58	0.61	0.64	1.00
Facility: 6						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	18000.00	18000.00	13876.80	12427.00	11589.00	18000.00
Inventory Volume	20189.20	25323.00	27999.80	29800.00	33262.00	53789.50
% Mass storage	1.00	1.00	0.77	0.69	0.64	1.00
% Volm storage	0.37	0.47	0.52	0.55	0.62	1.00
Facility: 7						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	17250.00	17250.00	11530.00	8770.00	8548.00	8548.00
Inventory Volume	20500.00	20500.00	14780.00	12020.00	11798.00	11798.00
% Mass storage	0.82	0.82	0.55	0.42	0.41	0.41
% Volm storage	0.98	0.98	0.70	0.57	0.56	0.56
Facility: 8						

Continúa en la página siguiente...

Periodo	1	2	3	4	5	6
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	11561.88	10254.25	4881.92	3683.12	1736.75	4643.75
Inventory Volume	13000.00	13000.00	7627.67	6428.87	4482.50	13000.00
% Mass storage	0.89	0.79	0.38	0.28	0.13	0.36
% Volm storage	1.00	1.00	0.59	0.49	0.34	1.00
Facility: 9						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	9386.80	2804.00	4565.00	315.00	5368.00	5368.00
Inventory Volume	13000.00	2804.00	4565.00	315.00	13000.00	13000.00
% Mass storage	0.72	0.22	0.35	0.02	0.41	0.41
% Volm storage	1.00	0.22	0.35	0.02	1.00	1.00
Facility: 10						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	4229.00	656.00	676.67	280.00	3518.00	3768.00
Inventory Volume	4229.00	656.00	676.67	280.00	9000.00	9000.00
% Mass storage	0.47	0.07	0.08	0.03	0.39	0.42
% Volm storage	0.47	0.07	0.08	0.03	1.00	1.00
Facility: 11						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	5227.37	1859.06	280.00	280.00	3768.00	3768.00
Inventory Volume	9000.00	3261.53	280.00	280.00	9000.00	9000.00
% Mass storage	0.58	0.21	0.03	0.03	0.42	0.42
% Volm storage	1.00	0.36	0.03	0.03	1.00	1.00
Facility: 12						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	5030.00	1308.00	280.00	280.00	4568.00	4568.00
Inventory Volume	5030.00	1308.00	280.00	280.00	11000.00	11000.00
% Mass storage	0.46	0.12	0.03	0.03	0.42	0.42
% Volm storage	0.46	0.12	0.03	0.03	1.00	1.00
Facility: 13						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	4648.60	2493.80	4065.13	140.00	3684.00	3684.00
Inventory Volume	9000.00	6075.00	4065.13	140.00	9000.00	9000.00
% Mass storage	0.52	0.28	0.45	0.02	0.41	0.41
% Volm storage	1.00	0.68	0.45	0.02	1.00	1.00
Facility: 14						
Period	1	2	3	4	5	6
Inventory Mass	7750.00	5250.00	4250.00	1970.00	418.00	140.00
Inventory Volume	7750.00	5250.00	4250.00	1970.00	418.00	140.00
% Mass storage	0.48	0.33	0.27	0.12	0.03	0.01
% Volm storage	0.48	0.33	0.27	0.12	0.03	0.01

Fuente: Resultados del modelo.

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

El ruteo de vehículos se realizó para cada una de las instancias construídas de acuerdo con el procedimiento presentado en la subsección 3.5.1, a continuación se presentan los resultados para cada instancia.

B.2.1 Instancia uno primer periodo

Para cada una de las instancias se presenta en primer lugar un resumen de los resultados, en este caso en la tabla B.8, cuya primera parte muestra los costes calculados con el modelo y cuya segunda parte presenta las características del modelo reportadas por el software *gurobi*.

Tabla B.8: Resumen de resultados instancia 1

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	73635.00
Fixed Transport Cost	9000.00
Download Cost	10630.00
Load Cost	272157.00
Soft Time Windows Cost	9633.50
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	375055.50
Model name	AgregatedRichVRPData_1
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	8463
Number of linear constraints	18741
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	141416
Number of integer variables	1890
Number of binary variables	1890
Current relative MIP optimality gap	0.121510627359
Runtime for most recent optimization	13.864746809
Number of solutions found	2
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Las rutas recorridas por cada uno de los vehículos utilizados se presentan en la tabla B.9, en ella se especifica el tipo de vehículo, su identificador, los nodos origen

y destino de cada trayecto recorrido, y los tiempos de inicio, de servicio, de salida, de viaje y de arribo para el respectivo trayecto. En las dos últimas columnas se presenta la carga en masa en los nodos inicial y final del trayecto.

Tabla B.9: Informe de Rutas y tiempos instancia 1

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	1	2	9	99.0	31.0	130.0	81.5	211.5	329	1361
Van	1	9	10	211.5	22.0	233.5	60.0	293.5	1361	1361
Van	1	10	13	293.5	39.0	332.5	170.0	502.5	1361	1361
Van	1	13	1002	502.5	26.0	528.5	62.0	590.5	1361	0
Van	4	5	10	5.0	39.0	44.0	71.0	115.0	0	5000
Van	4	10	1005	115.0	39.0	154.0	71.0	225.0	5000	0
Van	6	2	8	99.0	31.0	130.0	111.0	241.0	0	1050
Van	6	8	10	312.0	26.0	338.0	228.0	566.0	1050	3050
Van	6	10	1002	566.0	39.0	605.0	140.5	745.5	3050	0
Truck	8	5	9	20.0	39.0	59.0	62.0	121.0	0	1727
Truck	8	9	13	249.0	22.0	271.0	121.0	392.0	1727	2809
Truck	8	13	1005	392.0	26.0	418.0	111.0	529.0	2809	0
Truck	10	3	10	137.0	40.0	177.0	20.5	197.5	1000	8000
Truck	10	10	1003	197.5	39.0	236.5	20.5	257.0	8000	0
Truck	11	5	10	3.0	39.0	42.0	71.0	113.0	290	8000
Truck	11	10	1005	113.0	39.0	152.0	71.0	223.0	8000	0
Truck	12	5	10	6.0	39.0	45.0	71.0	116.0	0	2772
Truck	12	10	1005	116.0	39.0	155.0	71.0	226.0	2772	0
Truck	13	5	10	4.0	39.0	43.0	71.0	114.0	1387	8000
Truck	13	10	1005	114.0	39.0	153.0	71.0	224.0	8000	0
Trailer	14	1	11	347.0	35.0	382.0	125.5	507.5	329	15000
Trailer	14	11	1001	507.5	29.0	536.5	125.5	662.0	15000	0
Trailer	15	2	11	99.0	31.0	130.0	53.0	183.0	671	4654
Trailer	15	11	1002	183.0	29.0	212.0	53.0	265.0	4654	0
Trailer	16	5	12	15.0	39.0	54.0	46.0	100.0	0	5432
Trailer	16	12	1005	142.0	34.0	176.0	46.0	222.0	5432	0
Trailer	17	6	12	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	562	15000
Trailer	17	12	1006	274.0	34.0	308.0	90.0	398.0	15000	0
Trailer	20	6	11	155.0	29.0	184.0	109.0	293.0	0	2077
Trailer	20	11	1006	293.0	29.0	322.0	109.0	431.0	2077	0
Trailer	21	1	9	347.0	35.0	382.0	155.0	537.0	747	15000
Trailer	21	9	1001	537.0	22.0	559.0	155.0	714.0	15000	0

Fuente: Resultados del modelo.

A modo de informe complementario para la tabla B.9, en la figura B.1 se presentan gráficamente las rutas, cada una en un color.

Un aspecto importante de la logística tanto inversa como directa tiene que ver con los volúmenes de materiales transportados en uno y otro sentido de la cadena de suministros. En la tabla B.10 se presenta, a modo de resumen, el listado de las entregas y recogidas especificando cantidades y tipos de productos por cada vehículo en cada nodo.

Tabla B.10: Entregas y recogidas instancia 1

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	1	2	9	B	329.00	0.00
Van	1	2	9	E	0.00	3403.00
Van	4	5	10	E	0.00	4185.00
Van	6	2	8	E	0.00	913.00
Van	6	2	10	E	0.00	4087.00
Truck	8	5	9	E	0.00	4087.00
Truck	8	5	9	F	0.00	306.00
Truck	8	5	13	F	0.00	3607.00
Truck	10	3	10	D	1000.00	0.00
Truck	11	5	10	C	290.00	0.00
Truck	11	5	10	E	0.00	8000.00
Truck	12	5	10	F	0.00	8000.00
Truck	13	5	10	A	1374.00	0.00
Truck	13	5	10	B	13.00	0.00
Truck	13	5	10	E	0.00	2365.00
Truck	13	5	10	F	0.00	5635.00
Trailer	14	1	11	B	329.00	0.00
Trailer	14	1	11	E	0.00	2528.00
Trailer	14	1	11	F	0.00	5613.00
Trailer	15	2	11	A	671.00	0.00
Trailer	15	2	11	E	0.00	6606.00
Trailer	16	5	12	E	0.00	8389.00
Trailer	16	5	12	F	0.00	6455.00
Trailer	17	6	12	A	48.00	0.00
Trailer	17	6	12	D	514.00	0.00
Trailer	17	6	12	F	0.00	879.00
Trailer	20	6	11	F	0.00	6455.00
Trailer	21	1	9	A	413.00	0.00
Trailer	21	1	9	B	334.00	0.00
Trailer	21	1	9	F	0.00	9206.00

Fuente: Resultados del modelo.

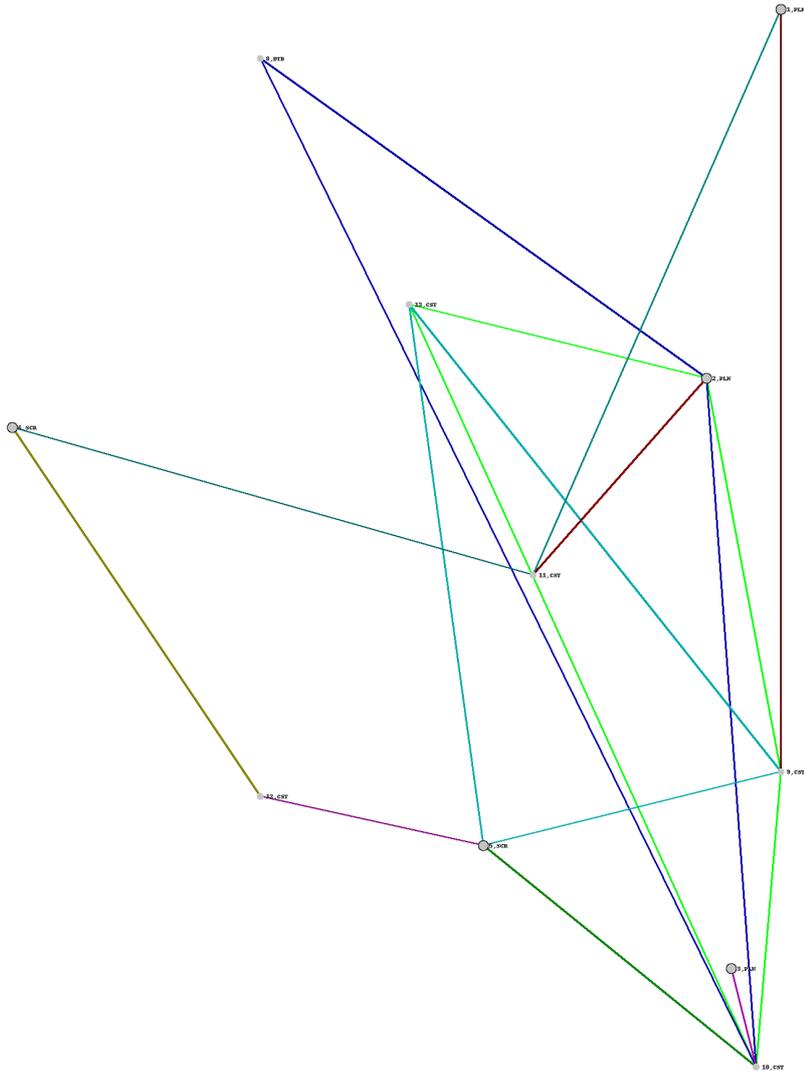


Figura B.1: Informe de rutas por vehículo para la instancia 1

La tabla B.11, presenta un resumen de la información asociada al uso de cada vehículo indicando el tipo de vehículo, su identificación, su carga inicial tanto en unidades de masa como de volumen, horas de inicio y fin de recorrido, y la distancia total recorrida.

Tabla B.11: Resumen por vehículo instancia 1

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visitados	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorrida
Van	1	329.00	329.00	3.00	99.00	1016.00	747.00
Van	4	0.00	0.00	1.00	5.00	1016.00	284.00
Van	6	0.00	0.00	2.00	99.00	1012.00	959.00
Truck	8	0.00	0.00	2.00	20.00	1018.00	588.00
Truck	10	1000.00	1000.00	1.00	137.00	1014.00	82.00
Truck	11	290.00	290.00	1.00	3.00	1020.00	284.00
Truck	12	0.00	0.00	1.00	6.00	1010.00	284.00
Truck	13	1387.00	1387.00	1.00	4.00	992.00	284.00
Trailer	14	329.00	329.00	1.00	347.00	992.00	502.00
Trailer	15	671.00	671.00	1.00	99.00	1012.00	212.00
Trailer	16	0.00	0.00	1.00	15.00	1020.00	184.00
Trailer	17	562.00	562.00	1.00	155.00	986.00	360.00
Trailer	20	0.00	0.00	1.00	155.00	1018.00	436.00
Trailer	21	747.00	747.00	1.00	347.00	1019.00	620.00

Fuente: Resultados del modelo.

Finalmente, en la tabla B.12 se presenta información relacionada con las ventanas de tiempo flexibles.

Tabla B.12: Ventanas de tiempo suaves instancia 1

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo holgura	Hora inicio
Van	1	9	10	0.0	37.5	0.0	0.0	310.5	0.0	211.5
Van	1	10	13	0.0	0.0	278.5	0.0	124.5	0.0	293.5

Continúa en la página siguiente...

