



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena
de Suministro

**Diseño de un modelo de Logística Inversa
empleando Algoritmos Genéticos**

Tesis que para obtener el Grado de Doctor en
Logística y Dirección de la Cadena de Suministro

Presenta

Jorge Luis Castañeda Gutiérrez

Director de Tesis

Ph D. Carlos Alberto Reyes García

Puebla, México.

Septiembre de 2013



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de

Suministro

Por este medio nos permitimos informar a Uds. la aprobación de la Tesis:
“Diseño de un modelo de Logística Inversa empleando Algoritmos Genéticos”, que presenta el alumno: Jorge Luis Castañeda Gutiérrez como requisito para obtener el Grado de Doctorado en este programa académico.

Atte.

Comité Doctoral

Dr. Carlos Alberto Reyes García

Director de Tesis

Dr. José Federico Ramírez Cruz

Asesor

Dr. José Luis Martínez Flores

Asesor

Puebla, México.

Septiembre del 2013

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO

Por permitirme culminar con éxito el esfuerzo de todos estos años de estudio. Para Él mi agradecimiento infinito.

A MI MADRE: “MAU”

Por ser el pilar fundamental en mi vida, por todo su esfuerzo y sacrificio, lo que hizo posible el triunfo profesional alcanzado. Para ella mi AMOR, OBEDIENCIA Y RESPETO.

A MI ESPOSA: “LUI”

Por ser una persona excepcional. Quien me ha brindado su apoyo incondicional y ha hecho suyos mis preocupaciones y problemas. Gracias por tu amor, paciencia y comprensión.

A MIS HIJOS:

LUIS DANIEL (DAN), MANUEL ALEJANDRO (MANU) Y EL PEQUEÑO JORGE ALBERTO (El Kk)

Por ser lo más grande y valioso que Dios me ha regalado, quienes son mi fuente de inspiración y la razón que me impulsa a salir adelante.

A LA MEMORIA DE MI PADRE: LEOPOLDO

Que desde el Cielo está conmigo y que siempre recordaré, amaré y llevaré en mi corazón.

A MIS HERMANOS: LUPE, PEPE, OSCAR, JUAN CARLOS Y GERARDO.

Por su ayuda y apoyo incondicional que me brindaron en los momentos que más lo necesité, mis sinceros agradecimientos.

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS.

Que de una u otra forma me ayudaron y participaron para que lograra el presente éxito profesional. Gracias por sus palabras de aliento y fe en mí.

A MI QUERIDO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO.

Por sus atinados programas de superación profesional (PROMEP), y el apoyo incondicional de sus directivos por su comprensión y que a pesar de todos los obstáculos que se nos presentaron logramos el objetivo final.

A LA UPAEP Y A MIS CATEDRÁTICOS.

Por haber permitido adquirir los conocimientos necesarios y la experiencia necesaria para poderla aplicar en la práctica.

Y NO PODRIAN FALTAR A MIS DIRECTORES DE TESIS, LOS DOCTORES CARLOS ALBERTO REYES GARCIA, JOSÉ FEDERICO RAMÍREZ CRUZ Y JOSE LUIS MARTINEZ FLORES “PREMIO NACIONAL DE LOGISTICA 2013, CATEGORIA ACADEMICO”, Porque supieron comprenderme y trabajaron arduamente para que juntos pudiéramos llegar hasta donde nos habíamos trazado el camino.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

Capítulo I “Elementos protocolares”.	1
1.1. Antecedentes de la investigación.	1
1.2. Planteamiento del problema.	2
1.3. Propósito de la investigación.	3
1.4. Objetivos de investigación.	5
1.4.1 Objetivo General.	6
1.4.2 Objetivos específicos.	6
1.5. Alcances y limitaciones de la tesis.	6
1.6. Estructura de la tesis.	7
Capítulo II “Sistemas Logísticos y la Logística Inversa”.	9
2.1 Introducción.	9
2.2 Evolución del concepto de Logística.	9
2.3 Logística Inversa.	10
2.4 Criterios para clasificar los flujos de la Logística Inversa.	13
2.4.1 Causa de flujo.	13
2.4.2 Destino final.	15
2.5 El sistema de Logística Inversa.	15
2.6 Modelos cuantitativos para el análisis de los sistemas de Logística Inversa.	15
2.6.1 Modelo para la reutilización.	18
2.6.2 Modelo para el reciclaje.	19
2.6.3 Modelo para la Refabricación.	22
2.7 Razones económicas para la recuperación de productos fuera de uso.	23

Capítulo III “Algoritmos genéticos y evolutivos: un método de optimización”	25
3.1 Introducción.	25
3.2 Conceptos generales de optimización.	25
3.3 Meta-heurísticas de Optimización.	27
3.4 La optimización y la computación evolutiva.	30
3.4.1 Programación evolutiva.	32
3.4.2 Estrategias evolutivas.	32
3.4.3 Algoritmos genéticos.	33
3.5 Algoritmos genéticos y evolutivos. Fase de diseño.	36
3.5.1. La población inicial: Los cromosomas.	36
3.5.2. La función de evaluación, función de aptitud o función de adecuación.	38
3.5.3 Manejo de restricciones.	38
3.6 Selección de padres.	40
3.6.1 Método de la ruleta.	40
3.6.2 Método de torneo o concurso.	42
3.7 Operadores genéticos.	42
3.7.1 Cruza en un punto.	43
3.7.2 Cruza uniforme.	44
3.7.3 Cruza aritmética.	45
3.7.4 Cruza heurística.	46
3.7.5 Mutación aleatoria.	46
3.7.6 Mutación no uniforme.	47
3.8 La nueva generación.	47
3.9 Condiciones de finalización del algoritmo.	48
3.10 Asignación de valores a los parámetros del algoritmo.	49

Capítulo IV “Metodología para la resolución de problemas de localización dinámica de centros de recuperación en LI”.	50
4.1 Introducción.	50
4.2 Características comunes y problemas de localización.	50

4.3 Localización dinámica de instalaciones con múltiples capacidades posibles en LI.	53
4.3.1 El problema de localización de instalaciones con capacidad determinada: CFLP (Capacited Facility Location Problem).	53
4.3.2 Caracterización del problema de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad: MCFLP (Multiple Capacited Facility Location Problem)	56
4.3.3 Caracterización del problema de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad en múltiples periodos: MPMCFLP (Multiple Period Capacited Facility Location Problem).	59
4.3.4 Caracterización del problema de localización dinámica de instalaciones en sistemas multinivel de LI: STPNTCLP (Single Treatment Plant and Necessary Transfer Centres Location Problem).	65
4.4 Diseño de un modelo determinístico para resolución de problema de localización dinámica en LI.	68
4.4.1 Utilización de técnicas heurísticas.	74
4.4.2 Estructura de solución.	74
4.4.3 Herramienta propuesta.	75
 Capítulo V Solución al problema multiobjetivo en LI.	 77
5.1 Introducción.	77
5.2 Esquema general de la técnica.	77
5.3 Codificación del individuo.	78
5.4 Soluciones no factibles.	79
5.4 Poblaciones.	79
5.5 Condición de terminación.	79
5.6 Ejemplo de aplicación 1.	80
5.6.1 Modelo propuesto de solución al problema planteado.	82

Capítulo VI Análisis y discusión de resultados.	87
6.1 Introducción.	87
6.2 Análisis descriptivo de los resultados computacionales.	87
6.3 Discusión de resultados.	90
6.4 Ejemplo de aplicación 2.	91
6.4.1 Logística esbelta.	92
6.4.2 El sector eléctrico en México.	92
6.4.3 Localización de instalaciones para ubicar centros de distribución aplicado a la industria fabricante de cable.	93
6.4.4 Formulación del problema.	94
6.4.5 Modelo propuesto de solución.	97
6.4.6 Herramienta propuesta de solución.	98
6.4.7 Experimentación y resultados.	99
6.4.8 Análisis y comparación de resultados.	101
 Capítulo VII Conclusiones y trabajos futuros.	 103
7.1 Conclusiones.	103
7.2 Trabajo futuro.	105

INDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1 Ciclo logístico del producto.	12
Figura 2.2 Motivos para la recuperación de PFU.	15
Figura 2.3 El proceso de la Logística Inversa.	16
Figura 2.4 Fases del Sistema de LI.	16
Figura 2.5 Estructura del modelo de una red de recuperación.	24
Figura 3.1 (a) Problema de optimización con varios mínimos locales y un mínimo global, (b) mejora de soluciones.	26
Figura 3.2 Representación de la función a optimizar en el problema 3.1.	38
Figura 4.1 Diagrama CFLP.	54
Figura 4.2 Diagrama MCFLP.	58
Figura 4.3 Diagrama MPMCFLP.	61
Figura 4.4 Estructura del modelo de una red de recuperación, con localización híbrida.	69
Figura 4.5 Esquema de resolución propuesto.	75
Figura 4.6 Estructura de una solución del problema de localización dinámica de LI.	76
Figura 6.1 Imagen de pantalla del modulo de Algoritmos Genéticos de MatLab.	88
Figura 6.2 Imagen de pantalla de exportación de resultados a hoja de cálculo.	88
Figura 6.3 Mejor solución por generación.	89
Figura 6.4 Ubicación entre clientes y plantas (Situación actual).	96
Figura 6.5 Mejor solución grafica en 30 ejecuciones del Algoritmo Genético.	101
Figura 6.5 Ubicación geográfica de respuesta al problema.	102

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1 Factores estratégicos y operativos de LI.	4
Tabla 2.1 Modelos para reciclaje (sumario 1).	20
Tabla 2.2 Modelos para reciclaje (sumario 2).	21
Tabla 2.3 Modelos cuantitativos para la refabricación (sumario).	23
Tabla 3.1 Principales técnicas meta-heurísticas de optimización,	28
Tabla 3.2 Tipos de estrategias evolutivas.	33
Tabla 3.3 Valor de aptitud y suma de aptitudes de 10 cromosomas.	41
Tabla 3.4 Cromosomas seleccionados.	41
Tabla 3.5 Método de torneo o concurso.	42
Tabla 4.1 Evolución desde el problema CFLP al MPMCFLP.	53
Tabla 4.2 Índices del problema CFLP.	54
Tabla 4.3 Parámetros del modelo CFLP.	54
Tabla 4.4 Variables del modelo CFLP.	55
Tabla 4.5 Índices del problema MCFLP.	57
Tabla 4.6 Parámetros del modelo MCFLP.	57
Tabla 4.7 Variables del modelo MCFLP.	57
Tabla 4.8 Índices del problema MPMCFLP	62
Tabla 4.9 Parámetros del modelo MPMCFLP.	62
Tabla 4.10 Variables del modelo MPMCFLP.	62
Tabla 4.11 Evolución del número de variables y restricciones con el crecimiento del problema.	64
Tabla 4.12 Índices del problema STPNTCLP.	66
Tabla 4.13 Parámetros del modelo STPNTCLP.	66
Tabla 4.14 Variables del modelo STPNTCLP.	66
Tabla 4.15 Índices del problema de LI.	70
Tabla 4.16 Parámetros del modelo LI.	70
Tabla 4.17 Variables del modelo LI.	71
Tabla 5.1 Representación del Cromosoma.	78
Tabla 5.2 Datos de localización.	80
Tabla 5.3 Datos del cliente 1, en base a un modelo lineal.	81
Tabla 5.4 Datos del cliente 2, en base a un modelo lineal.	81
Tabla 5.5 Parámetros del modelo lineal.	82
Tabla 5.6 Índices del problema de LI.	83
Tabla 5.7 Parámetros del modelo LI.	83

Tabla 5.8 Variables del modelo LI.	84
Tabla 6.1 Costo total.	89
Tabla 6.2 Solución al cromosoma en base al modelo lineal.	90
Tabla 6.3. Matriz de distancias entre clientes y plantas.	95
Tabla 6.4. Matriz de costo por Kilómetros.	95
Tabla 6.5. Demanda de mercados en pies lineales.	96
Tabla 6.6 Matriz final de costos en dólares americanos.	96
Tabla 6.7 Matriz de datos adicionales.	97
Tabla 6.8 Cromosoma de 42 bits.	99
Tabla 6.9 Distribución de la cadena de bits.	99
Tabla 6.10 Cromosomas Óptimos.	100
Tabla 6.11 Cromosomas Óptimos con aportaciones por planta.	100
Tabla 6.11 Resultados de Lingo.	101

RESUMEN

A la fecha está consensuado por muchos expertos en Dirección de Operaciones que para ser eficientes y poder competir en el mercado mundial es necesario gestionar toda la cadena de suministro en sus niveles: estratégico, táctico y operativo.