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	1	13	1002	0.0	0.0	190.5	0.0	0.0	-	502.5
									425.5	
Van	1	2	9	0.0	0.0	0.0	247.5	0.0	0.0	99.0
Van	4	10	1005	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	-	115.0
									791.0	
Van	4	5	10	0.0	10.0	0.0	0.0	132.0	0.0	5.0
Van	6	8	10	0.0	0.0	0.0	0.0	583.0	0.0	312.0
Van	6	10	1002	0.0	0.0	551.0	0.0	0.0	-	566.0
									266.5	
Van	6	2	8	0.0	0.0	0.0	66.0	0.0	-71.0	99.0
Truck	8	5	9	0.0	0.0	5.0	210.0	0.0	-	20.0
									128.0	
Truck	8	9	13	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0	249.0
Truck	8	13	1005	0.0	0.0	80.0	0.0	0.0	-	392.0
									489.0	
Truck	10	3	10	0.0	0.0	0.0	0.0	214.5	0.0	137.0
Truck	10	10	1003	0.0	0.0	182.5	0.0	0.0	-	197.5
									757.0	
Truck	11	10	1005	0.0	0.0	98.0	0.0	0.0	-	113.0
									797.0	
Truck	11	5	10	0.0	12.0	0.0	0.0	130.0	0.0	3.0
Truck	12	10	1005	0.0	0.0	101.0	0.0	0.0	-	116.0
									784.0	
Truck	12	5	10	0.0	9.0	0.0	0.0	133.0	0.0	6.0
Truck	13	10	1005	0.0	0.0	99.0	0.0	0.0	-	114.0
									768.0	
Truck	13	5	10	0.0	11.0	0.0	0.0	131.0	0.0	4.0
Trailer	14	1	11	0.0	0.0	0.0	0.0	149.5	0.0	347.0
Trailer	14	11	1001	0.0	0.0	352.5	0.0	0.0	-	507.5
									330.0	
Trailer	15	11	1002	0.0	0.0	28.0	0.0	0.0	-	183.0
									747.0	
Trailer	15	2	11	0.0	0.0	0.0	175.0	0.0	0.0	99.0
Trailer	16	12	1005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	142.0
									798.0	
Trailer	16	5	12	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	-42.0	15.0
Trailer	17	6	12	0.0	0.0	0.0	0.0	143.0	0.0	155.0
Trailer	17	12	1006	0.0	0.0	132.0	0.0	0.0	-	274.0
									588.0	
Trailer	20	6	11	0.0	0.0	0.0	65.0	0.0	0.0	155.0
Trailer	20	11	1006	0.0	0.0	138.0	0.0	0.0	-	293.0
									587.0	
Trailer	21	1	9	0.0	0.0	0.0	0.0	78.0	0.0	347.0

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic- lida (i)	Tard- lida (i)	Antic- lada (j)	Tard- lada (j)	Tiempo hol- gura	Hora ini- cio
Trailer	21	9	1001	0.0	0.0	288.0	0.0	0.0	-	537.0
									305.0	

Fuente: Resultados del modelo.

La información asociada a las demás instancias mantiene la misma estructura, por lo cual sólo se muestran las respectivas tablas en cada una de las subsecciones siguientes.

B.2.2 Instancia dos primer periodo

Tabla B.13: Resumen de resultados instancia 2

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	6800.00
Fixed Transport Cost	400.00
Download Cost	8178.00
Load Cost	7182.00
Soft Time Windows Cost	2054.50
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	24614.50
Model name	AgregatedRichVRPData_2
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	1491
Number of linear constraints	2370
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	10982
Number of integer variables	252
Number of binary variables	252
Current relative MIP optimality gap	0.147494363079
Runtime for most recent optimization	0.07856798172
Number of solutions found	1
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.14: Informe de Rutas y tiempos instancia 2

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	3	8	13	227.5	26.0	253.5	58.5	312.0	4089	3115
Van	3	13	11	312.0	26.0	338.0	60.5	398.5	3115	3318
Van	3	11	12	398.5	29.0	427.5	71.0	498.5	3318	3115
Van	3	12	1008	498.5	34.0	532.5	150.0	682.5	3115	0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.15: Entregas y recogidas instancia 2

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	3	8	11	A	324.00	0.00
Van	3	8	11	C	163.00	0.00
Van	3	8	11	D	1195.00	0.00
Van	3	8	12	A	715.00	0.00
Van	3	8	13	A	1301.00	0.00
Van	3	8	13	B	391.00	0.00
Van	3	8	13	F	0.00	2394.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.16: Resumen por vehículo instancia 2

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visita-dos	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorri-da
Van	3	4089.00	4089.00	3.00	227.50	1012.00	680.00

Fuente: Resultados del modelo.

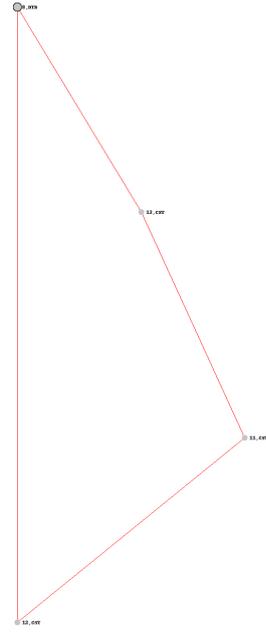


Figura B.2: Informe de rutas por vehículo para la instancia 2

Tabla B.17: Ventanas de tiempo suaves instancia 2

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic sa- lida (i)	Tard sa- lida (i)	Antic lle- gada (j)	Tard lle- gada (j)	Tiempo hol- gura	Hora ini- cio
Van	3	8	13	0.0	84.5	0.0	66.0	0.0	0.0	227.5
Van	3	13	11	0.0	0.0	0.0	0.0	40.5	0.0	312.0
Van	3	11	12	0.0	0.0	243.5	0.0	367.5	0.0	398.5
Van	3	12	1008	0.0	0.0	356.5	0.0	0.0	-	498.5
									329.5	

Fuente: Resultados del modelo.

B.2.3 Instancia tres segundo periodo

Tabla B.18: Resumen de resultados instancia 3

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	75845.00
Fixed Transport Cost	5400.00
Download Cost	53700.00
Load Cost	194016.00
Soft Time Windows Cost	15749.50
Wait for Openning Cost	0.00
TOTAL COST	344710.50
Model name	AgregatedRichVRPData_3
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	9723
Number of linear constraints	23522
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	193584
Number of integer variables	2352
Number of binary variables	2352
Current relative MIP optimality gap	0.174503404283
Runtime for most recent optimization	41.2617959976
Number of solutions found	3
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.19: Informe de Rutas y tiempos instancia 3

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	1	5	10	5.0	39.0	44.0	71.0	115.0	1355	3800
Van	1	10	1005	115.0	39.0	154.0	71.0	225.0	3800	0
Van	3	6	8	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	202	447
Van	3	8	13	274.0	26.0	300.0	58.5	358.5	447	1695
Van	3	13	10	358.5	26.0	384.5	170.0	554.5	1695	1868
Van	3	10	9	554.5	39.0	593.5	60.0	653.5	1868	1868
Van	3	9	1006	653.5	22.0	675.5	170.0	845.5	1868	0
Van	6	2	13	99.0	31.0	130.0	62.0	192.0	1288	2469
Van	6	13	10	312.0	26.0	338.0	170.0	508.0	2469	2469
Van	6	10	1002	508.0	39.0	547.0	140.5	687.5	2469	0
Truck	8	1	13	247.0	35.0	282.0	96.0	378.0	8000	6270
Truck	8	13	10	378.0	26.0	404.0	170.0	574.0	6270	8000
Truck	8	10	1001	574.0	39.0	613.0	215.0	828.0	8000	0
Truck	9	5	10	20.0	39.0	59.0	71.0	130.0	12	191
Truck	9	10	9	130.0	39.0	169.0	60.0	229.0	191	191
Truck	9	9	14	249.0	22.0	271.0	46.0	317.0	191	191
Truck	9	14	11	317.0	22.0	339.0	18.0	357.0	191	2358
Truck	9	11	1005	357.0	29.0	386.0	56.0	442.0	2358	0
Truck	12	3	14	137.0	40.0	177.0	74.5	251.5	2998	3000
Truck	12	14	11	251.5	22.0	273.5	18.0	291.5	3000	3000
Truck	12	11	9	291.5	29.0	320.5	64.0	384.5	3000	3000
Truck	12	9	10	384.5	22.0	406.5	60.0	466.5	3000	3000
Truck	12	10	1003	466.5	39.0	505.5	20.5	526.0	3000	0
Trailer	16	1	11	197.5	35.0	232.5	125.5	358.0	3773	7666
Trailer	16	11	9	358.0	29.0	387.0	64.0	451.0	7666	12425
Trailer	16	9	12	451.0	22.0	473.0	105.0	578.0	12425	15000
Trailer	16	12	1001	578.0	34.0	612.0	191.5	803.5	15000	0
Trailer	19	6	12	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	1999	5797
Trailer	19	12	1006	274.0	34.0	308.0	90.0	398.0	5797	0
Trailer	21	2	11	99.0	31.0	130.0	53.0	183.0	7223	8760
Trailer	21	11	9	183.0	29.0	212.0	64.0	276.0	8760	13369
Trailer	21	9	12	276.0	22.0	298.0	105.0	403.0	13369	15000
Trailer	21	12	1002	403.0	34.0	437.0	124.0	561.0	15000	0

Fuente: Resultados del modelo.

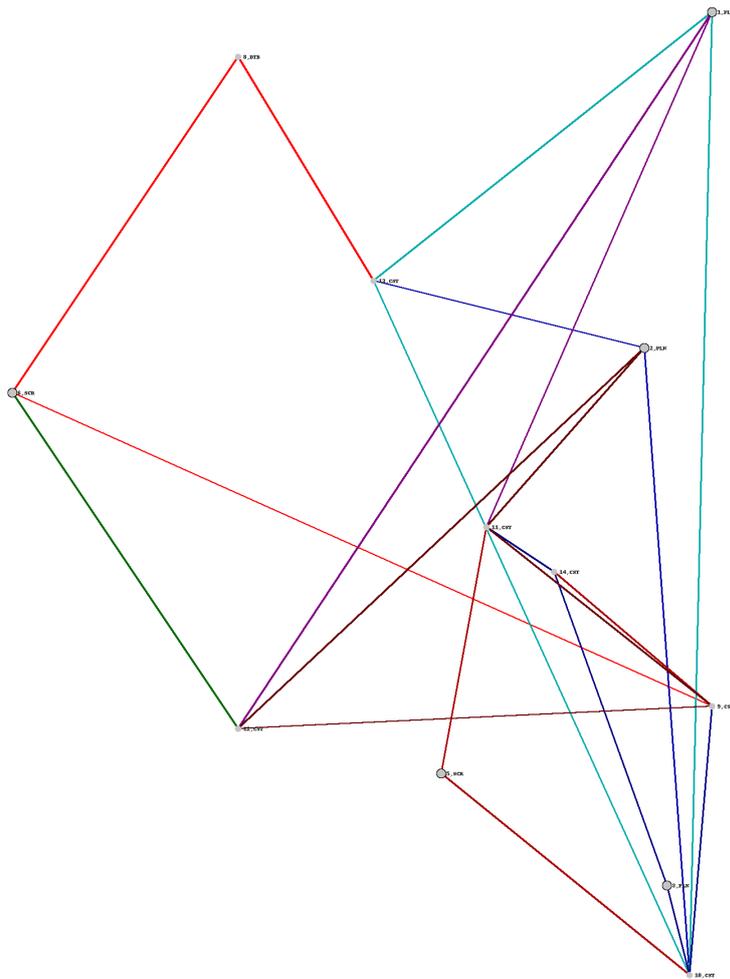


Figura B.3: Informe de rutas por vehículo para la instancia 3

Tabla B.20: Entregas y recogidas instancia 3

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	1	5	10	C	1239.23	0.00
Van	1	5	10	E	0.00	2332.00
Van	1	5	10	D	115.52	0.00
Van	1	5	10	F	0.00	2668.00
Van	3	6	8	E	0.00	613.00
Van	3	6	10	A	87.50	0.00
Van	3	6	10	C	10.77	0.00
Van	3	6	10	D	104.00	0.00
Van	3	6	10	F	0.00	1251.00
Van	3	6	13	E	0.00	3119.74
Van	6	2	10	A	1162.50	0.00
Van	6	2	10	E	0.00	1382.74
Van	6	2	13	A	126.00	0.00
Van	6	2	13	E	0.00	3267.26
Truck	8	1	10	B	1770.00	0.00
Truck	8	1	10	E	0.00	1285.26
Truck	8	1	10	F	0.00	484.74
Truck	8	1	13	A	305.00	0.00
Truck	8	1	13	B	5925.00	0.00
Truck	8	1	13	E	0.00	6230.00
Truck	9	5	9	C	10.77	0.00
Truck	9	5	9	D	0.67	0.00
Truck	9	5	9	F	0.00	11.44
Truck	9	5	10	F	0.00	595.26
Truck	9	5	11	D	0.15	0.00
Truck	9	5	11	F	0.00	7225.30
Truck	9	5	14	D	0.67	0.00
Truck	12	3	9	D	999.33	0.00
Truck	12	3	10	D	780.48	0.00
Truck	12	3	11	D	218.85	0.00
Truck	12	3	14	D	999.33	0.00
Trailer	16	1	9	B	1500.00	0.00
Trailer	16	1	9	E	0.00	5996.74
Trailer	16	1	9	F	0.00	5488.56
Trailer	16	1	11	B	1022.00	0.00
Trailer	16	1	11	F	0.00	953.70
Trailer	16	1	12	A	126.00	0.00
Trailer	16	1	12	B	1125.00	0.00
Trailer	16	1	12	F	0.00	1251.00
Trailer	19	6	12	A	162.50	0.00
Trailer	19	6	12	C	836.23	0.00
Trailer	19	6	12	E	0.00	1767.26

Continúa en la página siguiente...

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Trailer	19	6	12	D	1000.00	0.00
Trailer	19	6	12	F	0.00	3749.00
Trailer	21	2	9	A	5000.00	0.00
Trailer	21	2	9	C	0.23	0.00
Trailer	21	2	9	E	0.00	5525.26
Trailer	21	2	11	A	1250.00	0.00
Trailer	21	2	11	E	0.00	5742.00
Trailer	21	2	12	A	961.50	0.00
Trailer	21	2	12	C	10.77	0.00
Trailer	21	2	12	E	0.00	3732.74

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.21: Resumen por vehículo instancia 3

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visita-dos	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorri-da
Van	1	1354.75	1354.75	1.00	5.00	1016.00	284.00
Van	3	202.27	202.27	4.00	155.00	1012.00	1097.00
Van	6	1288.50	1288.50	2.00	99.00	1012.00	745.00
Truck	8	8000.00	8000.00	2.00	247.00	1018.00	962.00
Truck	9	12.25	12.25	4.00	20.00	1002.00	502.00
Truck	12	2998.00	2998.00	4.00	137.00	1010.00	474.00
Trailer	16	3773.00	3773.00	3.00	197.50	1020.00	972.00
Trailer	19	1998.73	1998.73	1.00	155.00	1017.00	360.00
Trailer	21	7222.50	7222.50	3.00	99.00	1019.00	692.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.22: Ventanas de tiempo suaves instancia 3

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic sa-lida (i)	Tard sa-lida (i)	Antic lle-gada (j)	Tard lle-gada (j)	Tiempo hol-gura	Hora ini-cio
Van	1	10	1005	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	-	115.0
									791.0	

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	1	5	10	0.0	10.0	0.0	0.0	132.0	0.0	5.0
Van	3	6	8	0.0	0.0	0.0	104.0	0.0	0.0	155.0
Van	3	8	13	0.0	38.0	0.0	19.5	0.0	0.0	274.0
Van	3	13	10	0.0	0.0	46.5	0.0	571.5	0.0	358.5
Van	3	10	9	0.0	0.0	539.5	0.0	194.5	0.0	554.5
Van	3	9	1006	0.0	0.0	404.5	0.0	0.0	-	653.5
									166.5	
Van	6	13	10	0.0	0.0	0.0	0.0	525.0	0.0	312.0
Van	6	10	1002	0.0	0.0	493.0	0.0	0.0	-	508.0
									324.5	
Van	6	2	13	0.0	0.0	0.0	66.0	0.0	-	99.0
									120.0	
Truck	8	1	13	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	247.0
Truck	8	13	10	0.0	0.0	66.0	0.0	591.0	0.0	378.0
Truck	8	10	1001	0.0	0.0	559.0	0.0	0.0	-	574.0
									190.0	
Truck	9	10	9	0.0	0.0	115.0	210.0	0.0	-20.0	130.0
Truck	9	5	10	0.0	0.0	5.0	0.0	147.0	0.0	20.0
Truck	9	9	14	0.0	0.0	0.0	142.0	0.0	0.0	249.0
Truck	9	14	11	0.0	0.0	68.0	1.0	0.0	0.0	317.0
Truck	9	11	1005	0.0	0.0	202.0	0.0	0.0	-	357.0
									560.0	
Truck	12	3	14	0.0	0.0	0.0	207.5	0.0	0.0	137.0
Truck	12	14	11	0.0	0.0	2.5	66.5	0.0	0.0	251.5
Truck	12	11	9	0.0	0.0	136.5	74.5	0.0	0.0	291.5
Truck	12	9	10	0.0	0.0	135.5	0.0	483.5	0.0	384.5
Truck	12	10	1003	0.0	0.0	451.5	0.0	0.0	-	466.5
									484.0	
Trailer	16	1	11	0.0	149.5	0.0	0.0	0.0	0.0	197.5
Trailer	16	11	9	0.0	0.0	203.0	8.0	0.0	0.0	358.0
Trailer	16	9	12	0.0	0.0	202.0	0.0	447.0	0.0	451.0
Trailer	16	12	1001	0.0	0.0	436.0	0.0	0.0	-	578.0
									216.5	
Trailer	19	6	12	0.0	0.0	0.0	0.0	143.0	0.0	155.0
Trailer	19	12	1006	0.0	0.0	132.0	0.0	0.0	-	274.0
									619.0	
Trailer	21	11	9	0.0	0.0	28.0	183.0	0.0	0.0	183.0
Trailer	21	9	12	0.0	0.0	27.0	0.0	272.0	0.0	276.0
Trailer	21	12	1002	0.0	0.0	261.0	0.0	0.0	-	403.0
									458.0	
Trailer	21	2	11	0.0	0.0	0.0	175.0	0.0	0.0	99.0

Fuente: Resultados del modelo.