En el nivel estratégico se toman decisiones de diseño o rediseño de la cadena de suministro, y por tanto abarcan la elección del número, tipo, localización y tamaño de los integrantes que conforman la cadena de suministro (proveedores, fábricas, almacenes, centros de distribución), la elección del tipo de transporte (tipo, tamaño y propio o/y contratado) y de los operadores logísticos.

La Logística Inversa es considerada como uno de los aspectos de la Logística, ya que actualmente está provocando interés entre los profesionistas y los investigadores, uno de los problemas que aparecen en la gestión de las cadenas de suministro es la localización de instalaciones clave para dicha cadena.

En el área de la logística inversa este problema de diseño se traduce en las decisiones acerca de la localización de los diferentes centros de recuperación, centros de transferencia o plantas de tratamiento.

Este trabajo presenta el diseño de un modelo de logística inversa, el cual se resuelva por medio de un algoritmo que resuelve problemas de optimización multiobjetivo. El algoritmo propuesto utiliza el esquema de evolución diferencial para cruzar padres y obtener un solo hijo, el cual compite con un padre para saber quién pasa a la siguiente generación.

INTRODUCCIÓN

En la vida real se da una gran cantidad de situaciones en las cuales el ser humano se encuentra en la disyuntiva de elegir entre diferentes alternativas. Muchas situaciones son habituales y escasamente complejas, por lo que se pueden resolver directamente siguiendo procesos racionales relativamente sencillos. Sin embargo, existen otros problemas de mayor complejidad que no se pueden resolver de forma óptima siguiendo dichos procesos racionales, por lo que es necesario llevar una planificación formal para tomar la decisión óptima.

En matemáticas, la optimización es la disciplina encargada de encontrar una función que minimice o maximice su valor, en muchos casos sujetos a restricciones.

Durante las últimas décadas, investigadores de muchas disciplinas científicas han dirigido su trabajo al estudio, desarrollo e implementación de herramientas matemáticas de uso computacional eficiente, con el fin de solucionar diversos problemas que surge en las áreas de trabajo tales como la informática, finanzas, la planificación, el análisis de sistemas, la toma de decisiones, la predicción y logística, entre otros, dichas herramientas esta agrupadas en un campo del conocimiento que se conoce generalmente con el nombre de Inteligencia Artificial (IA).

La optimización combinatoria es una rama de la optimización con aspectos comunes de matemáticas aplicadas, ciencias de la computación e investigación operativa que trata problemas cuyas soluciones son discretas.

Una de las cuestiones importantes que hay que considerar al momento de resolver un problema de optimización es clasificarlo en función de la teoría de complejidad algorítmica. Esta clasificación se rige principalmente por criterios de espacio (cuanta memoria se necesita para resolver un problema) y tiempo (cuántos pasos se requieren para resolverlo). La relación entre la clase de problemas **P** (polinómico) y la clase **NP** (no polinómico), es una de las más utilizadas en computación y matemáticas.

Un problema **NP – duro** (en ingles *non-deterministic polynomial-time hard*, *NP-hard*) si al resolverlo en un tiempo polinómico permitiera resolver todos los problemas de clase **NP** en un tiempo polinómico.

La complejidad de estos problemas depende de los parámetros de entrada, usualmente del tamaño del problema a resolver, por lo que cuando dicho tamaño aumenta, el problema se vuelve rápidamente inabordable.

Con el objetivo de obtener soluciones aproximadas para este tipo de problemas, en las últimas décadas se han desarrollado técnicas heurísticas, las cuales son métodos o algoritmos exploratorios para la resolución de problemas en el que las soluciones se obtienen por la evaluación del progreso logrado en la búsqueda de un resultado final.

Si bien, cada una de las áreas de la Inteligencia Artificial puede contener un gran número de herramientas, esta investigación se centró en aquella que, de acuerdo con una revisión crítica y el estudio de la literatura relacionada, puede ser de ayuda en los problemas que surge en el área de estudio mencionada anteriormente.

Las razones que motivaron el estudio de los algoritmos genéticos, se basó en la capacidad que poseen para: aprovechar la tolerancia a la imprecisión y la incertidumbre del mundo real, logrando calidad, robustez y bajo costo (tanto en tiempo como en capacidad computacional).

Esta tesis trata sobre el diseño de un modelo de logística inversa, el cual se resolverá mediante técnicas metaheurísticas, y como herramienta de solución emplearemos el módulo de algoritmos genéticos del software MatLab2008^a, el cual resuelve de forma rápida modelos lineales continuos.

CAPITULO I

“Elementos protocolares”

1.1 Antecedentes de la investigación.

La cadena de suministro, nació para gestionar el flujo de información, productos y servicios a través de las redes de proveedores, clientes y empresas asociadas. Estas redes en los últimos años han sufrido un drástico cambio debido a la globalización.

La Logística Inversa “LI” es uno de los aspectos de la logística que más interés está provocando entre los profesionales e investigadores. Desde hace más de treinta años las cadenas logísticas vienen siendo ajustadas desde la materia prima hasta los clientes finales; así como también se ha observado la importancia que tiene desde el punto de vista ambiental y sobre todo el punto de vista económico; actualmente se acepta que la LI es una competencia clave en las cadenas logísticas modernas.

Una de las eficientes practicas de la LI es hacer más competitiva a una empresa al reducir el riesgo del cliente cuando adquiere un nuevo producto: Claro está que un gran número de clientes prefieren reducir su riesgo de adquisición cuando efectúan el proceso de selección de proveedores (Rogers, Tibben-Lembke, 2001). Dependiendo del ciclo de vida de los productos y del valor de los mismos, las empresas decidirán qué estrategias serán necesarias para gestionar eficientemente la LI.

La LI es cada vez más importante en el área de la industria en general debido a los factores de negocios y ambientales. La planificación e implementación de una red adecuada podría traer más beneficios, entre ellos, la satisfacción del cliente, y una buena imagen social de las empresas. Sin embargo, la mayoría de las redes de logística no están equipadas para manejar los productos en los canales de retorno inverso.

La sincronización de los diversos agentes involucrados en la cadena de suministro requiere una Planificación Colaborativa con el fin de realizar un trabajo coordinado para poder satisfacer las exigencias de un mercado cada vez más competitivo. En este trabajo se revisa la literatura referente a la LI en la cadena de suministro analizando aspectos estratégicos, como pueden ser los tipos, formas, relaciones o beneficios, y aspectos tácticos tales como la planificación, el cálculo de necesidades y la programación.

Un problema de optimización aplicado al diseño de redes logísticas debe ser resuelto, por ello y por varias razones se toma la decisión de utilizar **Algoritmos Genéticos (AGs)**, siendo éste un método adaptativo el cual puede ser usado para diversos problemas de optimización.

En 1995, Rainer Storn y Kenneth V. Price, desarrollaron un algoritmo evolutivo para optimización global sobre espacios continuos llamado ***Evolución Diferencial***. Este algoritmo realiza una cruce entre tres padres y suele converger rápidamente al óptimo (o a su vecindad) en problemas con una sola función objetivo y sin restricciones. Además, el desempeño de este algoritmo depende del control de pocos parámetros, lo cual facilita su uso en diversos problemas. Estas características hacen de la evolución diferencial un candidato idóneo para resolver problemas multiobjetivo. En estos problemas se busca optimizar dos o más funciones las cuales se encuentran en conflicto unas con otras, es decir, el mejorar una función significa empeorar el desempeño de las otras.

Este trabajo presenta el diseño de un algoritmo que resuelve problemas de optimización multiobjetivo utilizando la evolución diferencial en la generación de nuevas soluciones. Es importante mencionar que el algoritmo propuesto también contempla un esquema distinto en cuanto al manejo de restricciones permitiendo que algunas soluciones no factibles intervengan en la cruce ayudando a resolver eficientemente problemas multiobjetivo con restricciones (los cuales suelen ser más difíciles).

1.2 Planteamiento del Problema.

La LI, entendida como *“el proceso de planificación, implementación y control del flujo de materiales, desde un punto de uso, fabricación o distribución a un punto de recuperación o disposición adecuada siguiendo el sentido inverso del canal logístico”*, es uno de los aspectos de la logística que más interés está provocando en los profesionales e investigadores de las últimas décadas.

En este camino, al analizar y evaluar de una manera logística los diferentes componentes del sistema logístico de las organizaciones, el diseño, la administración y operación del (los) Centro (s) de recuperación “CRec”, constituyen factores claves de éxito para la adecuada gestión de la logística en las empresas, bajo la óptica de establecer las condiciones necesarias que le permita ofrecer un adecuado nivel de servicio, acorde con los requerimientos de los clientes y la estructura de la organización, concebida bajo un desempeño en función de la logística.

De esta forma, evaluar y calificar la operación logística integral del CRec, permite identificar y establecer las acciones pertinentes que faciliten el mejoramiento de las operaciones logísticas de almacenamiento, identificación y eliminación de costos ocultos, necesarias para el cumplimiento del

servicio ofrecido a los diferentes clientes y, al mismo tiempo, adquirir una optimización que contribuya a la generación de valor para la organización.

Existen fuerzas que incentivan el uso de la LI, destacando: Razones económicas (directa e indirecta), Razones Legislativas y Razones de responsabilidad extendida. En nuestro caso apreciamos que la fuerza económica se relaciona con todas las acciones de recuperación donde las empresas tienen una injerencia directa o indirecta de beneficios económicos.

1.3. Propósito de la investigación.

En los primeros trabajos académicos sobre la recuperación de Productos Fuera de Uso “PFU” en el ámbito de la empresa, datan de la década de los años 90, aunque ya en los años 70 se publican algunos trabajos en los que se analizaba el problema de la distribución en la industria de reciclaje. Gultinan y Nwokoye (1975) y Ginter y Starling (1978) dan los primeros pasos en ese sentido estudiando la estructura de los canales de distribución para el reciclaje. En estos primeros trabajos se hace referencia explícita a algunos de los aspectos que caracterizan las redes de distribución inversa, por ejemplo:

1. La existencia de muchos orígenes (consumidores) y pocos destinos (recuperadores) en la red de distribución.
2. Un conjunto de intermediarios numerosos y con nuevas funciones.
3. Importancia que tienen las actividades en la clasificación de los bienes recuperados.

En el trabajo de Ginter y Starling (1978) ya se señalaba como motivo principal del desarrollo de canales de distribución inversa, la existencia de una legislación medioambiental que condiciona o influye en el esquema operativo tradicional de las empresas. Sin embargo, no es hasta los años 90 cuando se comienza a estudiar con mayor profundidad la gestión de los PFU. Uno de los primeros trabajos fue el de Stock (1992) en el que se analizan, entre otras cuestiones los procesos logísticos relacionados con el retorno de productos desde el consumidor al productor, el reciclaje, la reutilización de materiales y componentes, la eliminación de residuos y las operaciones de restauración, reparación y refabricación. En este trabajo comienza ya el concepto de **Logística Inversa (LI)**.

Otro trabajo significativo es el de Thierry, Salomon, Van Numen y Van Wassenhove (1995) en el que se define el concepto de *gestión de productos recuperados*, cuyo objetivo es recuperar tanto valor económico como sea posible, reduciendo de esta forma las cantidades finales de residuos. Estos

autores defienden la idea de que las empresas deben desarrollar una política efectiva para la gestión de los productos recuperados, sin afectar significativamente la estructura de costos. En su trabajo se clasifican y se analizan, por vez primera, las opciones de que disponen las empresas para gestionar eficientemente el flujo de productos desde el consumidor hasta el productor, sugiriendo un conjunto de elementos que favorecen la implantación de un sistema de recuperación de los productos fuera de uso.

Stock (1998) recupera el tema de la LI, analizando el papel que desempeña la logística en aspectos tales como la devolución de productos, reducción en la generación de residuos, reciclaje, reparación y refabricación, desarrollando para ello modelos de gestión que combinan las técnicas de ingeniería logística y los modelos de decisión empresariales con objeto de rentabilizar los PFU.

Dowlatshahi (2000) agrupa los estudios y trabajos realizados sobre Logística Inversa en cinco categorías: *Conceptos generales, Modelos cuantitativos, Distribución, almacenaje y transporte, Perfiles empresariales, y Aplicaciones industriales.*

Este autor detecta ciertas deficiencias en los trabajos, principalmente en cuanto a la existencia de una estructura común sobre la que se sustentan, es decir no se ha desarrollado una teoría de la LI que dé fundamento a los distintos elementos que la componen.

Dowlatshahi (2000) da un paso en este sentido identificando factores estratégicos y operativos presentados en la tabla 1.1

Tabla 1.1 Factores estratégicos y operativos de LI. (Dowlatshahi, 2000).

Factores estratégicos	Factores operativos
• Costo de estos sistemas • La calidad de los productos recuperados • El servicio al consumidor • Aspectos medioambientales. • Condiciones legales.	• Transporte • Almacenaje • Producción (Refabricación/reciclaje). • Embalaje • Etc.

Fleischmann, Bloemhof-Ruwaard, Dekker Van der Lann y Van Vassenhove (1997), recopilan un conjunto de modelos cuantitativos diseñados para el análisis de la función inversa de la logística, agrupándolos en tres categorías claramente diferenciadas:

- 1) Sistemas de distribución.
- 2) Gestión de inventarios.
- 3) Modelos de planificación de la producción.

Éstos hacen referencia a más de 30 modelos cuantitativos, en su mayor parte diseñados y resueltos a través de técnicas de investigación operativa. Los autores concluyen que la LI es un campo científico

joven en el que las aportaciones realizadas son aún demasiado parciales. Señalan que existe un enorme desequilibrio entre el importante número de trabajos empíricos relacionados con la reutilización o el reciclaje de productos y los pocos, por el momento, desarrollos teóricos que den una revisión integral de esta cuestión.

Más recientemente Fleischmann (2001) estudia, entre otras cuestiones, cómo pueden describirse las características de los sistemas de logística inversa a través de modelos cuantitativos y, de esta forma mejorar nuestro proceso de toma de decisiones.

El desarrollo de la LI empieza a ser una realidad: la elaboración de tesis doctorales (Thierry, 1997, Krikke, 1998; Fleischmann, 2001), las publicaciones en reconocidas revistas académicas (European Journal of Operational Research, International Journal of Production Economics, Interfaces, Omega, etc.) la apertura de nuevas líneas de investigación o la constitución de grupos de investigación específicos sobre esta materia (REVLOG European Working Group, RELLOP, Reverse Logistics Executive Council), entre otros, están contribuyendo a que la LI empiece a cobrar importancia dentro del mundo académico y profesional. Nos encontramos en un camino apasionante por recorrer sobre la investigación de este tema.

1.4 Objetivos de investigación.

Para introducirnos en el área de la investigación, utilizaremos la definición de LI formulada por Stock (1998): “Desde la perspectiva de la logística en los negocios, este término se refiere al rol de la logística en las devoluciones, reducción de las fuentes de aprovisionamiento, reciclaje, sustitución de materiales, reutilización de materiales, desechos, restauración, reparación y refabricación; desde la perspectiva de la ingeniería logística, ésta se refiere a la gestión de la LI y a un modelo sistemático de negocio que aplica, a través de la empresa, las mejores ingenierías logísticas y metodologías de gestión con el objetivo de obtener beneficios al cerrarse el circuito de la cadena de suministro”.

En este sentido, reducir los niveles de retorno así como minimizar al máximo el volumen de productos en la cadena inversa, sin deteriorar el servicio al cliente y cumpliendo las normativas legales existentes, es uno de los objetivos que se están fijando en muchas empresas, en la búsqueda de incrementar su eficiencia y eficacia de la gestión de la cadena de suministro total.

1.4.1 Objetivo general:

El objetivo de este trabajo de investigación está centrado en el Diseño un modelo de logística inversa, que garantice un nivel de servicio objetivo con un mínimo de compromiso de recursos, a través de una modelación que optimiza los recursos logísticos tanto en flujo directo como en flujo inverso. Abordando el problema dinámico de localización de (los) Centro (s) de Recuperación, además permitirá en el futuro una operación y seguimiento de sus PFU en tiempo real con los beneficios de mejorar la gestión y control de inventarios, dicho modelo será optimizado con el uso de Algoritmos Genéticos.

1.4.2 Objetivos particulares:

- Describir los principales flujos logísticos inversos de productos existentes al final de su vida útil y caracterizar dichos flujos para establecer una tipología de los mismos e identificar las similitudes o diferencias entre ellos.
- Describir y modelar el problema de la localización de un CRec de residuos en una región determinada.
- Identificar los parámetros y variables relevantes consideradas en los sistemas de gestión de LI.
- Plantear una metodología general para resolver problemas de localización CRec en LI.
- Seleccionar y ajustar las técnicas metaheurísticas más adecuadas para aplicar la metodología propuesta.
- Desarrollar una herramienta informática basada en la metodología propuesta para poder aplicarla en la resolución y optimización del problema presentado.

1.5 Alcances y limitaciones de la tesis

El concepto de logística focalizada surge como respuesta al actual contexto de los escenarios de conflicto, sujetos a altas dosis de incertidumbre, lo cual conlleva a que se pueda brindar un soporte logístico basado en un sistema de información en tiempo real y basado en redes. Dicho sistema de información debe incluir herramientas que permitan asesorar el proceso de toma de decisiones tanto a nivel estratégico, operacional o táctico. Destacamos la importancia del uso de **Centros de Recuperación (CRec)** como una práctica que además de reducir costos logísticos permite conectar orígenes de suministro con áreas de operaciones de una manera precisa, dispersa, flexible y oportuna.

El área económica de los costos logísticos revisten una importancia, de ahí el valor de su adecuada gestión, mejorar su control y eficiencia, por ello es necesario establecer políticas cuyos procedimientos a emplear resulten de fáciles utilizar y permitan una operación fluida para las empresas.

1.6 Estructura de la tesis.

La propuesta de la tesis doctoral que presentamos se estructura en VII capítulos agrupados en dos partes:

- La primera parte (Capítulos I al III) delimita los elementos protocolares de la misma. Así como también atiende el marco teórico sobre que nos vamos a basar nuestro trabajo. Es decir revisaremos aspectos genéricos y cualitativos de la misma, haciendo una revisión bibliográfica general tanto de la LI como la Computación Evolutiva (CoEv).
- Mientras que la segunda parte (Capítulos IV al VI) trata fundamentalmente, de contenido empírico, es decir será cuantitativo y específico, ya que presentaremos un problema de localización dinámica en LI, proponiendo una metodología para su resolución, desarrollando la aplicación del modelo optimizado por AGs; y finalmente, en el capítulo VII se presentarán las respectivas conclusiones.

A medida que se avanza en la lectura de esta tesis, vamos encontrando desde los aspectos más generales de LI hasta los más específicos, pasando por la definición, a la revisión bibliográfica de los distintos problemas relativos.

En este primer capítulo, de carácter introductorio, hemos presentado las motivaciones que nos llevan a desarrollar una tesis doctoral, justificando y analizando la evolución histórica del concepto de la LI, y presentando el estado en que se encuentra la investigación sobre este tema. Además hemos formulado la tesis que vamos a defender y el procedimiento que emplearemos para ello.

En el Capítulo II se presentan los conceptos y fundamentos relevantes para el estudio de la gestión empresarial de los Productos Fuera de Uso (PFU) y se analizarán las implicaciones estratégicas, operativas y tácticas que se originan.

El Capítulo III proporciona los elementos básicos acerca del tipo de problema que se aborda en la tesis, contiene las definiciones y conceptos básicos necesarios para comprender la problemática de la

optimización multiobjetivo, enumerando las principales técnicas de programación matemática y nos muestra el estado del arte de los AGs para problemas de optimización multiobjetivo.

En el Capítulo IV se brinda una recopilación detallada de los modelos más significativos para el análisis de la LI, los cuales emplean técnicas de investigación operativa en su formulación y resolución. Llevando a cabo un análisis de estos sistemas y presentando una propuesta de mejora referida a un comportamiento dinámico.

Para el Capítulo V presentaremos un modelo de LI aplicando una técnica para resolver problemas multiobjetivo, detallando cada una de sus partes: codificación, selección, cruce, mutación, manejo de restricciones y manejo de los datos.

El Capítulo VI se recoge los resultados derivados de la modelización propuesta y la realización de un análisis descriptivo de los modelos empleados en la simulación.

Por último en el Capítulo VII se dan las conclusiones de este trabajo, señalando las ventajas y desventajas y se exponen futuras líneas de investigación que se pueden derivar de esta tesis en el ámbito de la función de LI y su optimización multiobjetivo con computación evolutiva.

CAPITULO II

“Sistemas Logísticos y la Logística Inversa”

2.1 Introducción.

En este capítulo se atenderán los distintos enfoques sobre la LI y sus problemas de gestión, de manera breve y resumida, que se han encontrado en la literatura y, en base a los mismos se va a concretar qué se entiende. Se identifican y definen los costos logísticos relevantes y su relación intrínseca. Cabe señalar que en este capítulo no se pretende llevar a cabo un análisis profundo de los diversos tópicos relacionados con el tema en cuestión, ya que ello está bastante documentado en la literatura existente; sin embargo, más se enfoca a identificar aquellos elementos que más se relacionan con el tema de la gestión de LI, que sirven como preámbulo para abordar su modelación matemática.

2.2 Evolución del concepto de Logística.

La Logística ha existido desde tiempos remotos, pero tal y como se conoce actualmente tiene su génesis en el campo militar, como la encargada del movimiento y la habilitación de las tropas en campaña. Muchas guerras han sido ganadas o pérdidas por la culpa de la Logística, es por ello que el concepto ha sufrido cambios en cuanto a su definición, por considerar el termino a las actividades que abarca, pero hace pocas décadas la Logística empieza a tomarse como una disciplina empresarial. Por ello nos referimos a Smykay, Bowersox y Mossman (1961) para poder hablar del primer libro que siguiere la posibilidad de alcanzar beneficios a través de la gestión de una parte de la Logística (distribución física).

Drucker hizo una importante aportación en pro de la Logística mediante la publicación de un artículo en 1962, titulado “The Economy’s Dark continent”, donde decía “que la distribución es la última frontera del negocio” y que “había mucho trabajo por hacer en esta materia”.