B.2.4 Instancia cuatro tercer periodo

Tabla B.23: Resumen de resultados instancia 4

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	4740.00
Fixed Transport Cost	400.00
Download Cost	3560.00
Load Cost	0.00
Soft Time Windows Cost	394.00
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	9094.00
Model name	AgregatedRichVRPData_4
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	693
Number of linear constraints	810
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	2499
Number of integer variables	42
Number of binary variables	42
Current relative MIP optimality gap	0.0405975359238
Runtime for most recent optimization	0.0180430412292
Number of solutions found	1
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.24: Informe de Rutas y tiempos instancia 4

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	6	8	11	312.0	26.0	338.0	118.5	456.5	1780	0
Van	6	11	1008	456.5	29.0	485.5	118.5	604.0	0	0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.25: Entregas y recogidas instancia 4

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	6	8	11	C	1000.00	0.00
Van	6	8	11	D	780.00	0.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.26: Resumen por vehículo instancia 4

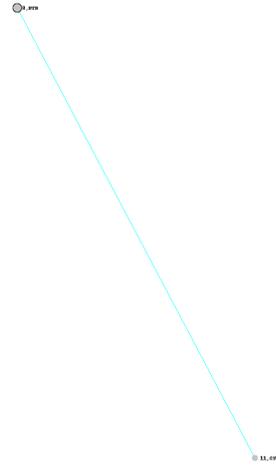
Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visitados	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorrida
Van	6	1780.00	1780.00	1.00	312.00	1012.00	474.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.27: Ventanas de tiempo suaves instancia 4

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	6	8	11	0.0	0.0	0.0	0.0	98.5	0.0	312.0
Van	6	11	1008	0.0	0.0	301.5	0.0	0.0	-	456.5
									408.0	

Fuente: Resultados del modelo.



B.2.5 Instancia cinco, cuarto periodo

Tabla B.28: Resumen de resultados instancia 5

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	90695.00
Fixed Transport Cost	8400.00
Download Cost	165294.00
Load Cost	103857.00
Soft Time Windows Cost	17386.00
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	385632.00
Model name	AgregatedRichVRPData_5
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	12558
Number of linear constraints	28137
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	242570
Number of integer variables	2646
Number of binary variables	2646
Current relative MIP optimality gap	0.186957369458
Runtime for most recent optimization	94.2376630306
Number of solutions found	3
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.29: Informe de Rutas y tiempos instancia 5

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	1	1	10	29.0	35.0	64.0	215.0	279.0	5000	5000
Van	1	10	12	279.0	39.0	318.0	114.0	432.0	5000	5000
Van	1	12	1001	432.0	34.0	466.0	191.5	657.5	5000	0
Van	3	4	12	111.0	27.0	138.0	62.5	200.5	2250	2250
Van	3	12	1004	200.5	34.0	234.5	62.5	297.0	2250	0
Truck	7	2	11	118.0	31.0	149.0	53.0	202.0	8000	8000
Truck	7	11	14	202.0	29.0	231.0	18.0	249.0	8000	8000
Truck	7	14	10	249.0	22.0	271.0	95.0	366.0	8000	8000

Continúa en la página siguiente...

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Truck	7	10	1002	366.0	39.0	405.0	140.5	545.5	8000	0
Truck	8	3	14	134.5	40.0	174.5	74.5	249.0	6844	6844
Truck	8	14	11	249.0	22.0	271.0	18.0	289.0	6844	6844
Truck	8	11	12	289.0	29.0	318.0	71.0	389.0	6844	6844
Truck	8	12	10	389.0	34.0	423.0	114.0	537.0	6844	6844
Truck	8	10	1003	537.0	39.0	576.0	20.5	596.5	6844	0
Truck	9	7	12	35.5	34.0	69.5	170.0	239.5	5720	7830
Truck	9	12	13	239.5	34.0	273.5	104.5	378.0	7830	8000
Truck	9	13	1007	378.0	26.0	404.0	114.0	518.0	8000	0
Truck	11	1	13	347.0	35.0	382.0	96.0	478.0	619	8000
Truck	11	13	1001	478.0	26.0	504.0	96.0	600.0	8000	0
Truck	12	8	10	22.0	26.0	48.0	228.0	276.0	5373	7384
Truck	12	10	9	276.0	39.0	315.0	60.0	375.0	7384	7384
Truck	12	9	14	375.0	22.0	397.0	46.0	443.0	7384	8000
Truck	12	14	13	443.0	22.0	465.0	76.5	541.5	8000	8000
Truck	12	13	1008	541.5	26.0	567.5	58.5	626.0	8000	0
Truck	13	1	13	347.0	35.0	382.0	96.0	478.0	8000	8000
Truck	13	13	1001	478.0	26.0	504.0	96.0	600.0	8000	0
Trailer	14	1	14	84.0	35.0	119.0	130.0	249.0	8071	14249
Trailer	14	14	12	249.0	22.0	271.0	78.5	349.5	14249	14249
Trailer	14	12	11	349.5	34.0	383.5	71.0	454.5	14249	15000
Trailer	14	11	1001	454.5	29.0	483.5	125.5	609.0	15000	0
Trailer	15	2	14	99.0	31.0	130.0	54.0	184.0	7864	15000
Trailer	15	14	9	391.0	22.0	413.0	46.0	459.0	15000	15000
Trailer	15	9	1002	459.0	22.0	481.0	81.5	562.5	15000	0
Trailer	17	6	12	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	7824	15000
Trailer	17	12	1006	274.0	34.0	308.0	90.0	398.0	15000	0
Trailer	20	5	9	20.0	39.0	59.0	62.0	121.0	8033	11322
Trailer	20	9	11	272.0	22.0	294.0	64.0	358.0	11322	15000
Trailer	20	11	1005	358.0	29.0	387.0	56.0	443.0	15000	0
Trailer	21	2	11	99.0	31.0	130.0	53.0	183.0	9049	12864
Trailer	21	11	1002	183.0	29.0	212.0	53.0	265.0	12864	0

Fuente: Resultados del modelo.

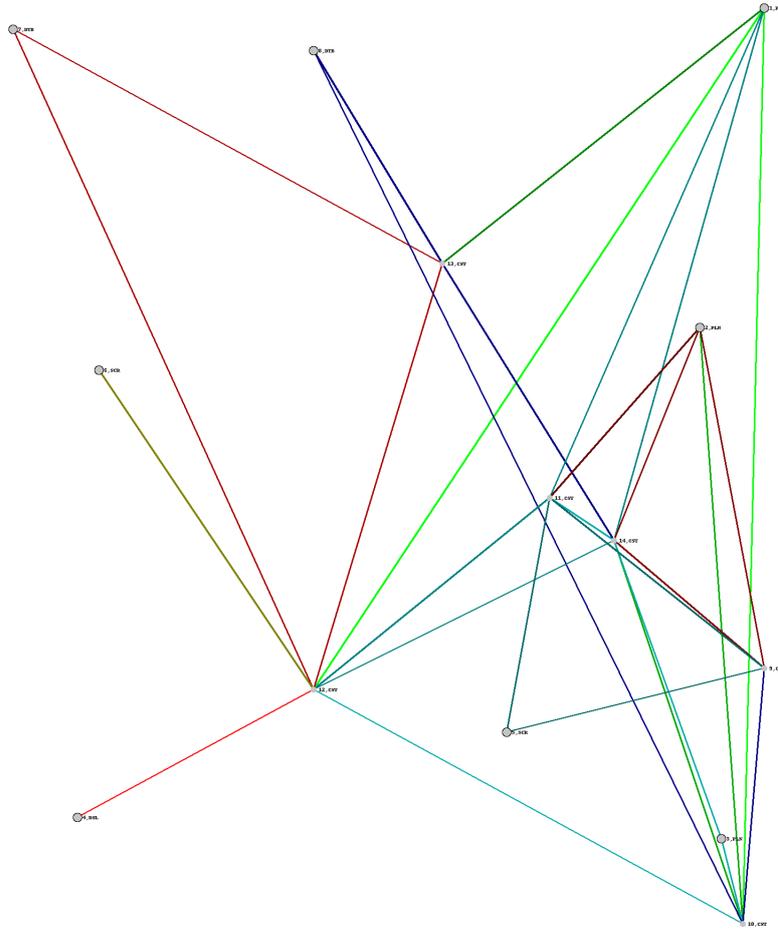


Figura B.5: Informe de rutas por vehículo para la instancia 5

Tabla B.30: Entregas y recogidas instancia 5

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	1	1	10	A	3250.00	0.00
Van	1	1	10	F	0.00	2000.00
Van	1	1	12	A	1750.00	0.00
Van	3	4	12	C	2250.00	0.00
Truck	7	2	10	A	8000.00	0.00
Truck	7	2	10	E	0.00	5000.00
Truck	8	3	10	D	1374.00	0.00
Truck	8	3	11	D	1000.00	0.00
Truck	8	3	12	D	2250.00	0.00
Truck	8	3	14	D	2220.00	0.00
Truck	9	7	12	A	2110.00	0.00
Truck	9	7	12	B	3610.00	0.00
Truck	11	1	13	B	619.00	0.00
Truck	11	1	13	E	0.00	2116.00
Truck	12	8	9	C	1366.00	0.00
Truck	12	8	9	B	323.00	0.00
Truck	12	8	10	C	1500.00	0.00
Truck	12	8	10	B	979.00	0.00
Truck	12	8	13	B	1205.00	0.00
Truck	13	1	13	A	7500.00	0.00
Truck	13	1	13	B	500.00	0.00
Truck	13	1	13	E	0.00	384.00
Truck	13	1	13	F	0.00	7616.00
Trailer	14	1	11	A	1615.00	0.00
Trailer	14	1	11	F	0.00	2503.00
Trailer	14	1	12	A	1252.00	0.00
Trailer	14	1	12	B	5204.00	0.00
Trailer	15	2	9	A	7500.00	0.00
Trailer	15	2	9	C	134.00	0.00
Trailer	15	2	9	B	230.00	0.00
Trailer	15	2	9	E	0.00	2500.00
Trailer	17	6	12	A	4138.00	0.00
Trailer	17	6	12	B	3686.00	0.00
Trailer	17	6	12	E	0.00	2500.00
Trailer	17	6	12	F	0.00	2500.00
Trailer	20	5	9	B	947.00	0.00
Trailer	20	5	9	D	1000.00	0.00
Trailer	20	5	9	F	0.00	3000.00
Trailer	20	5	11	A	836.00	0.00
Trailer	20	5	11	C	1500.00	0.00
Trailer	20	5	11	B	2500.00	0.00
Trailer	20	5	11	D	1250.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Trailer	20	5	11	F	0.00	2000.00
Trailer	21	2	11	A	8299.00	0.00
Trailer	21	2	11	C	750.00	0.00
Trailer	21	2	11	E	0.00	2500.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.31: Resumen por vehículo instancia 5

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visitados	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorrida
Van	1	5000.00	5000.00	2.00	29.00	1016.00	1041.00
Van	3	2250.00	2250.00	1.00	111.00	1012.00	250.00
Truck	7	8000.00	8000.00	3.00	118.00	1010.00	613.00
Truck	8	6844.00	6844.00	4.00	134.50	1018.00	596.00
Truck	9	5720.00	5720.00	2.00	35.50	1002.00	777.00
Truck	11	619.00	619.00	1.00	347.00	1020.00	384.00
Truck	12	5373.00	5373.00	4.00	22.00	1010.00	938.00
Truck	13	8000.00	8000.00	1.00	347.00	992.00	384.00
Trailer	14	8071.00	8071.00	3.00	84.00	992.00	810.00
Trailer	15	7864.00	7864.00	2.00	99.00	1012.00	363.00
Trailer	17	7824.00	7824.00	1.00	155.00	986.00	360.00
Trailer	20	8033.00	8033.00	2.00	20.00	1018.00	364.00
Trailer	21	9049.00	9049.00	1.00	99.00	1019.00	212.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.32: Ventanas de tiempo suaves instancia 5

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	1	10	12	0.0	0.0	264.0	0.0	301.0	0.0	279.0
Van	1	1	10	0.0	318.0	0.0	0.0	296.0	0.0	29.0
Van	1	12	1001	0.0	0.0	290.0	0.0	0.0	-	432.0
										358.5

Continúa en la página siguiente...