Heskett, Ivie y Glaskowsky (1973), definen la logística como “Gestión de todas las actividades que facilitan el movimiento y coordinación de la oferta y la demanda para dotar a los productos de utilidad de lugar y en el tiempo”.

Existen muchas definiciones de Logística, de las cuales se van a exponer dos de ellas (mismas que están ampliamente admitidas), correspondientes a dos prestigiosas asociaciones de profesionales en el campo de la Logística: Council of Logistics Management (CLM) mismo que ahora es The Council of Supply Chain Management Professional (CSCMP) en Estados Unidos, mientras que en Europa es

The European Logistic Association (ELA). CSCMP (2007), dice: “Logística es el proceso de planificar, implementar y controlar, de una manera eficiente, el flujo de materias primas, inventarios en curso, productos terminados, servicios e información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el fin de satisfacer las necesidades del cliente”.

Por otro lado, ELA (1991) define a la Logística como: “La organización, planificación, control y ejecución del flujo de bienes desde el aprovisionamiento, pasando por la producción y distribución, hasta el cliente final con el fin de satisfacer los requerimientos del mercado al mínimo costo y la mínima inversión”.

Según Mejias Sacaluga (2001), ambas definiciones resultan similares en su base, ambas coinciden en el concepto de Logística como proceso de gestión, en su ámbito de aplicación y en la orientación eficiente al cliente final con que debe plantearse.

Actualmente se aboga por un término más amplio que el de “cadena de suministro” que es el de “red de suministro”, con el cual se sale el concepto lineal de cadena hacia otro más abierto de red (Christopher, 1998)

Después de haber estudiado encontramos que muchas son las definiciones que se han formulado sobre el concepto de Logística (entre otras muchas, Bowersox, 1974, CLM, 1985, Chase y Aquilano, 1994, Gutiérrez y Prida 1998) y en todas ellas se establece un único sentido para el flujo de materiales y productos que circula, a través del sistema logístico, desde el productor hacia el consumidor (Sánchez, Duran y Gutiérrez (2001). Ahora bien se puede entender mejor la definición de la LI que representa un paso más en el crecimiento del ámbito de logística. De este tema se ocupan los apartados siguientes.

2.3 Logística Inversa.

Desde sus inicios la actividad empresarial ha fijado los conceptos de gestión en el sentido de proveedor a cliente; diseñando productos, envases, embalajes, gestionando procesos productivos, y distribuyendo sus productos, hasta que el bien llega a manos del consumidor. Hasta hoy, la mayoría de los fabricantes han tenido la tendencia de ignorar el destino final de sus productos cuando éstos concluyen su vida útil; no se sentían responsables de lo que ocurría con el producto después de su utilización por el consumidor.

El nuevo paradigma de empresa responsable y sostenible se asienta sobre los siguientes fundamentos: apertura, sensibilidad hacia el entorno, sentido de comunidad, capacidad innovadora, consideración de largo plazo y creación de valor (Olcese et al, 2008)

En los años setenta aparecen las primeras investigaciones que estudian los procesos de recuperación y reutilización de los productos fuera de uso (Guiltinan y Nwokoye, 1975, Ginter y Starling, 1978). En estos primeros estudios se analizan la estructura de los canales de distribución para el reciclaje, los elementos que participan en estos canales y las nuevas funciones que aparecen.

Debido a la corta historia de la LI, así como lo reciente que son las investigaciones realizadas al respecto, al parecer no existe una terminología común generalmente aceptada.

Stock (1992) en una de sus publicaciones editadas por CLM, introduce la LI como: "... el término normalmente usado para referirse al papel de la logística en el reciclado, vertido de residuos y gestión de materiales peligrosos. Una perspectiva más amplia incluye todo lo relacionado con las actividades logísticas encaminadas a la reducción de material, reciclado, sustitución y reutilización de materiales y residuos"

Una caracterización similar es proporcionada por Kopicki (1993) y de igual manera fue editada por CLM, dice: "... es un término que se refiere a las capacidades y actividades de la gestión logística involucrada en la reducción, gestión, y eliminación de materiales peligrosos o no, desde embalajes a productos finales. Incluye la distribución inversa, como se acaba de definir, la cual provoca el flujo de productos e información en dirección opuesta a las actividades logísticas normales".

En otra publicación, Pohlen y Farris (1992) definen la LI como: "... el movimiento de bienes desde el consumidor hacia el productor en un canal de producción"

Para finales de los noventa, en una publicación del CLM, Rogers y Tibben-Lemke (1999), se refieren a la LI, como: "... los procesos de planificación, desarrollo, y control de forma efectiva y eficiente del flujo de materia prima, productos intermedios, bienes finales e información relacionada desde el punto de consumo de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de tal manera que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor añadido y/o consiguiendo una adecuada eliminación del mismo".

En esta definición tenemos presente los dos flujos existentes en la función logística de las empresas:

1. Flujo directo o hacia adelante, que engloba el conjunto de actividades relacionadas con el flujo total de materiales, productos e información desde el productor hasta el consumidor, desde el aprovisionamiento de materias primas hasta la entrega del producto al cliente.
2. Flujo inverso o hacia atrás, que hace referencia tanto a la recuperación como a la devolución de los productos, subproductos y materiales susceptibles de ser reintroducidos en el proceso productivo de la empresa o en otros procesos diferentes, a las actividades necesarias para ello y al flujo de información que se establece desde el consumidor hasta el recuperador.

Como se ha expuesto anteriormente, nuestro actual tipo de vida y los hábitos de consumo de nuestra sociedad provocan cada vez la más creciente generación de residuos de distinto origen y tipología con la problemática asociada a su gestión.

Parada (2009), menciona que la LI cubre los aspectos derivados de trasladar los bienes desde el consumidor o distribuidor hasta el fabricante, y si proceden devoluciones por cualquier causa hasta los CRec, sí es un bien o un PFU, con el fin de recurrir a su reutilización o destrucción, y para ser esquemático muestra la figura 2.1.

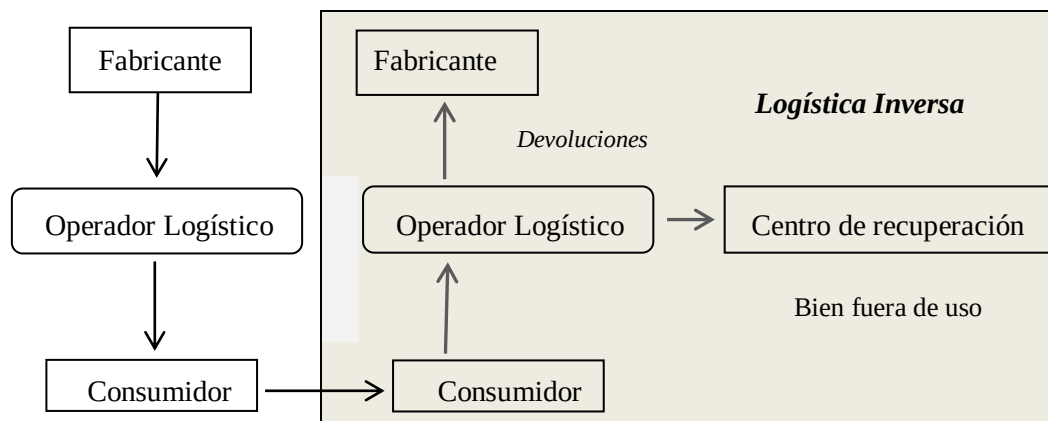


Figura. 2.1 Ciclo logístico del producto, Parada (2009).

Es fácil darse cuenta que cada una de las definiciones anteriores utiliza distintos criterios para delimitar el término “LI”. Stock y kopicki dan importancia al elemento de la eliminación de residuos y sitúan a la LI en el contexto de la gestión ambiental.

En contraste Pohlen y Farris (1992), se refieren al sentido “aguas arriba” del flujo de materiales como criterio diferenciador de la LI con respecto al flujo “aguas abajo” comúnmente considerado por la Logística.

Finalmente Rogers y Tibben-Lembke (1999), comparte con Pohlen y Farris (1992), el sentido “aguas arriba” y además se centran en la gestión de los flujos de materiales que pueden conducir a cerrar el ciclo entre punto de origen y punto de consumo. Esta es la concepción más actual.

El grupo Europeo de LI, RevLog (1998), va más allá de la definición de Rogers y Tibben-Lembke añadiendo, a los propósitos de capturar valor y de disminuir la eliminación, también la recuperación de los productos o su reprocesado.

Para fines de estudio en la presente tesis emplearemos la definición más amplia posible, que podría ser la proporcionada por RevLog (1998): *“...es el proceso de planificación implementación y control del flujo de materias primas, inventario en proceso y bienes terminados, desde un punto de uso, fabricación a un punto de recuperación o disposición adecuada”*.

Por lo antes expuesto procederemos a realizar una caracterización de los flujos y de las redes en la LI.

2.4 Criterios para clasificar los flujos de la Logística Inversa.

La LI se ocupa de una variedad de flujos, y para hacer una clasificación de estos flujos se deben tomar en cuenta muchos criterios. Fleischmann y otros (2000) y Fleischmann (2000), enuncian aquellos criterios que se consideran importantes en este campo. Estos son los motivos que originan el flujo correspondiente, el destino final de esos flujos, los actores involucrados, la duración de la vida útil de los productos correspondientes y los tipos de materiales que forman esos flujos.

2.4.1 Causa de flujo.

Los motivos que originan un flujo de LI pueden ser varios, los más importantes son: motivos económicos (directa e indirecta) incluyéndose en éste el de marketing, y motivos legales o de protección de los activos; Se puede apreciar que la fuerza económica está relacionada a todas las acciones de recuperación donde la compañía tiene inferencia directa o indirecta de beneficios económicos.

- *Motivos económicos.* Naturalmente la empresa buscará en la ejecución de sus actividades un valor añadido y una oportunidad de negocio. En ese sentido, las razones de tipo económico que impulsan a las empresas hacia la recuperación y el aprovechamiento de los productos fuera de uso pueden analizarse desde dos puntos de vista: Desde el punto de vista de la demanda, la recuperación de los productos fuera de uso y su reintroducción en el proceso productivo de la

empresa, puede ser utilizado por ésta como un instrumento de marketing y, de hecho es un aspecto que integran el denominado marketing ecológico (Bañegil y Rivero, 1998).

De este modo y considerando lo comentado anteriormente hasta ahora, encontramos la definición de Rubio (2003) en su tesis doctoral que el concepto de Recuperación económica se define como: "... aquel proceso de recuperación del producto fuera de uso que tiene por objeto aprovechar el valor añadido que aún se incorporan estos, a través de la opción de gestión adecuada, de manera que se obtenga con ello una rentabilidad económica o se provoque la consecución de ventajas competitivas de carácter sostenible".

La recuperación de los productos fuera de uso requiere del diseño, desarrollo y control eficiente de un sistema logístico capaz de recoger el producto fuera de uso y conducirlo hasta el centro de recuperación, lugar donde se hará una gestión más adecuada para un óptimo aprovechamiento. A este sistema logístico se le denomina Sistema de Logística Inversa (SLI).

Guide (2000), señala que el desarrollo del SLI supone enfrentarse a un problema complejo en el que se debería tomar decisiones relativas, entre otras cuestiones, al número y localización de los CRec de los productos fuera de uso, métodos de transporte para estos productos, si son propios o ajenos, sistemas de incentivos para la recuperación de los productos nuevas tareas logísticas. Como podemos observar el diseño y control del SLI presentará implicaciones a niveles estratégicos, tácticos y operativos que afectan a todos los sistemas funcionales de la empresa.