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	3	4	12	0.0	0.0	0.0	0.0	69.5	0.0	111.0
Van	3	12	1004	0.0	0.0	58.5	0.0	0.0	-	200.5
									715.0	
Truck	7	2	11	0.0	0.0	19.0	156.0	0.0	0.0	118.0
Truck	7	11	14	0.0	0.0	47.0	210.0	0.0	0.0	202.0
Truck	7	14	10	0.0	0.0	0.0	0.0	383.0	-0.0	249.0
Truck	7	10	1002	0.0	0.0	351.0	0.0	0.0	-	366.0
									464.5	
Truck	8	3	14	0.0	2.5	0.0	210.0	0.0	0.0	134.5
Truck	8	14	11	0.0	0.0	0.0	69.0	0.0	0.0	249.0
Truck	8	11	12	0.0	0.0	134.0	0.0	258.0	0.0	289.0
Truck	8	12	10	0.0	0.0	247.0	0.0	554.0	0.0	389.0
Truck	8	10	1003	0.0	0.0	522.0	0.0	0.0	-	537.0
									421.5	
Truck	9	12	13	0.0	0.0	97.5	0.0	0.0	0.0	239.5
Truck	9	7	12	0.0	106.5	0.0	0.0	108.5	0.0	35.5
Truck	9	13	1007	0.0	0.0	66.0	0.0	0.0	-	378.0
									484.0	
Truck	11	1	13	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	347.0
Truck	11	13	1001	0.0	0.0	166.0	0.0	0.0	-	478.0
									420.0	
Truck	12	8	10	0.0	290.0	0.0	0.0	293.0	0.0	22.0
Truck	12	10	9	0.0	0.0	261.0	84.0	0.0	0.0	276.0
Truck	12	9	14	0.0	0.0	126.0	16.0	0.0	0.0	375.0
Truck	12	14	13	0.0	0.0	194.0	0.0	163.5	0.0	443.0
Truck	12	13	1008	0.0	0.0	229.5	0.0	0.0	-	541.5
									384.0	
Truck	13	1	13	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	347.0
Truck	13	13	1001	0.0	0.0	166.0	0.0	0.0	-	478.0
									392.0	
Trailer	14	14	12	0.0	0.0	0.0	0.0	218.5	0.0	249.0
Trailer	14	12	11	0.0	0.0	207.5	0.0	96.5	0.0	349.5
Trailer	14	11	1001	0.0	0.0	299.5	0.0	0.0	-	454.5
									383.0	
Trailer	14	1	14	0.0	263.0	0.0	210.0	0.0	0.0	84.0
Trailer	15	14	9	0.0	0.0	142.0	0.0	0.0	-0.0	391.0
Trailer	15	9	1002	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									449.5	
Trailer	15	2	14	0.0	0.0	0.0	68.0	0.0	-	99.0
									207.0	
Trailer	17	6	12	0.0	0.0	0.0	0.0	143.0	0.0	155.0
Trailer	17	12	1006	0.0	0.0	132.0	0.0	0.0	-	274.0
									588.0	

Continúa en la página siguiente...

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Trailer	20	5	9	0.0	0.0	5.0	187.0	0.0	-	20.0
									151.0	
Trailer	20	9	11	0.0	0.0	23.0	0.0	0.0	-0.0	272.0
Trailer	20	11	1005	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	358.0
									575.0	
Trailer	21	11	1002	0.0	0.0	28.0	0.0	0.0	-	183.0
									754.0	
Trailer	21	2	11	0.0	0.0	0.0	175.0	0.0	0.0	99.0

Fuente: Resultados del modelo.

B.2.6 Instancia seis quinto periodo

Tabla B.33: Resumen de resultados instancia 6

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	82902.50
Fixed Transport Cost	6200.00
Download Cost	100326.00
Load Cost	91500.00
Soft Time Windows Cost	13876.00
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	294804.50
Model name	AgregatedRichVRPData_6
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	12558
Number of linear constraints	28137
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	244754
Number of integer variables	2646
Number of binary variables	2646
Current relative MIP optimality gap	0.237742398905
Runtime for most recent optimization	11.3256139755
Number of solutions found	2
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.34: Informe de Rutas y tiempos instancia 6

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	1	2	13	219.0	31.0	250.0	62.0	312.0	5000	5000
Van	1	13	12	312.0	26.0	338.0	104.5	442.5	5000	5000
Van	1	12	1002	442.5	34.0	476.5	124.0	600.5	5000	0
Van	2	2	10	38.0	31.0	69.0	140.5	209.5	130	0
Van	2	10	11	209.5	39.0	248.5	109.5	358.0	0	41
Van	2	11	1002	358.0	29.0	387.0	53.0	440.0	41	0
Van	3	1	13	347.0	35.0	382.0	96.0	478.0	3750	5000
Van	3	13	1001	478.0	26.0	504.0	96.0	600.0	5000	0
Van	4	1	11	197.5	35.0	232.5	125.5	358.0	5000	5000
Van	4	11	9	358.0	29.0	387.0	64.0	451.0	5000	5000
Van	4	9	10	451.0	22.0	473.0	60.0	533.0	5000	5000
Van	4	10	1001	533.0	39.0	572.0	215.0	787.0	5000	0
Van	5	4	12	111.0	27.0	138.0	62.5	200.5	2444	5000
Van	5	12	1004	200.5	34.0	234.5	62.5	297.0	5000	0
Van	6	7	11	142.0	34.0	176.0	166.5	342.5	2760	1420
Van	6	11	14	342.5	29.0	371.5	18.0	389.5	1420	2760
Van	6	14	1007	389.5	22.0	411.5	184.5	596.0	2760	0
Truck	9	1	13	181.0	35.0	216.0	96.0	312.0	7832	8000
Truck	9	13	12	312.0	26.0	338.0	104.5	442.5	8000	8000
Truck	9	12	11	442.5	34.0	476.5	71.0	547.5	8000	8000
Truck	9	11	1001	547.5	29.0	576.5	125.5	702.0	8000	0
Truck	10	5	12	15.0	39.0	54.0	46.0	100.0	1856	3057
Truck	10	12	11	142.0	34.0	176.0	71.0	247.0	3057	8000
Truck	10	11	14	358.0	29.0	387.0	18.0	405.0	8000	8000
Truck	10	14	1005	459.0	22.0	481.0	51.5	532.5	8000	0
Truck	11	6	11	155.0	29.0	184.0	109.0	293.0	3200	6415
Truck	11	11	14	293.0	29.0	322.0	18.0	340.0	6415	6415
Truck	11	14	9	340.0	22.0	362.0	46.0	408.0	6415	7100
Truck	11	9	10	408.0	22.0	430.0	60.0	490.0	7100	8000
Truck	11	10	1006	490.0	39.0	529.0	198.5	727.5	8000	0
Truck	12	2	11	99.0	31.0	130.0	53.0	183.0	8000	6444
Truck	12	11	14	183.0	29.0	212.0	18.0	230.0	6444	6444
Truck	12	14	9	249.0	22.0	271.0	46.0	317.0	6444	7000
Truck	12	9	10	317.0	22.0	339.0	60.0	399.0	7000	8000
Truck	12	10	1002	399.0	39.0	438.0	140.5	578.5	8000	0
Truck	13	8	11	267.5	26.0	293.5	118.5	412.0	1198	1199
Truck	13	11	14	412.0	29.0	441.0	18.0	459.0	1199	1199
Truck	13	14	1008	459.0	22.0	481.0	134.5	615.5	1199	0

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Trailer	18	3	12	112.0	40.0	152.0	101.0	253.0	8993	6600
Trailer	18	12	11	253.0	34.0	287.0	71.0	358.0	6600	15000
Trailer	18	11	14	358.0	29.0	387.0	18.0	405.0	15000	15000
Trailer	18	14	1003	459.0	22.0	481.0	74.5	555.5	15000	0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.35: Entregas y recogidas instancia 6

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	1	2	12	A	1168.00	0.00
Van	1	2	12	C	582.00	0.00
Van	1	2	12	E	0.00	2500.00
Van	1	2	13	A	3250.00	0.00
Van	1	2	13	E	0.00	1918.00
Van	2	2	10	A	130.00	0.00
Van	2	2	11	E	0.00	103.00
Van	3	1	13	B	3750.00	0.00
Van	3	1	13	E	0.00	582.00
Van	3	1	13	F	0.00	4000.00
Van	4	1	9	B	1250.00	0.00
Van	4	1	9	F	0.00	979.00
Van	4	1	10	B	2000.00	0.00
Van	4	1	10	F	0.00	1021.00
Van	4	1	11	B	1750.00	0.00
Van	5	4	12	C	2444.00	0.00
Van	6	7	11	C	2146.00	0.00
Van	6	7	14	C	614.00	0.00
Truck	9	1	11	B	2000.00	0.00
Truck	9	1	11	E	0.00	1918.00
Truck	9	1	12	A	2082.00	0.00
Truck	9	1	12	B	3750.00	0.00
Truck	9	1	12	F	0.00	2000.00
Truck	10	5	11	D	856.00	0.00
Truck	10	5	11	F	0.00	4000.00
Truck	10	5	12	C	224.00	0.00
Truck	10	5	12	F	0.00	2000.00
Truck	10	5	14	C	776.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Truck	11	6	9	C	806.00	0.00
Truck	11	6	9	D	1215.00	0.00
Truck	11	6	9	F	0.00	2021.00
Truck	11	6	10	E	0.00	2021.00
Truck	11	6	10	D	1000.00	0.00
Truck	11	6	10	F	0.00	1979.00
Truck	11	6	11	E	0.00	479.00
Truck	11	6	11	D	179.00	0.00
Truck	12	2	9	A	1500.00	0.00
Truck	12	2	9	C	444.00	0.00
Truck	12	2	9	E	0.00	2500.00
Truck	12	2	10	A	1870.00	0.00
Truck	12	2	10	C	1000.00	0.00
Truck	12	2	10	E	0.00	479.00
Truck	12	2	11	A	2082.00	0.00
Truck	12	2	11	C	1104.00	0.00
Truck	13	8	11	A	1168.00	0.00
Truck	13	8	14	C	30.00	0.00
Trailer	18	3	11	D	2215.00	0.00
Trailer	18	3	12	D	3250.00	0.00
Trailer	18	3	14	D	3528.00	0.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.36: Resumen por vehículo instancia 6

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visita-dos	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorri-da
Van	1	5000.00	5000.00	2.00	219.00	1016.00	581.00
Van	2	130.00	130.00	2.00	38.00	1012.00	606.00
Van	3	3750.00	3750.00	1.00	347.00	1012.00	384.00
Van	4	5000.00	5000.00	3.00	197.50	1016.00	929.00
Van	5	2444.00	2444.00	1.00	111.00	1012.00	250.00
Van	6	2760.00	2760.00	2.00	142.00	1012.00	738.00
Truck	9	7832.00	7832.00	3.00	181.00	1002.00	794.00
Truck	10	1856.00	1856.00	3.00	15.00	1014.00	373.00
Truck	11	3200.00	3200.00	4.00	155.00	1020.00	863.00
Truck	12	8000.00	8000.00	4.00	99.00	1010.00	635.00
Truck	13	1198.00	1198.00	2.00	267.50	992.00	542.00
Trailer	18	8993.00	8993.00	3.00	112.00	1016.00	529.00

Fuente: Resultados del modelo.

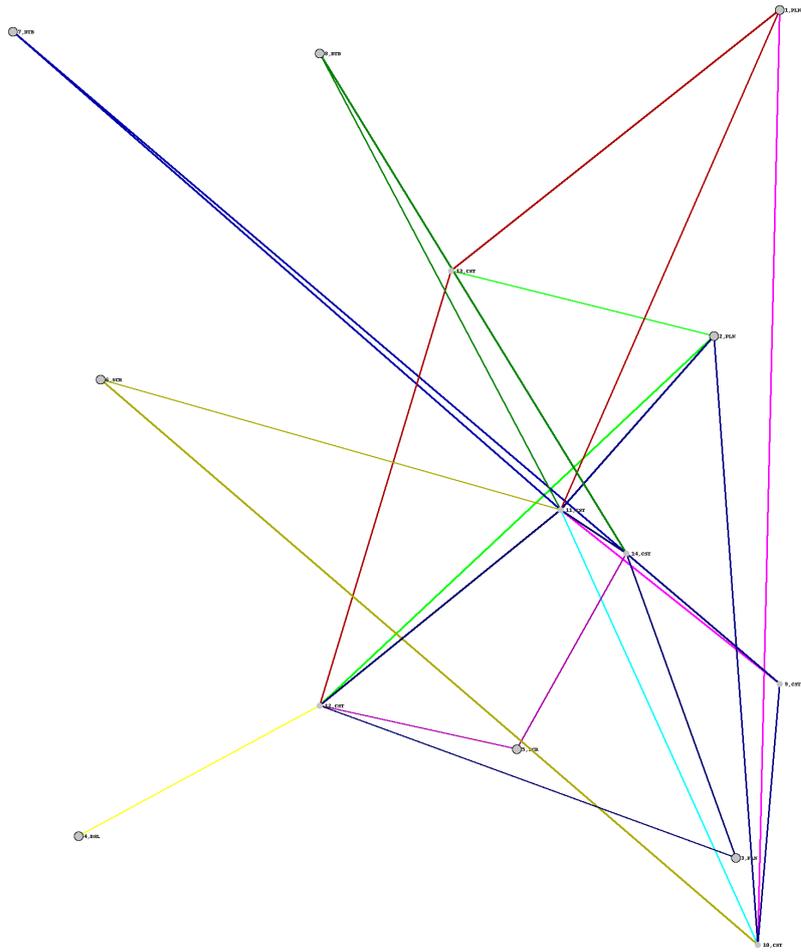


Figura B.6: Informe de rutas por vehículo para la instancia 6

Tabla B.37: Ventanas de tiempo suaves instancia 6

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic sa- lida (i)	Tard sa- lida (i)	Antic lle- gada (j)	Tard lle- gada (j)	Tiempo hol- gura	Hora ini- cio
Van	1	2	13	0.0	0.0	120.0	66.0	0.0	0.0	219.0
Van	1	13	12	0.0	0.0	0.0	0.0	311.5	0.0	312.0
Van	1	12	1002	0.0	0.0	300.5	0.0	0.0	-	442.5
										415.5
Van	2	10	11	0.0	0.0	194.5	0.0	0.0	0.0	209.5
Van	2	11	1002	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	358.0
										572.0
Van	2	2	10	0.0	61.0	0.0	0.0	226.5	0.0	38.0
Van	3	1	13	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	347.0
Van	3	13	1001	0.0	0.0	166.0	0.0	0.0	-	478.0
										412.0
Van	4	1	11	0.0	149.5	0.0	0.0	0.0	0.0	197.5
Van	4	11	9	0.0	0.0	203.0	8.0	0.0	0.0	358.0
Van	4	9	10	0.0	0.0	202.0	0.0	550.0	0.0	451.0
Van	4	10	1001	0.0	0.0	518.0	0.0	0.0	-	533.0
										229.0
Van	5	4	12	0.0	0.0	0.0	0.0	69.5	0.0	111.0
Van	5	12	1004	0.0	0.0	58.5	0.0	0.0	-	200.5
										715.0
Van	6	7	11	0.0	0.0	0.0	15.5	0.0	0.0	142.0
Van	6	11	14	0.0	0.0	187.5	69.5	0.0	0.0	342.5
Van	6	14	1007	0.0	0.0	140.5	0.0	0.0	-	389.5
										416.0
Truck	9	1	13	0.0	166.0	0.0	66.0	0.0	0.0	181.0
Truck	9	13	12	0.0	0.0	0.0	0.0	311.5	0.0	312.0
Truck	9	12	11	0.0	0.0	300.5	0.0	189.5	0.0	442.5
Truck	9	11	1001	0.0	0.0	392.5	0.0	0.0	-	547.5
										300.0
Truck	10	12	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	142.0
										111.0
Truck	10	5	12	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	-42.0	15.0
Truck	10	11	14	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-54.0	358.0
Truck	10	14	1005	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
										481.5
Truck	11	6	11	0.0	0.0	0.0	65.0	0.0	0.0	155.0
Truck	11	11	14	0.0	0.0	138.0	119.0	0.0	0.0	293.0
Truck	11	14	9	0.0	0.0	91.0	51.0	0.0	0.0	340.0
Truck	11	9	10	0.0	0.0	159.0	0.0	507.0	0.0	408.0

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Truck	11	10	1006	0.0	0.0	475.0	0.0	0.0	-	490.0
									292.5	
Truck	12	11	14	0.0	0.0	28.0	210.0	0.0	-19.0	183.0
Truck	12	14	9	0.0	0.0	0.0	142.0	0.0	0.0	249.0
Truck	12	9	10	0.0	0.0	68.0	0.0	416.0	0.0	317.0
Truck	12	10	1002	0.0	0.0	384.0	0.0	0.0	-	399.0
									431.5	
Truck	12	2	11	0.0	0.0	0.0	175.0	0.0	0.0	99.0
Truck	13	8	11	0.0	44.5	0.0	0.0	54.0	0.0	267.5
Truck	13	11	14	0.0	0.0	257.0	0.0	0.0	0.0	412.0
Truck	13	14	1008	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									376.5	
Trailer	18	3	12	0.0	25.0	0.0	0.0	122.0	0.0	112.0
Trailer	18	12	11	0.0	0.0	111.0	0.0	0.0	0.0	253.0
Trailer	18	11	14	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-54.0	358.0
Trailer	18	14	1003	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									460.5	

Fuente: Resultados del modelo.