- **Motivos legales.** Estos motivos cada vez están siendo cada vez más importantes. Los gobiernos en todos los niveles, están haciéndose más conscientes de la importancia de los aspectos medioambientales y empiezan a promulgar leyes y otras disposiciones enfocadas a la LI como fuentes de mejoras en el medio ambiente; por lo que los fabricantes están obligados a reducir el vertido de productos que han fabricado después de su uso.

Lo anterior indica que se ha trazado un plan que establece una jerarquía para la gestión de los residuos, dando preferencia en primer lugar a la **Prevención**, siguiendo la **Recuperación** de residuos (con prioridad de la reutilización frente al reciclaje y de éste frente a la valorización o aprovechamiento energético de residuos) y por último a la **Eliminación** de los residuos mediante su deposición en vertederos. Tal y como lo exponen Porter y Van der Linde (1995b, 97) "... la idea de una batalla entre la ecología y la economía parte de una visión estática de regulación medioambiental donde: la tecnología, los productos, los procesos y las necesidades del consumidor aparecen predeterminados". Por lo antes expuesto, las empresas no estarían considerando la gestión de los PFU, únicamente motivada por las presiones legislativas, sino que

se encontrarían formas de lograr ventajas competitivas sostenibles y con ello la consecución de sus objetivos empresariales.

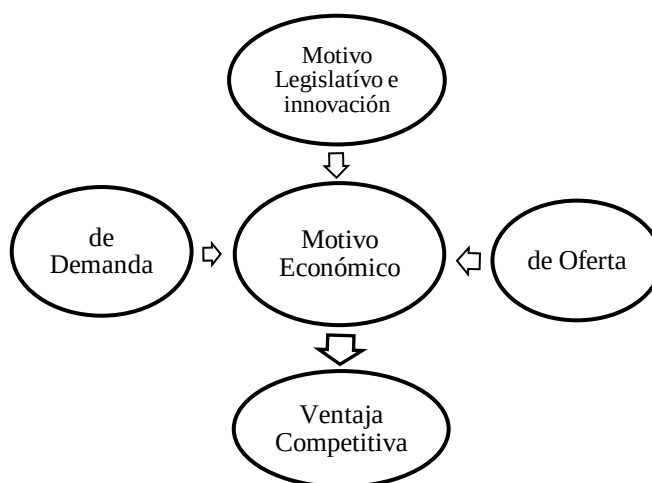


Figura. 2.2 Motivos para la recuperación de PFU. Rubio, 2003.

La figura 2.2 presenta los motivos para el establecimiento de mecanismos para la recuperación y el aprovechamiento de los productos desechados por los consumidores, siendo importante para la gestión de las actividades logísticas.

2.4.2 Destino Final.

Los motivos descritos anteriormente están relacionados con las posibles opciones de recuperación del valor de los productos en cuestión, es decir los destinos finales de los flujos inversos, en este orden de ideas y partiendo de la clasificación hecha por Thierry y otros (1995), distinguen las distintas formas de recuperación en función del punto de entrada de nuevo a la cadena de valor.

Los productos pueden reutilizarse sin ninguna transformación de importancia, salvo limpieza y algún pequeño mantenimiento. Kroon y Vrijens (1995), analizaron un sistema de recuperación y reutilización de contenedores industriales para una empresa de servicios logísticos holandesa.

2.5 El Sistema de Logística Inversa.

Una vez conceptualizado el término LI, podemos decir que diferentes autores reconocen a la LI como un problema complejo, es decir que existen ciertas características asociadas al retorno (producto material) o al mercado al cual está destinado ese retorno. De forma que para generar un modelo que sea más general posible, y analizando las características marcadas dentro de la literatura, de tal forma que estas puedan ser congruentes con las descritas por el modelo, para ello nos basamos en los esquemas de Brito y Dekker (2003). Presentan un esquema donde se identifican tanto los

componentes como las actividades que se deben tomar en cuenta para el diseño de un sistema de Logística Inversa (SLI).

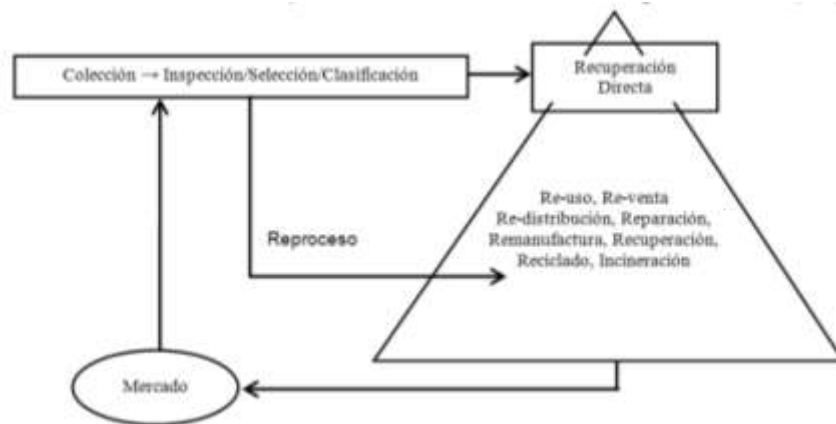


Figura 2.3 El proceso de la Logística Inversa. Brito y Dekker (2003).

Con respecto a la figura 2.4 observamos que se presenta una propuesta acerca del proceso de LI, donde el esquema no está limitado para cierto tipo de empresa, entendiéndose que ésta puede ser una aplicación universal, donde identificamos el origen del proceso o de la LI como el “mercado”, punto de partida donde se generan todas las actividades allí indicadas.

Ahora procedemos a mostrar las pautas para generar el modelo de un SLI.

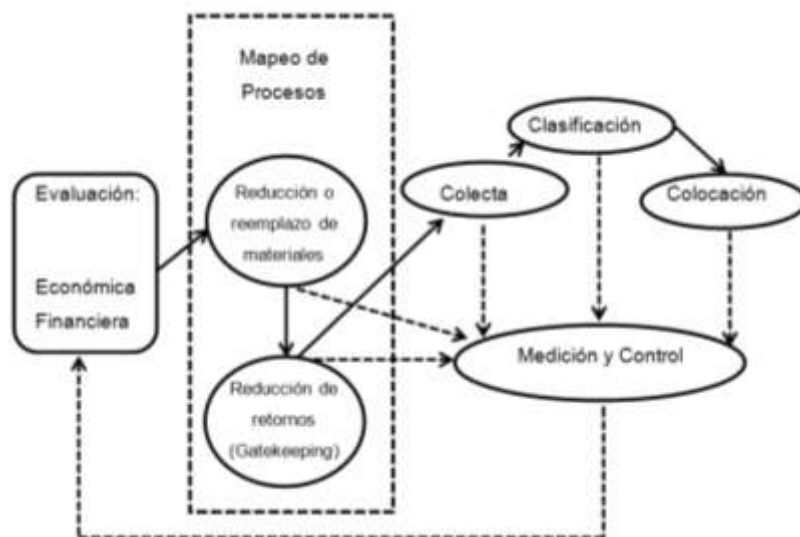


Figura 2.4 Fases del Sistema de LI. (García, 2006)

Como primer paso, dentro del sistema tenemos la fase de **Evaluación** del problema y sus posibles implicaciones intrínsecamente del sistema, generalmente se dice que existe un problema asociado a la LI, si se reconocen los siguientes problemas dentro de la cadena de suministro:

- Los retornos arriban antes que el procesamiento o disposición adecuada.
- Se tiene una cantidad grande de inventario de retornos que está en el almacén.
- Existen retornos no autorizados o no identificados.
- Existen tiempos de ciclo de procesamiento largos.
- El costo total de los retornos causa malestar al cliente.
- Se pierde la confianza del cliente en una actividad de reparación.

Esta evaluación por sus implicaciones dentro del sistema, puede también ser económica o financiera, para una evaluación económica se usan precios de referencia y beneficios tangibles, así como intangibles; mientras que para la evaluación financiera principalmente se utilizan los costos asociados con las actividades logísticas, su posible reducción, los ahorros generados, el mejor aprovechamiento de los recursos y principalmente como una medida de convencimiento y negociación, al mostrar que este tipo de medidas son útiles a la sociedad o a la organización.

Para efectos de esta tesis nos centraremos más en los aspectos financieros de evaluación, basándonos en el reconocimiento de los costos asociados para la organización.

La segunda fase es la de **Reducción de Materiales** o en dado caso su reemplazo por otros menos contaminantes o más “amigables” a los procesos de reutilización o reciclaje, esto se hace principalmente en dos grandes categorías de reutilización o la modificación de los materiales de empaque, ó el reemplazo de ciertos materiales para bajar los costos, siempre cuidando que estos sean ambientalmente agradables o en su caso rediseñando el producto para su posterior reutilización de sus componentes.

La siguiente fase se enuncia a la **Reducción de los retornos**, siendo está integrada a una sola fase con la reducción de materiales puesto que al iniciar el estudio el sistema puede ser necesario mapear el proceso inicial de principio a fin, de manera que se aprecien en contexto las principales causas que originan el retorno.

Se considera como cuarta fase a la **Colecta de los retornos**, siendo esta la más compleja de la logística, ya que se empiezan a manejar puntos de diseño como: los tiempos de recolección, la planificación de las rutas, los puntos de transferencia del sistema, el análisis de los involucrados en el sistema.

La conexión entre las fases se observan por flechas, las cuales nos indican los pasos del diseño del Sistema de LI.

Una vez que se ha colectado los retornos las siguientes fases es la **Clasificación**, que es donde se decide qué tipo de tratamiento se le dará al retorno, es decir qué tipo de las actividades asociadas con la LI es la más adecuada para el retorno, no olvidemos que en esta categoría debemos decidir si debe

ser reparado, renovado, reciclado, reprocesado, reutilizado, reutilizar algunas partes (canibalizado) o simplemente asignado a su disposición final (vertedero).

Otra de las fases consideradas en el diseño se refiere a la **Colocación de los retornos**, ya que una cosa es localizar los retornos acopiarlos y clasificarlos pero si no se tiene en cuenta una colocación de esos retornos, estos no pueden generar valor, haciendo que todo el proceso sea inútil, dentro de esta fase se decide qué hacer con los retornos.

Finalmente consideremos la fase de **Medición y control**, la cual es una evaluación que nos permite medir la eficacia de nuestros objetivos y controlar la eficiencia del proceso, permitiéndonos la retroalimentación.

2.6 Modelos Cuantitativos para el análisis de los Sistemas de LI.

El estudio del SLI se han venido desarrollando desde sus inicios junto con la elaboración de modelos cuantitativos, permitiendo así obtener información más precisa sobre el diseño y el funcionamiento de la red inversa y mejorando el proceso de toma de decisiones. De esta manera, resulta necesario considerar, junto con el análisis de los SLI, los modelos cuantitativos diseñados para su descripción y estudio.

Para llevar a cabo una revisión bibliográfica se realizó una clasificación de los distintos modelos que se han utilizado como criterio de clasificación.

2.6.1 Modelos para la reutilización.

Kroon y Vrijens (1997) analizan un sistema para la reutilización de contenedores en una empresa de servicios logísticos de Holanda, empleando el término sistema logístico de devoluciones (RLS), refiriéndose a la consideración de la función de la LI en su etapa de distribución física, en este trabajo plantearon un modelo de simulación y modelo de programación lineal entera binaria que intentaba responder a las siguientes cuestiones: número de contenedores disponibles, localización de los mismos, funcionamiento de los sistemas de cuotas y de recolección, distribución y servicio. Se trató de un modelo de localización de instalaciones, de carácter estático, que se resuelve para distintos escenarios, manera que amortigüe el efecto de la incertidumbre asociada a estos modelos. Aunque el modelo no respondió a todas las cuestiones los resultados obtenidos fueron válidos para el proceso de toma de decisiones de la empresa. Ante estas limitaciones los autores propusieron algunas mejoras

consistentes en la utilización de técnicas más fiables para la determinación de la demanda de contenedores, e introducir varios periodos temporales, y distintos tipos de contenedores, etc.