B.2.7 Instancia siete quinto periodo

Tabla B.38: Resumen de resultados instancia 7

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	115525.00
Fixed Transport Cost	12000.00
Download Cost	109444.00
Load Cost	249774.00
Soft Time Windows Cost	19659.00
Wait for Opening Cost	0.00
TOTAL COST	506402.00
Model name	AgregatedRichVRPData_7
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	12558
Number of linear constraints	28137
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	248030

Continúa en la página siguiente...

Concepto	Valor
Number of integer variables	2646
Number of binary variables	2646
Current relative MIP optimality gap	0.18553724855
Runtime for most recent optimization	44.9182858467
Number of solutions found	3
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.39: Informe de Rutas y tiempos instancia 7

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Van	1	2	13	53.5	31.0	84.5	62.0	146.5	5000	2706
Van	1	13	14	146.5	26.0	172.5	76.5	249.0	2706	2706
Van	1	14	9	249.0	22.0	271.0	46.0	317.0	2706	2706
Van	1	9	11	317.0	22.0	339.0	64.0	403.0	2706	2706
Van	1	11	10	403.0	29.0	432.0	109.5	541.5	2706	3000
Van	1	10	12	541.5	39.0	580.5	114.0	694.5	3000	5000
Van	1	12	1002	694.5	34.0	728.5	124.0	852.5	5000	0
Van	3	7	14	142.0	34.0	176.0	184.5	360.5	222	5000
Van	3	14	1007	459.0	22.0	481.0	184.5	665.5	5000	0
Van	4	3	12	112.0	40.0	152.0	101.0	253.0	3251	5000
Van	4	12	11	253.0	34.0	287.0	71.0	358.0	5000	5000
Van	4	11	1003	358.0	29.0	387.0	89.5	476.5	5000	0
Van	5	4	12	111.0	27.0	138.0	62.5	200.5	3240	5000
Van	5	12	1004	200.5	34.0	234.5	62.5	297.0	5000	0
Van	6	2	9	99.0	31.0	130.0	81.5	211.5	5000	5000
Van	6	9	13	211.5	22.0	233.5	121.0	354.5	5000	5000
Van	6	13	11	354.5	26.0	380.5	60.5	441.0	5000	5000
Van	6	11	10	441.0	29.0	470.0	109.5	579.5	5000	5000
Van	6	10	1002	579.5	39.0	618.5	140.5	759.0	5000	0
Truck	7	2	11	274.0	31.0	305.0	53.0	358.0	5000	8000
Truck	7	11	1002	358.0	29.0	387.0	53.0	440.0	8000	0
Truck	8	5	10	20.0	39.0	59.0	71.0	130.0	0	4693
Truck	8	10	1005	130.0	39.0	169.0	71.0	240.0	4693	0
Truck	9	1	13	181.0	35.0	216.0	96.0	312.0	7288	6723
Truck	9	13	9	312.0	26.0	338.0	121.0	459.0	6723	8000
Truck	9	9	10	459.0	22.0	481.0	60.0	541.0	8000	8000
Truck	9	10	1001	541.0	39.0	580.0	215.0	795.0	8000	0

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Truck	10	8	13	312.0	26.0	338.0	58.5	396.5	0	5814
Truck	10	13	1008	396.5	26.0	422.5	58.5	481.0	5814	0
Truck	11	5	10	3.0	39.0	42.0	71.0	113.0	0	3200
Truck	11	10	1005	113.0	39.0	152.0	71.0	223.0	3200	0
Truck	12	3	14	137.0	40.0	177.0	74.5	251.5	3749	8000
Truck	12	14	10	251.5	22.0	273.5	95.0	368.5	8000	8000
Truck	12	10	1003	368.5	39.0	407.5	20.5	428.0	8000	0
Trailer	14	6	12	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	3037	8549
Trailer	14	12	1006	274.0	34.0	308.0	90.0	398.0	8549	0
Trailer	15	5	9	15.0	39.0	54.0	62.0	116.0	1286	15000
Trailer	15	9	1005	459.0	22.0	481.0	62.0	543.0	15000	0
Trailer	16	5	11	15.0	39.0	54.0	56.0	110.0	0	15000
Trailer	16	11	1005	358.0	29.0	387.0	56.0	443.0	15000	0
Trailer	17	2	14	99.0	31.0	130.0	54.0	184.0	5230	5528
Trailer	17	14	9	391.0	22.0	413.0	46.0	459.0	5528	9034
Trailer	17	9	1002	459.0	22.0	481.0	81.5	562.5	9034	0
Trailer	18	5	12	18.0	39.0	57.0	46.0	103.0	222	11022
Trailer	18	12	1005	142.0	34.0	176.0	46.0	222.0	11022	0
Trailer	19	6	12	155.0	29.0	184.0	90.0	274.0	0	11022
Trailer	19	12	1006	274.0	34.0	308.0	90.0	398.0	11022	0
Trailer	20	1	12	29.0	35.0	64.0	191.5	255.5	10250	13951
Trailer	20	12	11	255.5	34.0	289.5	71.0	360.5	13951	15000
Trailer	20	11	1001	360.5	29.0	389.5	125.5	515.0	15000	0
Trailer	21	8	14	298.5	26.0	324.5	134.5	459.0	1947	1947
Trailer	21	14	9	459.0	22.0	481.0	46.0	527.0	1947	4254
Trailer	21	9	1008	527.0	22.0	549.0	179.0	728.0	4254	0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.40: Entregas y recogidas instancia 7

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	1	2	10	A	500.00	0.00
Van	1	2	11	C	2000.00	0.00
Van	1	2	12	E	0.00	1984.00
Van	1	2	13	A	2500.00	0.00
Van	1	2	13	E	0.00	516.00
Van	3	7	14	C	222.00	0.00

Continúa en la página siguiente...

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Van	4	3	11	D	3250.00	0.00
Van	4	3	12	D	1.00	0.00
Van	5	4	12	D	3240.00	0.00
Van	6	2	10	A	3250.00	0.00
Van	6	2	10	C	1750.00	0.00
Van	6	2	10	E	0.00	2984.00
Truck	7	2	11	A	3750.00	0.00
Truck	7	2	11	C	1250.00	0.00
Truck	7	2	11	E	0.00	3280.00
Truck	8	5	10	E	0.00	8000.00
Truck	9	1	9	B	1038.00	0.00
Truck	9	1	10	B	1750.00	0.00
Truck	9	1	13	A	1250.00	0.00
Truck	9	1	13	B	3250.00	0.00
Truck	9	1	13	E	0.00	2622.00
Truck	10	8	13	E	0.00	3000.00
Truck	10	8	13	F	0.00	5000.00
Truck	11	5	10	E	0.00	3796.00
Truck	12	3	10	D	1750.00	0.00
Truck	12	3	14	D	1999.00	0.00
Trailer	14	6	12	C	3028.00	0.00
Trailer	14	6	12	D	9.00	0.00
Trailer	14	6	12	F	0.00	15000.00
Trailer	15	5	9	C	298.00	0.00
Trailer	15	5	9	E	0.00	9263.00
Trailer	15	5	9	D	988.00	0.00
Trailer	15	5	9	F	0.00	3000.00
Trailer	16	5	11	E	0.00	10000.00
Trailer	16	5	11	F	0.00	5000.00
Trailer	17	2	9	A	1000.00	0.00
Trailer	17	2	9	C	1202.00	0.00
Trailer	17	2	14	C	3028.00	0.00
Trailer	18	5	12	C	222.00	0.00
Trailer	18	5	12	E	0.00	3769.00
Trailer	19	6	12	E	0.00	2527.00
Trailer	19	6	12	F	0.00	3000.00
Trailer	20	1	11	B	3250.00	0.00
Trailer	20	1	12	A	3750.00	0.00
Trailer	20	1	12	B	3250.00	0.00
Trailer	21	8	9	B	462.00	0.00
Trailer	21	8	9	E	0.00	517.00
Trailer	21	8	9	D	512.00	0.00
Trailer	21	8	14	D	973.00	0.00

Fuente: Resultados del modelo.

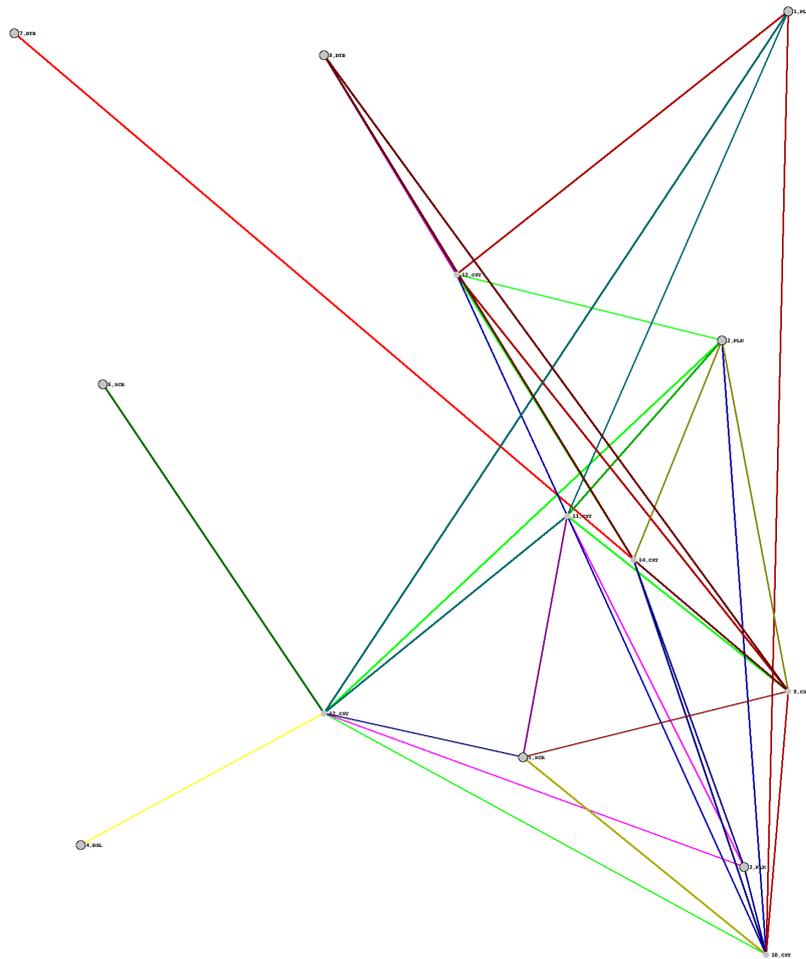


Figura B.7: Informe de rutas por vehículo para la instancia 7

Tabla B.41: Resumen por vehículo instancia 7

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visita-dos	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorri-da
Van	1	5000.00	5000.00	6.00	53.50	1016.00	1192.00
Van	3	222.00	222.00	1.00	142.00	1012.00	738.00
Van	4	3251.00	3251.00	2.00	112.00	1016.00	523.00
Van	5	3240.00	3240.00	1.00	111.00	1012.00	250.00
Van	6	5000.00	5000.00	4.00	99.00	1012.00	1026.00
Truck	7	5000.00	5000.00	1.00	274.00	1010.00	212.00
Truck	8	0.00	0.00	1.00	20.00	1018.00	284.00
Truck	9	7288.00	7288.00	3.00	181.00	1002.00	984.00
Truck	10	0.00	0.00	1.00	312.00	1014.00	234.00
Truck	11	0.00	0.00	1.00	3.00	1020.00	284.00
Truck	12	3749.00	3749.00	2.00	137.00	1010.00	380.00
Trailer	14	3037.00	3037.00	1.00	155.00	992.00	360.00
Trailer	15	1286.00	1286.00	1.00	15.00	1012.00	248.00
Trailer	16	0.00	0.00	1.00	15.00	1020.00	224.00
Trailer	17	5230.00	5230.00	2.00	99.00	986.00	363.00
Trailer	18	222.00	222.00	1.00	18.00	1016.00	184.00
Trailer	19	0.00	0.00	1.00	155.00	1017.00	360.00
Trailer	20	10250.00	10250.00	2.00	29.00	1018.00	776.00
Trailer	21	1947.00	1947.00	2.00	298.50	1019.00	719.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.42: Ventanas de tiempo suaves instancia 7

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic lida (i)	Tard sa-lida (i)	Antic lle-gada (j)	Tard lle-gada (j)	Tiempo hol-gura	Hora ini-cio
Van	1	13	14	0.0	165.5	0.0	210.0	0.0	0.0	146.5
Van	1	14	9	0.0	0.0	0.0	142.0	0.0	0.0	249.0
Van	1	9	11	0.0	0.0	68.0	0.0	45.0	0.0	317.0
Van	1	11	10	0.0	0.0	248.0	0.0	558.5	0.0	403.0
Van	1	2	13	0.0	45.5	0.0	231.5	0.0	0.0	53.5
Van	1	10	12	0.0	0.0	526.5	0.0	563.5	0.0	541.5
Van	1	12	1002	0.0	0.0	552.5	0.0	0.0	-	694.5
									163.5	

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Van	3	7	14	0.0	0.0	-0.0	0.0	0.0	-98.5	142.0
Van	3	14	1007	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									346.5	
Van	4	3	12	0.0	25.0	0.0	0.0	122.0	0.0	112.0
Van	4	12	11	0.0	0.0	111.0	0.0	0.0	0.0	253.0
Van	4	11	1003	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	358.0
									539.5	
Van	5	4	12	0.0	0.0	0.0	0.0	69.5	0.0	111.0
Van	5	12	1004	0.0	0.0	58.5	0.0	0.0	-	200.5
									715.0	
Van	6	9	13	0.0	37.5	0.0	23.5	0.0	0.0	211.5
Van	6	13	11	0.0	0.0	42.5	0.0	83.0	0.0	354.5
Van	6	11	10	0.0	0.0	286.0	0.0	596.5	0.0	441.0
Van	6	10	1002	0.0	0.0	564.5	0.0	0.0	-	579.5
									253.0	
Van	6	2	9	0.0	0.0	0.0	247.5	0.0	0.0	99.0
Truck	7	2	11	0.0	0.0	175.0	0.0	0.0	0.0	274.0
Truck	7	11	1002	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	358.0
									570.0	
Truck	8	10	1005	0.0	0.0	115.0	0.0	0.0	-	130.0
									778.0	
Truck	8	5	10	0.0	0.0	5.0	0.0	147.0	0.0	20.0
Truck	9	1	13	0.0	166.0	0.0	66.0	0.0	0.0	181.0
Truck	9	13	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	312.0
Truck	9	9	10	0.0	0.0	210.0	0.0	558.0	0.0	459.0
Truck	9	10	1001	0.0	0.0	526.0	0.0	0.0	-	541.0
									207.0	
Truck	10	8	13	0.0	0.0	0.0	0.0	18.5	0.0	312.0
Truck	10	13	1008	0.0	0.0	84.5	0.0	0.0	-	396.5
									533.0	
Truck	11	10	1005	0.0	0.0	98.0	0.0	0.0	-	113.0
									797.0	
Truck	11	5	10	0.0	12.0	0.0	0.0	130.0	0.0	3.0
Truck	12	3	14	0.0	0.0	0.0	207.5	0.0	0.0	137.0
Truck	12	14	10	0.0	0.0	2.5	0.0	385.5	0.0	251.5
Truck	12	10	1003	0.0	0.0	353.5	0.0	0.0	-	368.5
									582.0	
Trailer	14	6	12	0.0	0.0	0.0	0.0	143.0	0.0	155.0
Trailer	14	12	1006	0.0	0.0	132.0	0.0	0.0	-	274.0
									594.0	
Trailer	15	5	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	15.0
									343.0	

Continúa en la página siguiente...

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic salida (i)	Tard salida (i)	Antic llegada (j)	Tard llegada (j)	Tiempo hol-gura	Hora inicio
Trailer	15	9	1005	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									469.0	
Trailer	16	5	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	15.0
									248.0	
Trailer	16	11	1005	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	358.0
									577.0	
Trailer	17	14	9	0.0	0.0	142.0	0.0	0.0	-0.0	391.0
Trailer	17	9	1002	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	459.0
									423.5	
Trailer	17	2	14	0.0	0.0	0.0	68.0	0.0	-	99.0
									207.0	
Trailer	18	12	1005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	142.0
									794.0	
Trailer	18	5	12	0.0	0.0	3.0	0.0	11.0	-39.0	18.0
Trailer	19	6	12	0.0	0.0	0.0	0.0	143.0	-0.0	155.0
Trailer	19	12	1006	0.0	0.0	132.0	0.0	0.0	-	274.0
									619.0	
Trailer	20	12	11	0.0	0.0	113.5	0.0	2.5	0.0	255.5
Trailer	20	1	12	0.0	318.0	0.0	0.0	124.5	0.0	29.0
Trailer	20	11	1001	0.0	0.0	205.5	0.0	0.0	-	360.5
									503.0	
Trailer	21	8	14	0.0	13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	298.5
Trailer	21	14	9	0.0	0.0	210.0	0.0	68.0	0.0	459.0
Trailer	21	9	1008	0.0	0.0	278.0	0.0	0.0	-	527.0
									291.0	

Fuente: Resultados del modelo.

B.2.8 Instancia ocho sexto periodo

Tabla B.43: Resumen de resultados instancia 8

Concepto	Valor
Variable Transport Cost	34270.00
Fixed Transport Cost	4000.00
Download Cost	0.00
Load Cost	166500.00
Soft Time Windows Cost	4246.00
Wait for Openning Cost	0.00

Continúa en la página siguiente...

B.2 Resultados del modelo de ruteo de vehículos

Concepto	Valor
TOTAL COST	209016.00
Model name	AgregatedRichVRPData_8
Model sense (minimization or maximization)	1
Number of variables	4851
Number of linear constraints	9606
Number of SOS constraints	0
Number of non-zero coefficients in the constraint matrix	61491
Number of integer variables	1050
Number of binary variables	1050
Current relative MIP optimality gap	0.101707967161
Runtime for most recent optimization	0.897678852081
Number of solutions found	1
Number of branch-and-cut nodes explored in most recent optimization	0.0

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.44: Informe de Rutas y tiempos instancia 8

Tipo Veh.	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Hora inicio (i)	Tiempo serv (i)	Hora sal (i)	Tiempo viaje (i,j)	Hora lleg (j)	Carga masa (i)	Carga masa (j)
Truck	9	5	9	20.0	39.0	59.0	62.0	121.0	0	1550
Truck	9	9	10	249.0	22.0	271.0	60.0	331.0	1550	8000
Truck	9	10	1005	331.0	39.0	370.0	71.0	441.0	8000	0
Truck	10	8	13	312.0	26.0	338.0	58.5	396.5	0	8000
Truck	10	13	1008	396.5	26.0	422.5	58.5	481.0	8000	0
Truck	12	8	10	312.0	26.0	338.0	228.0	566.0	0	8000
Truck	12	10	1008	566.0	39.0	605.0	228.0	833.0	8000	0
Truck	13	5	13	15.0	39.0	54.0	111.0	165.0	0	8000
Truck	13	13	1005	378.0	26.0	404.0	111.0	515.0	8000	0
Trailer	14	5	12	15.0	39.0	54.0	46.0	100.0	0	14600
Trailer	14	12	9	142.0	34.0	176.0	105.0	281.0	14600	15000
Trailer	14	9	1005	459.0	22.0	481.0	62.0	543.0	15000	0
Trailer	18	2	11	99.0	31.0	130.0	53.0	183.0	0	15000
Trailer	18	11	1002	358.0	29.0	387.0	53.0	440.0	15000	0

Fuente: Resultados del modelo.

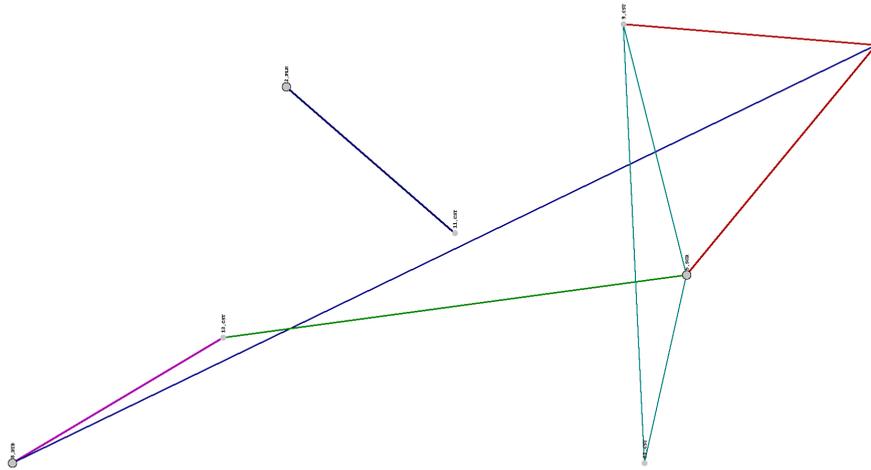


Figura B.8: Informe de rutas por vehículo para la instancia 8

Tabla B.45: Entregas y recogidas instancia 8

Tipo Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Producto	Cantidad entregad	Cantidad recogida
Truck	9	5	9	E	0.00	2000.00
Truck	9	5	9	F	0.00	2500.00
Truck	9	5	10	E	0.00	1500.00
Truck	9	5	10	F	0.00	500.00
Truck	10	8	13	E	0.00	6500.00
Truck	10	8	13	F	0.00	1500.00
Truck	12	8	10	F	0.00	6000.00
Truck	13	5	13	F	0.00	6000.00
Trailer	14	5	9	E	0.00	1000.00
Trailer	14	5	12	E	0.00	6500.00
Trailer	14	5	12	F	0.00	7500.00
Trailer	18	2	11	E	0.00	6500.00
Trailer	18	2	11	F	0.00	7500.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.46: Resumen por vehículo instancia 8

Tipo Veh	Veh Id	Carga Inicial (Masa)	Carga Inicial (Volm)	Nodos visita-dos	Hora salida	Hora llegada	Distancia recorri-da
Truck	9	0.00	0.00	2.00	20.00	1002.00	386.00
Truck	10	0.00	0.00	1.00	312.00	1014.00	234.00
Truck	12	0.00	0.00	1.00	312.00	1010.00	912.00
Truck	13	0.00	0.00	1.00	15.00	992.00	444.00
Trailer	14	0.00	0.00	2.00	15.00	992.00	426.00
Trailer	18	0.00	0.00	1.00	99.00	1016.00	212.00

Fuente: Resultados del modelo.

Tabla B.47: Ventanas de tiempo suaves instancia 8

Tipo de Veh	Veh Id	Origen (i)	Destino (j)	Espera (i)	Antic sa- lida (i)	Tard sa- lida (i)	Antic lle- gada (j)	Tard lle- gada (j)	Tiempo hol- gura	Hora ini- cio
Truck	9	5	9	0.0	0.0	5.0	210.0	0.0	-	20.0
Truck	9	9	10	0.0	0.0	0.0	0.0	348.0	0.0	128.0
Truck	9	10	1005	0.0	0.0	316.0	0.0	0.0	-	249.0
Truck	10	8	13	0.0	0.0	0.0	0.0	18.5	0.0	331.0
Truck	10	13	1008	0.0	0.0	84.5	0.0	0.0	-	561.0
Truck	12	8	10	0.0	0.0	0.0	0.0	583.0	0.0	312.0
Truck	12	10	1008	0.0	0.0	551.0	0.0	0.0	-	396.5
Truck	13	5	13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	533.0
Truck	13	13	1005	0.0	0.0	66.0	0.0	0.0	-	312.0
Trailer	14	12	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	566.0
Trailer	14	5	12	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	-42.0	177.0
Trailer	14	9	1005	0.0	0.0	210.0	0.0	0.0	-	213.0
Trailer	18	11	1002	0.0	0.0	203.0	0.0	0.0	-	378.0
Trailer	18	2	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	477.0
									-	142.0
									-	178.0
									-	15.0
									-	459.0
									-	449.0
									-	358.0
									-	576.0
									-	99.0
									-	175.0

Fuente: Resultados del modelo.

Bibliografía

Referencias

- Agra, A., Christiansen, M., Figueiredo, R., Hvattum, L. M., Poss, M., y Requejo, C. (2013, march). The robust vehicle routing problem with time windows. , *40*(3), 856–866. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812002134> doi: 10.1016/j.cor.2012.10.002
- Agrawal, S., Singh, R. K., y Murtaza, Q. (2015, april). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, *97*(0), 76–92. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915000403> doi: 10.1016/j.resconrec.2015.02.009
- Akçali, E., y Bayindir, Z. P. (2008, january). Analyzing the effects of inventory cost setting rules in a disassembly and recovery environment. *International Journal of Production Research*, *46*(1), 267–288. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=27529845&lang=es&site=ehost-live&scope=site> doi: Article
- Akkerman, R., Farahani, P., y Grunow, M. (2010, august). Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, *32*(4), 863–904. Descargado 2012-11-29, de <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00291-010-0223-2> doi: 10.1007/s00291-010-0223-2
- Alumur, S. A., Nickel, S., Saldanha-da Gama, F., y Verter, V. (2012, july). Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, *220*(1), 67–78. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171200032X> doi: 10.1016/j.ejor.2011.12.045
- Archetti, C., Feillet, D., Gendreau, M., y Grazia Speranza, M. (2011, august). Complexity of the VRP and SDVRP. *Freight Transportation and Logistics (selected papers from ODYSSEUS 2009 - the 4th International Workshop on Freight Transportation and Logistics)*, *19*(5), 741–750. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X0900151X> doi: 10.1016/j.trc.2009.12.006

- Azi, N., Gendreau, M., y Potvin, J.-Y. (2010, may). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756–763. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709004950> doi: 10.1016/j.ejor.2009.06.034
- Bard, J. F., y Nananukul, N. (2010, december). A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2202–2217. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505481000064X> doi: 10.1016/j.cor.2010.03.010
- Battarra, M., Monaci, M., y Vigo, D. (2009, november). An adaptive guidance approach for the heuristic solution of a minimum multiple trip vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 36(11), 3041–3050. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809000410> doi: 10.1016/j.cor.2009.02.008
- Bektas, T. (2006, june). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3), 209–219. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048304001550> doi: 10.1016/j.omega.2004.10.004
- Belfiore, P., y Yoshizaki, H. T. (2013, february). Heuristic methods for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and split deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 589–601. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835212002859> doi: 10.1016/j.cie.2012.11.007
- Benjamin, A., y Beasley, J. (2010, december). Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2270–2280. Descargado 2012-12-18, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054810000730> doi: 10.1016/j.cor.2010.03.019
- Bettoni, L. M. M. (2010, january). *GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit)*. Descargado 2013-03-15, de <http://gusek.sourceforge.net/gusek.html#4>
- Bogataj, M., y Grubbström, R. W. (2012). Transportation delays in reverse logistics. *International Journal of Production Economics*. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311005238> doi: 10.1016/j.ijpe.2011.12.007
- Bolduc, M.-C., Laporte, G., Renaud, J., y Boctor, F. F. (2010, april). A tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem with production and demand calendars. , 202(1), 122–130. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221709003361> doi: 10.1016/j.ejor.2009.05.008
- Brandão, J. (2011, january). A tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. , 38(1), 140–151. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/>

- S0305054810000924 doi: 10.1016/j.cor.2010.04.008
- Brandão, J., y Mercer, A. (1997, july). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100(1), 180–191. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797000106> doi: 10.1016/S0377-2217(97)00010-6
- Bräysy, O., Dullaert, W., Hasle, G., Mester, D., y Gendreau, M. (2008, august). An effective multirestart deterministic annealing metaheuristic for the fleet size and mix vehicle-routing problem with time windows. , 42(3), 371–386. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=34151874&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Cacchiani, V., Hemmelmayr, V., y Tricoire, F. (2012). A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*(0). Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X12003320> doi: 10.1016/j.dam.2012.08.032
- Calvete, H. I., Galé, C., Oliveros, M.-J., y Sánchez-Valverde, B. (2007, march). A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1720–1733. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221705006508> doi: 10.1016/j.ejor.2005.10.010
- Candas, M. F., y Kutanoglu, E. (2007, february). Benefits of considering inventory in service parts logistics network design problems with time-based service constraints. *IIE Transactions*, 39(2), 159–176. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=23311848&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Carter, C., y Ellram, L. (1998). Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics*, 19(1), 85–102. (Journal Article)
- Çatay, B. (2010, october). A new saving-based ant algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. , 37(10), 6809–6817. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417410002265> doi: 10.1016/j.eswa.2010.03.045
- Chabrier, A. (2006, october). Vehicle routing problem with elementary shortest path based column generation. , 33(10), 2972–2990. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054805000857> doi: 10.1016/j.cor.2005.02.029
- Chen, H.-K., Hsueh, C.-F., y Chang, M.-S. (2009, july). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & Operations Research*, 36(7), 2311–2319. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054808001706> doi: 10.1016/j.cor.2008.09.010
- Cheong, Y., Leong, H., y Huang, H. (2002, may). Modeling the vehicle routing problem for a soft drink machine distribution company. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 19(1), 17. Descar-