Krikke y Schuur (1999), presentaron un modelo de programación lineal entera mixta, que permite el diseño de una red de LI para la recuperación y refabricación de automóviles, suponiendo que el recuperador del automóvil recicla una parte del mismo (30%) y refabricar el resto.

2.6.2 Modelos para el reciclaje.

Spengel, Püchert, Penkuhn y Rentz (1997), formulan dos modelos de programación lineal entera mixta con aplicaciones, al reciclaje de productos en primera instancia y por otra parte al desmantelamiento y reciclaje de viviendas. El primer modelo estudia el problema de localización de instalaciones y asignación de flujos; y el segundo plantea el diseño de un sistema integrado para el desmantelamiento y reciclaje de viviendas, donde ambos procesos son interdependientes, lo que significa que, el desmantelamiento se producirá sólo si las opciones de reciclaje son económicamente viables. Observamos que se trata de un problema de maximización de una función de beneficios, definida como la diferencia entre los ingresos procedentes de la reutilización de los materiales y los costos de las operaciones de demolición.

Ammons, Realff y Newton (1997), desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta que sirve de apoyo al proceso de diseño y desarrollo de una red de reciclaje de moqueta en Estados Unidos. Se trata de un modelo estático que maximiza una función de beneficios, definida por la diferencia entre el valor total del material reciclado y los costos generados durante el proceso (transporte y reciclaje), sujeta a determinadas restricciones de capacidad y de conservación. Este programa se empleó para determinar la convivencia de abrir nuevas instalaciones para el reciclaje de estos productos fuera de uso en la empresa DuPont.

Barros, Dekker y Scholten (1998) diseñaron un sistema para la recuperación y el reciclaje de arena proveniente de construcciones. Tratándose de un modelo de localización de instalaciones y asignación de flujos, formulado a través de un problema de programación lineal entera mixta, siendo un modelo de carácter estático, aplicándose a un caso real de la industria de la construcción en Holanda.

Realff y otros (1999), recuperaron el modelo de recuperación de moquetas de Ammons, y otros (1997) utilizando un horizonte temporal que permite considerar la estructura dinámica de la red de reciclaje, el modelo empleado fue por programación lineal entera mixta sirviendo de apoyo para la toma de decisiones acerca de la localización de instalaciones de reciclaje, este modelo se validó con datos reales y su correspondiente análisis de sensibilidad.

Autor	Spengler y otros (1997)	Spengler y otros (1997)	Ammons y otros (1997)	Barros y otros (1998)
Producto	Demolición de viviendas Materiales de construcción	Subproductos de hierro y acero	Moquetas	Arena para la construcción
Opción 3-R	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje
Modelización	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
Decisiones	Estrategias: Tácticas: * * Asignación de opciones 3-R	Estrategias: * Localización de instalaciones * Tipo y capacidad de proceso Tácticas: * Asignación de subproductos a procesos	Estrategias: * Número de instalaciones de recolección * Número de instalaciones de reciclaje Tácticas: * Asignación entre instalaciones	Estrategias: * Número de instalaciones * Localización de instalaciones Tácticas: * Asignación de PFU a instalaciones
Estructura Red	* Open-Loop	* Open-Loop	* Open-Loop	* Open-Loop
Tipo de SLI	Ejercicio simulación	Ejercicio simulación	Ejercicio simulación	Ejercicio simulación
Análisis de escenarios	No	Si	Si	Si

Tabla 2.1 Modelos para reciclaje. (Sumario 1) Spengler y otros (1997), Barros y otros (1998) y Ammons y otros (1999)

Louwens, Kip, Peters, Souren y Flapper, (1999) proponen un modelo de localización y asignación para el reciclaje de moquetas en Alemania y Estados Unidos. El proyecto RECAM tiene como objetivo la constitución de una red europea de reciclaje de materiales o su utilización como combustible, para ello se propuso un modelo matemático en el que se determina la localización física de las instalaciones, sus capacidades, la asignación de los flujos de materiales de estas instalaciones y los medios de transporte. Este modelo se distingue de otros modelos matemáticos para la localización de instalaciones en que no se restringe inicialmente el conjunto de ubicaciones posibles, siendo la elección completamente libre. El problema se traduce en minimizar una función general de costos en la que se consideran costos de adquisición, transporte y almacenamiento del material recuperado, los costos originados por el proceso de reutilización, los costos de inventarios y transporte de material

procesado y los costos de eliminación de los residuos generados. Los resultados obtenidos sugieren que es posible constituir redes económicamente viables para la reutilización de estos materiales.

Fleischmann (2001), describió un modelo genérico para una red de recuperación de PFU, mediante la formulación de un problema de programación lineal entera mixta, el problema consiste en diseñar una red que conecta a dos mercados, donde uno recupera el producto (mercado de eliminación) y el otro se vende el producto recuperado (mercado de reutilización). Se consideran tres tipos de instalaciones que, situadas en distintos niveles. Estas instalaciones son los centros de desmontaje, donde se recogen y clasifican los PFU. El modelo propuesto se considera como un problema de minimización en función de costos de inversión y operación, en donde se toman decisiones acerca del número y localización de las instalaciones que serán operativas (variables estratégicas de carácter binario) y los flujos que se asignarán a cada instalación (variable táctica de carácter continuo).

Autor	Realff y otros (1999)	Lowers y otros (1997)	Shih (2001)	Fleischmann (2001)
Producto	Moquetas	Moquetas	Ordenadores y pequeños aparatos eléctricos	Papel
Opción 3-R	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje	Reciclaje
Modelización	Optimización PLEM estática y determinista	Programación matemática estática y determinista. Algoritmos numéricos	Optimización PLEM estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
Decisiones	Estrategias: * Número de instalaciones recogida y reciclaje Tácticas: * * Asignación de flujo de instalaciones	Estrategias: * Número , localización y capacidad de instalaciones * Número y puntos de recogida y de destino Tácticas: * Asignación de flujos a través de la red	Estrategias: * Número de almacenes y plantas de reciclaje * Localización de dichas instalaciones Tácticas: * Asignación entre PFU a almacenes * Asignación de almacenes a plantas de reciclaje	Estrategias: * Número y localización de plantas proceso * Número y localización de puntos de distribución y reciclaje Tácticas: * Asignación entre instalaciones
Estructura Red	* Open-Loop	* Open-Loop	* Open-Loop	* Open-Loop * Flujos logísticos integrados
Tipo de SLI	SLI propio	Proyecto para un SIG	SIG	Ejercicio simulación
Análisis de escenarios	Sí	Si	Si	Si

Tabla 2.2 Modelos para reciclaje. (Sumario 2) Realff y otros (1999) Lowers y otros (1997) Shih (2001) Fleischmann (2001).

Shih (2001), estudia una red para el reciclaje de equipamiento eléctrico y electrónico en Taiwan, la ley de este país obliga a los fabricantes e importadores a recuperar sus productos y gestionar adecuadamente los residuos que se generan. El diseño planteado propone un modelo PLEM, con el objetivo de minimizar la función de beneficios; los ingresos provienen de la venta del material reciclado y de las cuotas satisfechas por los fabricantes e importadores para su participación en el sistema de reciclaje. Los costos totales se generan por nuevas instalaciones, transporte, costos operativos, de proceso y de eliminación de los productos recuperados. Esta función de beneficios se maximiza de acuerdo con unas restricciones de carácter técnico y económico.

2.6.3 Modelos para la refabricación.

Krikke (1998) desarrollo un modelo para la recuperación y posterior refabricación de fotocopadoras en Europa. Concretamente el modelo formula una red de LI para dos modelos diferentes de fotocopadora, el cual será analizado en diferentes escenarios para considerar las distintas situaciones planteadas por la gerencia de la empresa. El problema se modela a través de PLEM.

Jayaraman, Guide y Srivastava (1999), proponen un modelo genérico de LI formulado a través de un problema de PLEM y su posterior aplicación en la industria de productos electrónicos de consumo. En este modelo, de carácter estático, una empresa ofrece productos refabricados a consumidores localizados en determinadas zonas geográficas a través de unos almacenes o centros de distribución. Se trata de un problema de minimización de una función de costos sujeto a unas restricciones de capacidad.

Klausner y Hendrickson (2000) analizan un programa voluntario de recolección de máquinas herramientas en Alemania, las cuales son recicladas o refabricadas. El objetivo del modelo es determinar el costo óptimo de ese sistema de incentivos y, en general, el costo óptimo del SLI, se trata de un modelo de simulación en el que se establecen relaciones de carácter lineal entre las variables y parámetros del modelo.

Fleischmann (2001) aplicó su modelo genérico de recuperación a un ejemplo de refabricación de fotocopadoras en el que, como en el caso analizado de la red de reciclaje, trata de evaluar las ventajas de un diseño integral de la función logística frente al diseño secuencial.

Existen más trabajos relacionados con las redes de recuperación de PFU que no se han mencionado, precisamente por haber sido diseñados para el análisis de cuestiones más específicas como ejemplo, el efecto sobre los inventarios (Van der Laan y Salomon, 1997), la planificación de necesidades de

materiales (Thierry, 1997), los canales de distribución para los productos recuperados (Ginter y Starling, 1978), mercados para estos productos (Ferrer, 2000), o el estudio de las actividades asociadas a la LI (Johnson, 1998). El interés de este apartado fue el de presentar modelo propuestos en la literatura para el diseño de la función de la LI.

Autor	Krikke (1998)	Jarayanan y otros (1999)	Klausner y Hendrickson (2000)	Fleischmann (2001)
Producto	Fotocopiadoras	Teléfonos móviles	Máquinas herramientas	Fotocopiadoras
Opción 3-R	Refabricación	Refabricación	Refabricación	Refabricación
Modelización	Optimización PLEM estática y determinista	Programación matemática estática y determinista. Algoritmos numéricos	Simulación estática y determinista	Optimización PLEM estática y determinista
Decisiones	Estrategias: * Localización de plantas de recolección * Localización de plantas de refabricación	Estrategias: * Localización de instalaciones Tácticas: * Asignación de materiales entre plantas * Decisiones de almacén	Estrategias: * Costo del sistema Buy-Back	Estrategias: * Número y localización de plantas fabricación, distribución y refabricación Tácticas: * Asignación entre instalaciones
Estructura Red	* Closep-Loop	* Closep-Loop	* Closep-Loop	* Open-Loop * Flujos logísticos integrados
Tipo de SLI	SLI propio	Modelización para un SLI propio	SLI propio	Ejercicio simulación
Análisis de escenarios	Sí	Si	Si	Si

Tabla 2.3 Modelos cuantitativos para la refabricación. (Sumario). Krikke (1998), Jarayanan y otros (1999), Klausner y Hendrickson (2000) y Fleischmann (2001).

2.7 Razones económicas para la recuperación de productos fuera de uso.

Naturalmente, será la función logística de la empresa, en su consideración de flujo inverso, la que permita recuperar PFU y materiales fuera de uso y gestionarlos para obtener así una rentabilidad económica. De esta forma, podemos analizar diferentes sistemas de logística inversa a través de los cuales desarrollar el proceso de recuperación económica del producto fuera de uso, de acuerdo con las características propias del producto, del proceso, de la empresa o de la estructura existente en la cadena de suministro, entre otras.