- gado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=7034365&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Choi, E., y Tcha, D.-W. (2007, july). A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 34(7), 2080–2095. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054805002650> doi: 10.1016/j.cor.2005.08.002
- Christiansen, C. H., y Lysgaard, J. (2007, november). A branch-and-price algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands. , 35(6), 773–781. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167637707000168> doi: 10.1016/j.orl.2006.12.009
- Chuang, C.-H., Wang, C. X., y Zhao, Y. (2014, october). Closed-loop supply chain models for a high-tech product under alternative reverse channel and collection cost structures. *International Journal of Production Economics*, 156(0), 108–123. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527314001649> doi: 10.1016/j.ijpe.2014.05.008
- Cimino, A., Costantino, F., Di Gravio, G., y Longo, F. (2009). Reverse logistics of refillable glass bottles: a simulative approach. En *Proceedings of the 2009 spring simulation multiconference* (pp. 137:1–137:6). Society for Computer Simulation International. Descargado de <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1639809.1655365>
- De Brito, Marisa P. (2003). *Managing reverse logistics or reversing logistics management?* (phdthesis).
- De La Fuente, M., Ros, L., y Ortiz, A. (2010). Enterprise modelling methodology for forward and reverse supply chain flows integration. *Computers in Industry*, 61(7), 702–710. Descargado de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77955427469&partnerID=40&md5=9761d8fb51a24c2f2cd3132bdc1537d4> doi: 10.1016/j.compind.2010.05.010
- Derigs, U., Pullmann, M., y Vogel, U. (2013, february). Truck and trailer routing problems, heuristics and computational experience. *Computers & Operations Research*, 40(2), 536–546. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812001724> doi: 10.1016/j.cor.2012.08.007
- Dondo, R., y Cerdá, J. (2013, january). A sweep-heuristic based formulation for the vehicle routing problem with cross-docking. *Computers & Chemical Engineering*, 48, 293–311. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135412002943> doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.016
- Dowlatshahi, S. (2000, may). Developing a theory of reverse logistics. *Interfaces*, 30(3), 143–155. Descargado 2012-01-26, de <http://interfaces.journal.informs.org/cgi/doi/10.1287/inte.30.3.143.11670> doi: 10.1287/inte.30.3.143.11670

- Dowlatshahi, S. (2005). A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 43(16), 3455–3480. (Journal Article)
- Downey, A., Elkner, J., Meyers, C., Becerra Sandoval, A., y Pontificia Universidad Javeriana (Cali). (2009). *Introducción a la programación con Python*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.
- Eksioglu, B., Vural, A. V., y Reisman, A. (2009, november). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483. Descargado 2013-03-28, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835209001405> doi: 10.1016/j.cie.2009.05.009
- Elaoud, S., Teghem, J., y Loukil, T. (2010, august). Multiple crossover genetic algorithm for the multiobjective traveling salesman problem. *ISCO 2010 - International Symposium on Combinatorial Optimization*, 36(0), 939–946. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571065310001204> doi: 10.1016/j.endm.2010.05.119
- El Hachemi, N., Gendreau, M., y Rousseau, L.-M. (2013, march). A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem. *Transport Scheduling*, 40(3), 666–673. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811000426> doi: 10.1016/j.cor.2011.02.002
- El korchy, A., y Millet, D. (2011). Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 588–597. (Journal Article)
- El Saadany, A. M., y Jaber, M. Y. (2010, april). A production/remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 352–362. Descargado 2012-06-22, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835209000369> doi: 10.1016/j.cie.2009.01.017
- El-Sayed, M., Afia, N., y El-Kharbotly, A. (2010, april). A stochastic model for forward - reverse logistics network design under risk. *Computers and Industrial Engineering*, 58(3), 423–431. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083520800243X> doi: 10.1016/j.cie.2008.09.040
- Fagerholt, K. (1999, september). Optimal fleet design in a ship routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 6(5), 453–464. Descargado 2013-05-17, de <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-3995.1999.tb00167.x> doi: 10.1111/j.1475-3995.1999.tb00167.x
- Fan, J. (2011). The vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery based on customer satisfaction. *CEIS 2011*, 15, 5284–5289. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811024805> doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.979
- Feillet, D., Dejax, P., Gendreau, M., y Gueguen, C. (2004). An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints: Application to some vehicle routing problems. *Networks*, 44(3), 216–229. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1002/net.20033> doi: 10.1002/net.20033

- Feillet, D., Gendreau, M., Medaglia, A. L., y Walteros, J. L. (2010, september). A note on branch-and-cut-and-price. , *38*(5), 346–353. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637710000775> doi: 10.1016/j.orl.2010.06.002
- Flapper, S., Gayon, J., y Vercraene, S. (2012, april). Control of a production - inventory system with returns under imperfect advance return information. *European Journal of Operational Research*, *218*(2), 392–400. Descargado 2012-06-22, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221711010046> doi: 10.1016/j.ejor.2011.10.051
- Fleischmann, M. (2000). *Quantitative models for reverse logistics* (phdthesis). Descargado 2012-01-27, de <http://repub.eur.nl/res/pub/1044/EPS-2000-002-LIS%2BFLEISCHMANN.pdf>
- Fleischmann, M. (2001). *Reverse logistics network structures and design* (Inf. Téc.). Erasmus Research Institute of Management (ERIM), ERIM is the joint research institute of the Rotterdam School of Management, Erasmus University and the Erasmus School of Economics (ESE) at Erasmus University Rotterdam. Descargado de <http://EconPapers.repec.org/RePEc:dgr:eureri:2001109>
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., y Wassenhove, L. N. V. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, *10*(2), 156–173. (PT: J; TC: 106; UT: WOS:000177046300005)
- Fleischmann, M., Bloemhof Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. A. E. E., y Van Wassenhove, L. N. (1997, noviembre). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, *103*(1), 1–17. (PT: J; TC: 398; UT: WOS:A1997YG56800001)
- Fleischmann, M., y Kuik, R. (2003, 16 de november). On optimal inventory control with independent stochastic item returns. , *151*(1), 25–37. (PT: J; TC: 26; UT: WOS:000184767200003)
- Foundation, P. S. (2015, may). *The Python Tutorial - Python 2.7.9 documentation*. Descargado 2015-03-30, de <https://docs.python.org/2/tutorial/index.html#tutorial-index>
- Georgiadis, P., y Vlachos, D. (2004). Decision making in reverse logistics using system dynamics. *Yugoslav Journal of Operations Research*, *14*(2), 259–272. Descargado 2012-02-22, de <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-02430402259G> doi: 10.2298/YJOR0402259G
- Golden, B. L., y Wasil, E. A. (1987, january). Computerized vehicle routing in the soft drink industry. *Operations Research*, *35*(1), 6. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=4478253&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Govindan, K., Soleimani, H., y Kannan, D. (2015, february). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, *240*(3), 603–626. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/>

- pii/S0377221714005633 doi: 10.1016/j.ejor.2014.07.012
- Gribkovskaia, I., Halskau sr., Ø., Laporte, G., y Vlček, M. (2007, july). General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 568–584. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706003365> doi: 10.1016/j.ejor.2006.05.009
- Gribkovskaia, I., Laporte, G., y Shyshou, A. (2008, september). The single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups. *Part Special Issue: Bio-inspired Methods in Combinatorial Optimization*, 35(9), 2908–2924. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054807000111> doi: 10.1016/j.cor.2007.01.007
- Guide, V. D. R., Jayaraman, V., Srivastava, R., y Benton, W. C. (2000, may). Supply-chain management for recoverable manufacturing systems. *Interfaces*, 30(3), 125–142. Descargado 2012-01-26, de <http://interfaces.journal.informs.org/cgi/doi/10.1287/inte.30.3.125.11656> doi: 10.1287/inte.30.3.125.11656
- Gulczynski, D., Golden, B., y Wasil, E. (2011, september). The period vehicle routing problem: New heuristics and real-world variants. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5), 648–668. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554511000196> doi: 10.1016/j.tre.2011.02.002
- Gurobi Optimization, I. (2014). *Gurobi Optimizer Reference Manual*. Descargado 2014-02-05, de <http://www.gurobi.com/support/faqs>
- Gutiérrez-Jarpa, G., Desaulniers, G., Laporte, G., y Marianov, V. (2010, october). A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with deliveries, selective pickups and time windows. *European Journal of Operational Research*, 206(2), 341–349. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710001700> doi: 10.1016/j.ejor.2010.02.037
- Hasle, G., y Kloster, O. (2007). Industrial vehicle routing. En G. Hasle, K.-A. Lie, y E. Quak (Eds.), *Geometric modelling, numerical simulation, and optimization* (pp. 397–435). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Descargado 2013-09-12, de http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-540-68783-2_12
- Haughton, M. A. (2008, january). The efficacy of exclusive territory assignments to delivery vehicle drivers. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 24–38. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706010472> doi: 10.1016/j.ejor.2006.10.014
- Haugland, D., Ho, S. C., y Laporte, G. (2007, august). Designing delivery districts for the vehicle routing problem with stochastic demands. *European Journal of Operational Research*, 180(3), 997–1010. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706003444> doi: 10.1016/j.ejor.2005.11.070
- Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., y Låhketangen, A.

- (2010, december). Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2041- - 2061. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810000699> doi: 10.1016/j.cor.2010.03.015
- Hoff, A., Gribkovskaia, I., Laporte, G., y Løkketangen, A. (2009, february). Lasso solution strategies for the vehicle routing problem with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 192(3), 755-766. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707010235> doi: 10.1016/j.ejor.2007.10.021
- Hollis, B. L., y Green, P. J. (2012, august). Real-life vehicle routing with time windows for visual attractiveness and operational robustness. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 29(04), 1250017. Descargado 2012-12-18, de <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217595912500170> doi: 10.1142/S0217595912500170
- Hosny, Manar Ibrahim. (2010). *Investigating heuristic and meta-heuristic algorithms for solving pickup and delivery problems* (phdthesis). Descargado de http://faculty.ksu.edu.sa/M_F_Hosny/Documents/Thesis.pdf
- Hsueh, C.-F. (2011). An inventory control model with consideration of remanufacturing and product life cycle. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 645-652. (Journal Article)
- Jin, M., Liu, K., y Eksioglu, B. (2008, march). A column generation approach for the split delivery vehicle routing problem. , 36(2), 265-270. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167637707000909> doi: 10.1016/j.orl.2007.05.012
- Kachitvichyanukul, V., Sombuntham, P., y Kunnapapdeelert, S. (2015, noviembre). Two solution representations for solving multi-depot vehicle routing problem with multiple pickup and delivery requests via PSO. *Maritime logistics and transportation intelligence*, 89, 125-136. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835215001606> doi: 10.1016/j.cie.2015.04.011
- Kant, G., Jacks, M., y Aantjes, C. (2008, january). Coca-cola enterprises optimizes vehicle routes for efficient product delivery. , 38(1), 40-50. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=31877956&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Karaoglan, I., Altiparmak, F., Kara, I., y Dengiz, B. (2012, august). The location-routing problem with simultaneous pickup and delivery: Formulations and a heuristic approach. *Omega*, 40(4), 465-477. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048311001393> doi: 10.1016/j.omega.2011.09.002
- Kassem, S., y Chen, M. (2013, september). Solving reverse logistics vehicle routing problems with time windows. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1-4), 57-68. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4708-9> doi: 10.1007/s00170-012-4708-9
- Keyvanshokoo, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S., y Tavakkoli-Moghaddam, R.

- (2013, december). A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10182–10202. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13003636> doi: 10.1016/j.apm.2013.05.042
- Koch, T., Achterberg, T., Andersen, E., Bastert, O., Berthold, T., Bixby, R. E., ... Wolter, K. (2011, june). MIPLIB 2010: Mixed Integer Programming Library version 5. *Mathematical Programming Computation*, 3(2), 103–163. Descargado 2015-03-30, de <http://link.springer.com/10.1007/s12532-011-0025-9> doi: 10.1007/s12532-011-0025-9
- Kroon, L., y Vrijens, G. (1995). Returnable containers: an example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2), 56–68. doi: 10.1108/09600039510083934
- Kytöjoki, J., Nuortio, T., Bräysy, O., y Gendreau, M. (2007, september). An efficient variable neighborhood search heuristic for very large scale vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 34(9), 2743–2757. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054805003394> doi: 10.1016/j.cor.2005.10.010
- Labadie, N., Mansini, R., Melechovský, J., y Wolfler Calvo, R. (2012, july). The team orienteering problem with time windows: An LP-based granular variable neighborhood search. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 15–27. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712000653> doi: 10.1016/j.ejor.2012.01.030
- Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C., Taheripour, S., y VoB, S. (2016, enero). An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 38(1), 175–187. Descargado 2016-05-14, de <http://link.springer.com/10.1007/s00291-015-0408-9> doi: 10.1007/s00291-015-0408-9
- Lambert, S., Riopel, D., y Abdul-Kader, W. (2011, october). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 561–581. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835211001136> doi: 10.1016/j.cie.2011.04.012
- Lei, H., Laporte, G., y Guo, B. (2011, december). The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. , 38(12), 1775–1783. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054811000487> doi: 10.1016/j.cor.2011.02.007
- Lei, L., Shuguang, L., Ruszczyński, A., y Park, S. (2006, november). On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. *IIE Transactions*, 38(11), 955–970. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=22255147&lang=es&site=ehost-live&scope=site> doi: 10.1080/07408170600862688
- Li, J., Li, Y., y Pardalos, P. M. (2016). Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. *Journal of Combinatorial Op-*

- timization, 31(2), 515–532. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/s10878-014-9767-4> doi: 10.1007/s10878-014-9767-4
- Li, X., Leung, S. C., y Tian, P. (2012, january). A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. , 39(1), 365–374. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417411009870> doi: 10.1016/j.eswa.2011.07.025
- Lima, C., Goldbarg, M., y Goldbarg, E. (2004, december). A memetic algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Latin-American Conference on Combinatorics, Graphs and Applications*, 18(0), 171–176. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571065304010844> doi: 10.1016/j.endm.2004.06.027
- Lin, S.-W., Yu, V. F., y Chou, S.-Y. (2010, january). A note on the truck and trailer routing problem. , 37(1), 899–903. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095741740900654X> doi: 10.1016/j.eswa.2009.06.077
- Lu, Z., y Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299–323. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054805000973> (Journal Article) doi: 10.1016/j.cor.2005.03.002
- Macedo, R., Alves, C., Valério de Carvalho, J., Clautiaux, F., y Hanafi, S. (2011, november). Solving the vehicle routing problem with time windows and multiple routes exactly using a pseudo-polynomial model. *European Journal of Operational Research*, 214(3), 536–545. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171100381X> doi: 10.1016/j.ejor.2011.04.037
- Mahadevan, B., Pyke, D. F., y Fleischmann, M. (2003, december). Periodic review, push inventory policies for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 151(3), 536–551. (PT: J; TC: 43; UT: WOS:000185510300007) doi: 10.1016/S0377-2217(02)00627-6
- Makhorin, A. (2013, january). *GNU Linear Programming Kit, Modeling Language GNU MathProg*. Moscow, Russia: Department for Applied Informatics, Moscow Aviation Institute. Descargado de <http://www.gnu.org/software/glpk/>
- Mar-Ortiz, J. (2011). Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain. *Journal of the Operational Research Society*, 62(8), 1471–1484. (Journal Article)
- Memari, A., Rahim, A. R. A., y Ahmad, R. B. (2015). An Integrated Production-distribution Planning in Green Supply Chain: A Multi-objective Evolutionary Approach. *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Emerging Potentials*, 26(0), 700–705. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115001869> doi: 10.1016/j.procir.2015.03.006

- Mendoza, J. E., Medaglia, A. L., y Velasco, N. (2009, february). An evolutionary-based decision support system for vehicle routing: The case of a public utility. *Wireless in the Healthcare*, 46(3), 730–742. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923608002194> doi: 10.1016/j.dss.2008.11.019
- Mittelman, H. (s.f.). *Mixed Integer Linear Programming BenchMark (MILPLIB2010)*. Descargado 2015-03-30, de <http://plato.asu.edu/ftp/milpc.html>
- Mladenović, N., Urošević, D., Hanafi, S., y Ilić, A. (2012, july). A general variable neighborhood search for the one-commodity pickup-and-delivery travelling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 270–285. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712000719> doi: 10.1016/j.ejor.2012.01.036
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., y Vicens, E. (2010, august). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377–390. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709005694> doi: 10.1016/j.ejor.2009.09.008
- Nagy, G., y Salhi, S. (2005, april). Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 162(1), 126–141. Descargado 2013-09-05, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221703008361> doi: 10.1016/j.ejor.2002.11.003
- Nahavandi, N., Rad, F. H., y Farokhi, S. (2011, october). Heat transfer approach to modelling and analysis of reverse logistics inventory models. *Applied Mechanics and Materials*, 110-116, 2811–2820. Descargado 2012-06-22, de <http://www.scientific.net/AMM.110-116.2811> doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2811
- Nguyen, V.-P., Prins, C., y Prodhon, C. (2012, february). A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem. , 25(1), 56–71. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0952197611001655> doi: 10.1016/j.engappai.2011.09.012
- Niknejad, A., y Petrovic, D. (2014, october). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 143–154. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714002732> doi: 10.1016/j.ejor.2014.03.034
- Öztürk, C., y Ornek, A. M. (2014, january). Operational extended model formulations for Advanced Planning and Scheduling systems. *Applied Mathematical Modelling*, 38(1), 181–195. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13003727> doi: 10.1016/j.apm.2013.05.049
- Paksoy, T., Bektaş, T., y Özceylan, E. (2011, july). Operational and environmental

- performance measures in a multi-product closed-loop supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 532–546. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554510001213> doi: 10.1016/j.tre.2010.12.001
- Perone, C. S. (2010, april). *Pyevolve*. Descargado de http://pyevolve.sourceforge.net/distribution/0_6rc1/Pyevolve-0.6rc1-manual.pdf
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., y Medaglia, A. L. (2013, february). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712006388> doi: 10.1016/j.ejor.2012.08.015
- Pishvaei, M. S., Farahani, R. Z., y Dullaert, W. (2010, june). A memetic algorithm for bi-objective integrated forwardreverse logistics network design. *Computers and Operations Research*, 37(6), 1100–1112. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809002366> doi: 10.1016/j.cor.2009.09.018
- Pochet, Y. (2006). *Production planning by mixed integer programming*. New York ; Berlin: Springer.
- Pohlen, T. L., y Farris, M. T. (1992). Reverse logistics in plastics recycling. *International journal of physical distribution & logistics management*, 22(7), 35. Descargado de <http://search.proquest.com/docview/232587836?accountid=14542> (Journal Article)
- Pokharel, S., y Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 175–182. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344908002024> (Journal Article)
- Prins, C. (2009, september). Two memetic algorithms for heterogeneous fleet vehicle routing problems. *Artificial Intelligence Techniques for Supply Chain Management*, 22(6), 916–928. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197608001693> doi: 10.1016/j.engappai.2008.10.006
- Privé, J., Renaud, J., Boctor, F. F., y Laporte, G. (2006). *Solving a vehicle-routing problem arising in soft-drink distribution* (Vol. 57). Palgrave Macmillan. Descargado de <http://www.fsa.ulaval.ca/personnel/renaudj/pdf/Recherche/Soft%20Drink%20-%20JORS%20May%202005.pdf> (undefined Anglais)
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., y Barbosa-Póvoa, A. P. (2014, october). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, 48(0), 60–74. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048313001175> doi: 10.1016/j.omega.2013.11.006
- Renaud, J., Laporte, G., y Boctor, F. F. (1996, march). A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. , 23(3), 229–235.

- Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030505489500026P> doi: 10.1016/0305-0548(95)00026-P
- Repoussis, P., y Tarantilis, C. (2010, october). Solving the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows via adaptive memory programming. *Applications of Advanced Technologies in Transportation: Selected papers from the 10th AATT Conference*, 18(5), 695–712. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X09000965> doi: 10.1016/j.trc.2009.08.004
- Ribeiro, G. M., Laporte, G., y Mauri, G. R. (2012, july). A comparison of three metaheuristics for the workover rig routing problem. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 28–36. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712000665> doi: 10.1016/j.ejor.2012.01.031
- Rogers, D. S., Tibben-Lembke, R. S., University of Nevada, R. C. f. L. M., y Reverse Logistics Executive Council. (1999). *Going backwards : reverse logistics trends and practices*. Reverse Logistics Executive Council.
- Roghianian, E., y Pazhooheshfar, P. (2014, july). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3), 348–356. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612514000247> doi: 10.1016/j.jmsy.2014.02.007
- Ruiz, R., Maroto, C., y Alcaraz, J. (2004, march). A decision support system for a real vehicle routing problem. *EURO Young Scientists*, 153(3), 593–606. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221703002650> doi: 10.1016/S0377-2217(03)00265-0
- Safaei, A. S., Moattar Husseini, S., Z.-Farahani, R., Jolai, F., y Ghodspour, S. H. (2010, july). Integrated multi-site production-distribution planning in supply chain by hybrid modelling. *International Journal of Production Research*, 48(14), 4043–4069. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=50652347&lang=es&site=ehost-live&scope=site>
- Saracoglu, I., Topaloglu, S., y Keskinturk, T. (2014, december). A genetic algorithm approach for multi-product multi-period continuous review inventory models. *Expert Systems with Applications*, 41(18), 8189–8202. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414003959> doi: 10.1016/j.eswa.2014.07.003
- Sasikumar, P. (2010). A hybrid algorithm for the vehicle routing problem to third party reverse logistics provider. *SCMIS 2010 - Proceedings of 2010 8th International Conference on Supply Chain Management and Information Systems: Logistics Systems and Engineering, ISSU*. Descargado de http://xml.engineeringvillage2.org/controller/servlet/Controller?CID=expertSearchDetailedFormat&EISESSION=1_c2ee1513264df6350780fses1&SYSTEM_USE_SESSION_PARAM=true&SEARCHID=d589391325c0602cc6d52prod2data2&DOCINDEX=

- 8&PAGEINDEX=1&RESULTSCOUNT=941&database=1&format=expertSearchDetailedFormat (Journal Article)
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., y Van Wassenhove, L. N. (2004, february). Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 50(2), 239–252. Descargado 2012-01-26, de <http://mansci.journal.informs.org/cgi/doi/10.1287/mnsc.1030.0186> doi: 10.1287/mnsc.1030.0186
- Schneider, M., Sand, B., y Stenger, A. (2013). A note on the time travel approach for handling time windows in vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*(0). Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813000348> doi: 10.1016/j.cor.2013.02.002
- SCIP. (s.f.). Descargado 2015-03-30, de <http://scip.zib.de/>
- Sen, A., y Bulbul, K. (2008, november). A survey on multi trip vehicle routing problem. , 401–407. Descargado de <http://research.sabanciuniv.edu/13087/>
- Song, J.-H., y Furman, K. C. (2013, march). A maritime inventory routing problem: Practical approach. *Transport Scheduling*, 40(3), 657–665. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810002625> doi: 10.1016/j.cor.2010.10.031
- Srivastava, S. K. (2008, august). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36(4), 535–548. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048307000813> doi: 10.1016/j.omega.2006.11.012
- Stock, J. R. (1998). *Development and implementation of reverse logistics programs*. Council Logistics Management. (Book, Whole)
- Subramanian, A., Drummond, L., Bentes, C., Ochi, L., y Farias, R. (2010, november). A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Metaheuristics for Logistics and Vehicle Routing*, 37(11), 1899–1911. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809002779> doi: 10.1016/j.cor.2009.10.011
- Subramanian, A., Uchoa, E., Pessoa, A. A., y Ochi, L. S. (2011, september). Branch-and-cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. , 39(5), 338–341. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167637711000666> doi: 10.1016/j.orl.2011.06.012
- Taş, D., Dellaert, N., van Woensel, T., y de Kok, T. (2013, january). Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time windows and service costs. *Computers & Operations Research*, 40(1), 214–224. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812001402> doi: 10.1016/j.cor.2012.06.008
- Tan, A. W. K., y Kumar, A. (2006). A decision-making model for reverse logistics in the computer industry. *The International Journal of Logistics Management*, 17(3), 331–354. Descargado 2012-06-20, de <http://>

- www.emeraldinsight.com/10.1108/09574090610717518 doi: 10.1108/09574090610717518
- Tan, K., Cheong, C., y Goh, C. (2007, march). Solving multiobjective vehicle routing problem with stochastic demand via evolutionary computation. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 813–839. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706000208> doi: 10.1016/j.ejor.2005.12.029
- Ting, C.-K., y Liao, X.-L. (2013, january). The selective pickup and delivery problem: Formulation and a memetic algorithm. *Meta-heuristics for manufacturing scheduling and logistics problems*, 141(1), 199–211. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552731200237X> doi: 10.1016/j.ijpe.2012.06.009
- Toth, P., y Vigo, D. (1999). A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 113(3), 528–543.
- Toth, P., y Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- V. Daniel R. Guide, J., Teunter, R. H., y Wassenhove, L. N. V. (2003, october). Matching Demand and Supply to Maximize Profits from Remanufacturing. *Manufacturing & Service Operations Management*, 5(4), 303–316. Descargado de <http://ideas.repec.org/a/inm/ormsom/v5y2003i4p303-316.html>
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., y Prins, C. (2013, january). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows. *Computers & Operations Research*, 40(1), 475–489. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812001645> doi: 10.1016/j.cor.2012.07.018
- Villegas, J. G., Prins, C., Prodhon, C., Medaglia, A. L., y Velasco, N. (2011, september). A GRASP with evolutionary path relinking for the truck and trailer routing problem. , 38(9), 1319–1334. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030505481000287X> doi: 10.1016/j.cor.2010.11.011
- Vörös, J. (2002). Product balancing under conditions of quality inflation, cost pressures and growth strategies. *European Journal of Operational Research*, 141(1), 153 - 166. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701002727> doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00272-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00272-7)
- Wang, H.-F., y Chen, Y.-Y. (2013, january). A coevolutionary algorithm for the flexible delivery and pickup problem with time windows. *Meta-heuristics for manufacturing scheduling and logistics problems*, 141(1), 4–13. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527312001697> doi: 10.1016/j.ijpe.2012.04.011
- Watson, K., y Polito, T. (2003, january). Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution

- environment. *International Journal of Production Research*, 41(4), 741–765. Descargado 2015-06-22, de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0020754031000065511> doi: 10.1080/0020754031000065511
- Wei, C., Li, Y., y Cai, X. (2011, december). Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand. *International Journal of Production Economics*, 134(2), 357–367. Descargado 2012-06-22, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527309004101> doi: 10.1016/j.ijpe.2009.11.008
- Zachariadis, E. E., y Kiranoudis, C. T. (2011, march). A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. , 38(3), 2717–2726. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417410008572> doi: 10.1016/j.eswa.2010.08.061
- Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., y Kiranoudis, C. T. (2009, march). A hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service. , 36(2), 1070–1081. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095741740700526X> doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.005
- Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D., y Kiranoudis, C. T. (2010, april). An adaptive memory methodology for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. , 202(2), 401–411. Descargado 2012-10-25, de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221709003476> doi: 10.1016/j.ejor.2009.05.015
- Zeng, L., Ong, H., Ng, K., y Liu, S. (2008, may). Two composite methods for soft drink distribution problem. *Advances in Engineering Software*, 39(5), 438–443. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997807000737> doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.03.001
- Zhang, Z., Che, O., Cheang, B., Lim, A., y Qin, H. (2013, september). A memetic algorithm for the multiperiod vehicle routing problem with profit. *European Journal of Operational Research*, 229(3), 573–584. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712009137> doi: 10.1016/j.ejor.2012.11.059
- Zhou, X., y Xu, J. (2009, december). A class of integrated logistics network model under random fuzzy environment and its application to chinese beer company. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness & Knowledge-Based Systems*, 17(6), 807–831. Descargado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=45519996&lang=es&site=ehost-live&scope=site>

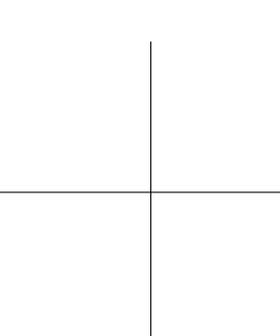
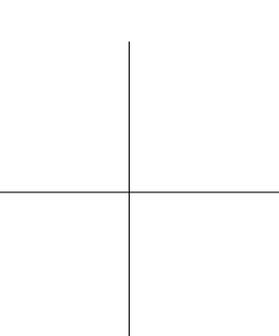
Índice alfabético

- Distribution Requirement Planning*, 33
- OEMs, Original Equipment Manufacturers*, 52
- Open source software*, 175
- Procurement logistics*, 35
- Reverse logistics*, 33, 34
 - channel*, 52
- Split*, 17, 28
- Supply Chain*
 - Closed loop*, 38
- Supply chain*, 9, 32
- Transport lead time*, 118
- Vehicle Routing Problem*, 77
 - Backhauls*, 80, 83, 91
 - Capacitated*, 81, 93
 - Distance constrained*, 81
 - Fleet size and mix*, 90
 - Heterogeneous fixed fleet*, 90
 - Pickup and delivery*, 80, 84, 91
 - Split delivery*, 93
 - Time windows*, 81, 82, 89
- Algoritmos genéticos, 175
- Cadena de suministros, 9, 32
 - de ciclo cerrado, 38
 - inversa, 52
- Cadena de valor, 52
- Canal de logística inversa, 52
- Clasificación, 47
- Componentes del problema de ruteo de vehículos, 78
 - Clientes, 78
 - Conductores, 79
 - Depósitos, 78
 - Flota de vehículos, 78
 - Red vial, 78
- Contenedores reutilizables, 63
- Distribución inversa, 34
- DRP, 33
- GLPK, 157, 171
- Inspección, 47
- Inventario, 67
- Investigación de operaciones, 77
- Localización de instalaciones, 52, 64
- Logística
 - de aprovisionamiento, 35
 - integrada, 65
- Logística inversa, 33, 34, 41
- MathProg, 171
- Planeación de la producción, 31
- Planeación de requerimientos de distribución, 33
- Problema de ruteo de vehículos, 52, 76, 77
 - Capacidad restringida, 81, 93
 - Distancia restringida, 81
 - Entregas fraccionadas, 93
 - Flota fija heterogénea, 90
 - Mezcla y tamaño de la flota, 90
 - Recogida y entrega, 80, 84, 91
 - Ventanas de tiempo, 81, 82, 89
 - Viajes de regreso, 80, 83, 91
- Pyevolve, 175
- Python, 174

Re-manufactura, 48
Reciclaje, 49
Recolección, 47
Recuperación directa, 48
Redes de logística inversa, 52
Reparación, 48
Reutilización, 48

Sistema de re-manufactura, 52
Software de código abierto, 175

Transporte, 47



*“La vida no es
la que uno vivió,
sino la que uno recuerda,
y cómo la recuerda
para contarla.”*

Gabriel García Márquez

*“No llores porque ya se terminó...
sonríe, porque sucedió”*

Gabriel García Márquez