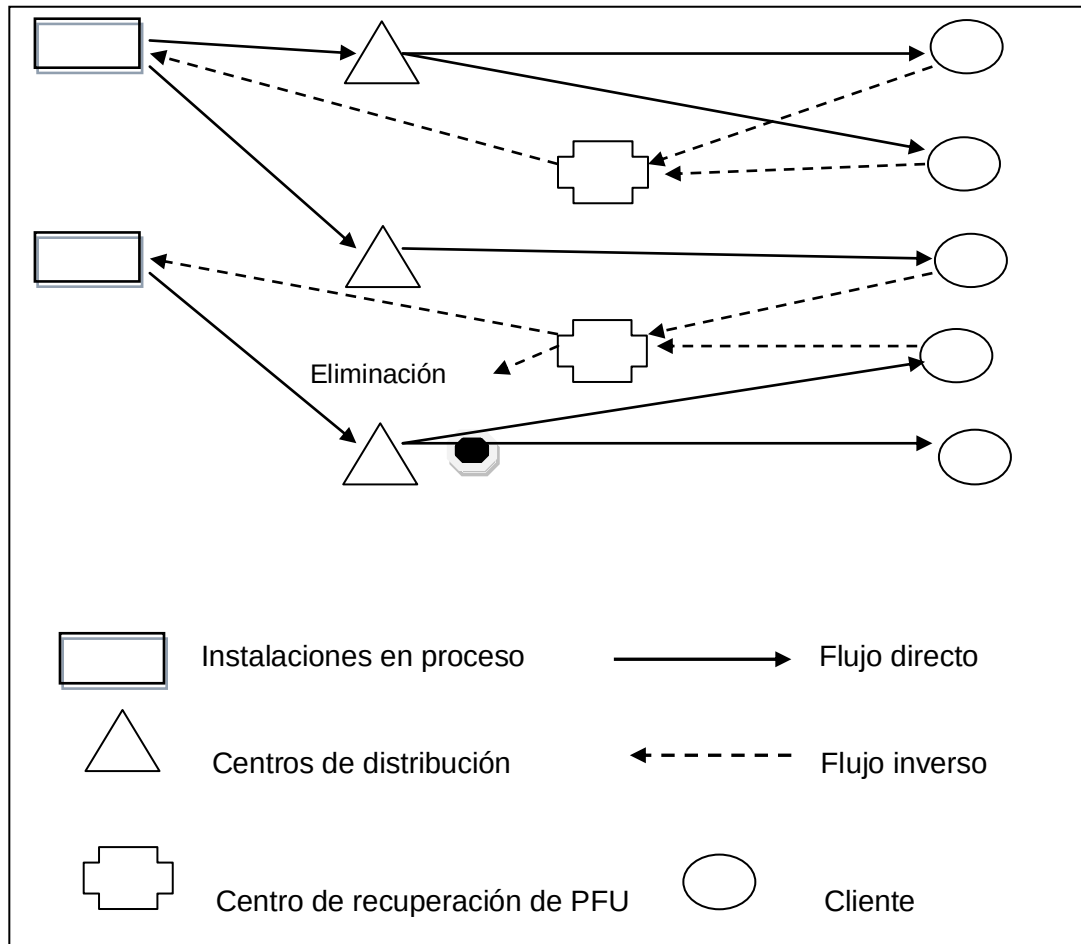


Figura 2.5 Estructura del modelo de una red de recuperación. (García, 2006).

La implementación de LI especialmente en los productos de retorno se supondría un ahorro no solo para los costos de inventarios, los costos de transporte, y el costo por eliminación de residuos, debido a los productos devueltos, sino que también para la mejora de la lealtad del cliente y las ventas de futuros, es por ello que mostramos la estructura del modelo de una red de recuperación (Fig. 2.5).

CAPITULO III

“Algoritmos genéticos y evolutivos: Un método de optimización”

3.1 Introducción.

El introducir en este capítulo el concepto general de optimización, ofrece una visión más amplia de las principales técnicas heurísticas encontrada en la literatura para abordar problemas de optimización de gran complejidad. Revisaremos los distintos tipos de heurísticas de optimización, clasificándolas en función de si trabajan con una sola solución (métodos basados en trayectorias) o utilizan poblaciones de soluciones (métodos poblacionales). Algunos de los métodos que describiremos serán utilizados en capítulos posteriores como métodos de referencia para evaluar la calidad de los procedimientos de esta tesis doctoral.

Existen áreas del conocimiento y del quehacer humano donde surgen problemas relacionados con la mejora de determinados procesos o la obtención de mejores soluciones (generales o particulares). La disciplina que estudia este tipo de problemas es conocida como optimización. (Pardalos y Resende, 2000)

3.2 Conceptos generales de optimización.

Los problemas de optimización pueden clasificarse en función de diferentes factores como su complejidad, la existencia o no de restricciones, su carácter estático o dinámico, lineal o no lineal, mono-objetivo o multiobjetivo, etc. Puchinger y Raidl (2005), mencionan que en cuanto a las técnicas de búsqueda, estas pueden clasificar en función de si aseguran obtener el resultado óptimo (técnicas exactas) o si por el contrario permiten obtener soluciones cercanas al óptimo (técnicas aproximadas)

Groschel (1995), indica que la optimización combinatoria, consiste en encontrar la mejor solución (óptima) de entre un conjunto finito de soluciones alternativas. La calidad óptimalidad de las soluciones vendrá definida por la capacidad de dichas soluciones para minimizar o maximizar una determinada función, denominada función objetivo, compuesta por un conjunto determinado de variables definidas sobre un conjunto discreto. Esta disciplina tiene numerosas aplicaciones en ámbitos como las ciencias, la ingeniería, la industria, la logística, la administración de las organizaciones, etc. Es claro que estas aplicaciones requieren la ayuda de optimizadores, provocando gran interés en los últimos años en el desarrollo de nuevos métodos.

Blum y Roli (2003), define un problema de optimización combinatoria (en inglés Combinatorial Optimization Problem **COP**) se puede definir como $\mathbf{COP} = (\mathbf{F}, \mathbf{f})$, utilizando los siguientes conceptos:

- Un conjunto de variables $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_n\}$;
- Dominio de la variables $\mathbf{D}_1, \dots, \mathbf{D}_n$;
- Una función objetivo $\mathbf{f}: \mathbf{D}_1 \times \dots \times \mathbf{D}_n \rightarrow \mathbb{R}^+$;
- Un conjunto de restricciones entre las variables;

El conjunto de todas las soluciones que satisfagan las restricciones entre las variables constituye el llamado **espacio de búsqueda, o espacio de soluciones, F**

Formalmente,

$$\mathbf{F} = \{ \mathbf{s} = \{(x_1, u_1), \dots, (x_n, u_n)\} \text{ con } u_i \in \mathbf{D}_i, i = 1, \dots, n, \text{ tal que } \mathbf{s} \text{ satisfaga todas las restricciones del problema} \}.$$

La función objetivo transforma los vectores de decisión ($\mathbf{s}$) desde el espacio de búsqueda hacia un objetivo $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}$. De esta forma, dado un problema de minimización, el objetivo es encontrar aquella solución $\mathbf{s}' \in \mathbf{F}$, tal que $\mathbf{f}(\mathbf{s}') \leq \mathbf{f}(\mathbf{s})$, $\forall \mathbf{s} \in \mathbf{F}$. La solución $\mathbf{s}'$ se denomina **optimo global del COP**. La figura 3.1(a) muestra gráficamente un problema de optimización con varios mínimos locales, y un mínimo global correspondiente a la solución optima del problema.

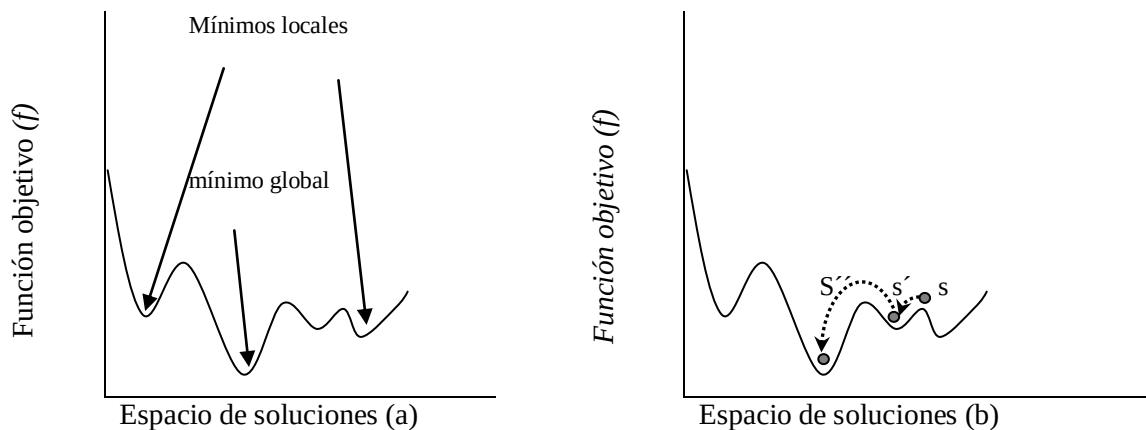


Figura 3.1 (a) Problema de optimización con varios mínimos locales y un mínimo global, (b) mejora de soluciones. Groschel (1995)

El estudio de los problemas de optimización (Groschel, 1995), es un tema donde se está invirtiendo suficiente esfuerzo de investigación. En optimización combinatoria confluyen la matemática discreta, la teoría de algoritmos, y la programación lineal. Todo problema de programación lineal consiste en una función objetivo lineal que se ha de minimizar o maximizar a la vez que sus variables están sujetas a restricciones también lineales. Si además se exige que las variables tomen valores enteros nos encontramos ante un problema de programación lineal-entera. Un amplio número de problemas de optimización combinatoria pueden ser resueltos en tiempo polinómico utilizando los métodos y teoría de la programación lineal. Sin embargo, en el caso de que el problema a resolver pertenezca a la categoría de los llamados NP-completos (Garey y Jhonson, 1979), la capacidad de encontrar una solución exacta es inversamente proporcional al tamaño del problema. Bajo dichas circunstancias, el uso de técnicas deterministas suele resultar ineficiente, por lo que resulta conveniente aplicar técnicas heurísticas (Glover, 1997), que permitan encontrar soluciones, si no óptimas, al menos aproximadas en tiempos de ejecución aceptables.

3.3 Metaheurísticas de Optimización.

En las últimas décadas se ha desarrollado una nueva clase de algoritmos de aproximación que básicamente tratan de combinar métodos heurísticos básicos en un marco de alto nivel orientado a buscar la eficiencia en el proceso de búsqueda. Durante los años 80 y principios de los 90 estas técnicas se conocieron como heurísticas modernas (Glover, 1993). Dichas técnicas consisten en procedimientos sistemáticos de prueba que ofrecen soluciones aceptables, no necesariamente óptimos absolutos, para problemas donde el espacio de soluciones es indeterminado o lo suficientemente amplio como para que no pueda ser evaluado en un tiempo aceptable. En muchos casos, las técnicas heurísticas se diseñan en función de las características particulares del problema a resolver. En la actualidad existe un gran número de técnicas heurísticas de optimización.

Además del concepto de heurística, es habitual hablar de meta-heurística; la cual la describe Vob, Martello, Osman y Roucirol (1999), como un proceso iterativo maestro que guía y modifica las operaciones de heurísticas subordinadas para producir una de forma eficiente soluciones de alta calidad.

Las heurísticas subordinadas pueden ser procedimientos de alto o bajo nivel, un método de búsqueda local o simplemente un método constructivo. Aunque suele considerarse como una meta-heurística a toda aquella generalización de una determinada heurística para cualquier tipo de problema.

Entre las principales técnicas meta-heurísticas de optimización podemos encontrar:

Técnica	(en inglés)	Autor:
Enfriamiento simulado	Simulated annealing, SA	Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi (1983)
Búsqueda tabú	Tabu search, TS	Glover, Laguna y Dowsland (1993 y 1997)
Algoritmos genéticos	Genetic Algorithms, GA	Holland (1975), Golberg (1989)
Búsqueda dispersa	Scatter Search, SS	Glover (1977), Marti, Laguna y Glover (2006)
Algoritmos meméticos	Memetic Algorithms, MA	Moscato (2000)
Búsqueda en vecindario variable	Variable Neighborhood Search, VNS	Hansen y Mladenovic (1999)
Búsqueda local guiada	Guided Local Search, GLS	Voudouris y Tsang (1998)
Procedimientos de búsqueda, basado en procedimientos adaptativos aleatorios	Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, GRASP	Feo y Resende (1995)
Optimización mediante colonias de hormigas	Ant Colony Optimization, ACO	Dorigo y Di Caro (1999)
Búsqueda local iterada	Iterated Local Search, ILS	Ramalhino, Martin y Stutzle (2002)
Redes neuronales	Neural Networks, NN	Smith (1999)
Optimización por enjambre de partículas	Particle Swarm Optimization, PSO	Kennedy y Eberhart (1995)
Se incluyen técnicas híbridas que combinan diferentes meta-heurísticas		Talbi (2002)

Tabla 3.1 Principales técnicas meta-heurísticas de optimización, (sumario de literatura) Talbi (2002).

Blum y Roli (2003) proporcionan las características básicas de las meta-heurísticas:

- *Son estrategias que guían el proceso de búsqueda.*
- *Exploran eficientemente el espacio de búsqueda con el objetivo de encontrar soluciones próximas al óptimo global.*
- *Las técnicas que constituyen las meta-heurísticas varían entre métodos de búsqueda local simple a complejos métodos de aprendizaje.*

- Pueden incorporar mecanismos para evitar quedar atrapados en óptimos locales del espacio de búsqueda.
- Pueden hacer uso del conocimiento del dominio específico de forma que las heurísticas son controladas por estrategias de nivel superior.
- Las meta-heurísticas avanzadas utilizan la experiencia de búsqueda (haciendo uso de algunas formas de memoria) para guiar la búsqueda.

En función de las características propias de cada meta-heurística, se pueden establecer diferentes clasificaciones, y las más aceptadas según Blum (2003):

- Técnicas inspiradas vs. No inspiradas en la naturaleza. *Muchas meta-heurísticas, como por ejemplo los algoritmos genéticos (Holland, 1975), enfriamiento simulado (Krikpatrick, 1983), optimización mediante colonias de hormigas (Dorigo y Di Caro, 1999), etc., basan su funcionamiento en aspectos inspirados de la naturaleza. Otras, como por ejemplo búsqueda tabú (Glover, 1993) o la búsqueda local guiada (Voudouris, 1998), no simulan aspectos de la naturaleza.*
- Técnicas basadas en trayectorias vs. Poblaciones. *Un aspecto diferenciador entre la meta-heurística radica en el número de soluciones que se utiliza en el proceso de optimización. Meta-heurísticas como enfriamiento simulado (Krikpatrick, 1983), o búsqueda tabú (Glover, 1993) utilizan una sola solución durante el proceso de búsqueda, por lo que suelen denominar métodos de trayectoria ya que la solución describe una trayectoria desde la solución de partida hasta encontrar la solución final. Por otro lado, las técnicas como algoritmos genéticos (Holland, 1975) hacen uso de un conjunto de soluciones (población) que son optimizados de forma simultánea durante la búsqueda. Normalmente los métodos poblacionales suelen conseguir soluciones de más calidad debido a la ventaja que supone explorar simultáneamente diferentes áreas del espacio de búsqueda.*
- Técnicas estáticas vs. Técnicas dinámicas. *Otro aspecto diferenciador entre meta-heurísticas radica en la función de aptitud utilizada. Mientras que en la mayoría de las heurísticas utilizan la misma función objetivo durante todo el proceso de búsqueda, otras, como la búsqueda local guiada (Voudouris, 1998), modifican dicha función en tiempo de ejecución, lo que ayuda a escapar de mínimos locales.*

- Técnicas basadas en estructuras de vecindario único vs. Vecindarios múltiples. *La mayoría de los algoritmos trabajan con una estructura de vecindario simple, es decir, la topología del espacio objetivo no cambia durante la búsqueda. Sin embargo, existen meta-heurísticas como la búsqueda de vecindario variable (Hansen y Mladenovic, 1999) que diversifican la búsqueda mediante el uso de diferentes espacios de soluciones.*
- Meta-heurísticas con memoria vs. Sin memoria. *Uno de los criterios más utilizados para clasificar las metaheurísticas es el uso que hacen de su historia de búsqueda, es decir, si utilizan memoria o no. Heurísticas como el enfriamiento simulado (Krikpatrick, 1983) utilizan exclusivamente el estado actual del proceso de búsqueda a la hora de determinar la próxima forma de actuación. Otras técnicas como la de búsqueda tabú (Glover, 1993) utilizan información previa (memoria) del proceso de búsqueda a la hora de determinar nuevas decisiones. Existen dos formas principales de hacer uso de la memoria. Una de ellas consiste en incorporar memoria a corto plazo teniendo en cuenta las últimas decisiones tomadas (movimientos realizados, soluciones visitadas, etc.). En otros casos se hace de memoria a largo plazo, que considera toda o una gran parte de la búsqueda realizada.*

3.4 Optimización y Computación Evolutiva.

Los algoritmos evolutivos son ampliamente aplicados a problemas de optimización con espacios de búsqueda muy grandes y complejos. Colin B. Reeves (1993) menciona que aquellos problemas donde los algoritmos deterministas no escalan apropiadamente o simplemente no funcionan suelen ser los más adecuados para utilizar algoritmos evolutivos, debido a que estos son heurísticas, no aseguran obtener un óptimo global en todas las ocasiones, pero normalmente obtienen una muy buena solución en un tiempo computacional considerablemente bajo, además de que no se requiere un conocimiento específico sobre el problema a resolver.

La computación evolutiva (CE) o conocido también como algoritmos evolutivos engloba a procesos de adaptación inspirados en los mecanismos de la evolución y selección natural (Neo-Darwinismo) este conjunto de heurísticas que basan su funcionamiento en el mecanismo de la selección natural propuesto por Charles Darwin (Hoffman, 1989), y utilizando operadores genéticos mantienen una población de individuos en constante evolución.

En la CE, su primer inspirador fue el biólogo Alexander S. Frase, quién desarrollo trabajos a fines de los años 50, acerca de la evolución de los sistemas biológicos. Estos trabajos fueron el detonante para las aportaciones de Box, Friedberg, Friedman, Barricelli y Bremermann, quedando éstas como bases de la CE (Fogel, 1999).

La CE tiene un dominio de aplicación muy extenso, la cual va desde la optimización numérica de una variable hasta la optimización multiobjetivo pudiendo involucrar diferentes variables en el proceso. La generación de soluciones de problemas del mundo real es gracias a que trabaja con base análoga al Neo-Darwinismo (particularmente el hecho de que las poblaciones a lo largo de las generaciones evolucionan en la naturaleza acordes a los principios de la selección natural y la supervivencia de los más aptos) la evolución de dichas soluciones hacia los valores óptimos del problema dependen en buena medida de que se implanten adecuadamente los siguientes puntos:

- *Codificar las estructuras que se replicarán (es decir, representar adecuadamente las soluciones al problema a resolverse).*
- *Operaciones que incidan sobre los “individuos”.*
- *Una función aptitud, que juegue el papel del ambiente.*
- *Un mecanismo de selección.*

En la CE, una población está compuesta por varios individuos; un individuo es una solución a un problema y es codificado según las necesidades del problema; el medio donde se desenvuelve este individuo es representado por la función objetivo; y las restricciones al problema nos dicen qué tan apto es el individuo para sobrevivir en ese medio. A estos individuos llamados padres de la población se les aplican operadores probabilísticos (cruza y mutación) para obtener nuevos individuos (hijos) que mantienen algunas propiedades de los antecesores los cuales se conservan o se eliminan mediante una selección (determinística ó probabilística), este proceso se realiza con cada uno de los nuevos individuos de la población hasta formar una nueva población con nuevos individuos. Este proceso se repite en un cierto número de iteraciones (llamadas generaciones en computación evolutiva).

Pero existen diversos paradigmas en la computación evolutiva y se agrupan en tres paradigmas principales:

- *Programación Evolutiva.*
- *Estrategias Evolutivas.*

- *Algoritmos Genéticos.*

Es importante mencionar que una variante del algoritmo genético que ha adquirido gran popularidad en los últimos años es la programación genética.

3.4.1 Programación evolutiva.

La Programación evolutiva (PE), se fundamenta en las ideas expresadas por Lawrence J. Fogel, en los años 60, quien concibió el uso de la evolución simulada en la solución de problemas. En este paradigma la inteligencia se ve como un comportamiento adaptativo y se enfatiza los nexos de comportamiento entre padres e hijos. Lo anterior lo mostro en su tesis doctoral (1964), empleando la “PE” para hacer evolucionar autómatas de estados finitos, de manera que fuesen capaces de predecir secuencias futuras de símbolos que recibirían. Fogel utilizó una función de recompensa para indicar si un autómata era bueno o no para predecir un cierto símbolo.

En la programación evolutiva es una abstracción de la evolución al nivel de las especies, por lo que no se aplica ningún operador de recombinación (diferentes especies no pueden cruzarse entre sí). Así mismo, emplea selección probabilística (generalmente por torneo estocástico). Actualmente existen variantes de esta técnica con diversos dominios de aplicación.

3.4.2 Estrategias evolutivas.

Hacia los mediados de los años 60 Peter Bienert (1967), Ingo Rechenberg en Alemania (1973) y Hans-Paul Schwefel (1965) desarrollaron un método de ajustes discretos aleatorios inspirado en el mecanismo de mutación que ocurre en la naturaleza; denominándose “Estrategias Evolutivas” (**EE**). Inicialmente Ingo Rechenberg en su intento de resolver un problema de hidrodinámica con alto grado de complejidad la versión original llamada **(1 + 1) – EE** o estrategia evolutiva de dos miembros, usaba un solo padre y con él se generaba un solo hijo. Este hijo se mantenía solo si el hijo era mejor que el padre o de lo contrario se eliminaba (selección extintiva).

En la **(1 + 1) – EE**, un individuo nuevo es generado usando: $\bar{x}^{t+1} = \bar{x}_t + N(0, \sigma)$

Donde: **t** se refiere a la generación actual o iteración.

$N(0, \sigma)$ Es un vector de números Gaussianos con una media de 0 y desviación estándar de σ

En las estrategias evolutivas no solo se evolucionan las variables del problema sino también los parámetros mismos de la técnica (desviación estándar), permitiendo con esto la auto-adaptación. La recombinación es posible gracias a que en la **EE** se trabaja a nivel de los individuos (fenotípico), la recombinación puede ser tanto sexual como panmícticas (se refiere a una población formada por individuos de sexos separados y en donde no hay apareamientos preferenciales, por lo que cada gameto de un sexo tiene la misma probabilidad de unirse a un gameto del sexo contrario.) es decir cualquier individuo puede reproducirse con otro con una probabilidad que depende solamente de su aptitud y la selección utilizada es generalmente determinista.

<i>Aportación:</i>	<i>Autor:</i>	<i>Notación:</i>
<i>Concepto de población μ padres y genera un solo hijo reemplazando al peor padre de la población</i>	<i>Rechenberg (1973)</i>	$(\mu + 1) - EE$
<i>Concepto de múltiples hijos</i>	<i>Schwefel (1975)</i>	
<i>a) Los μ mejores padres y λ hijos obtenidos sobreviven</i>		<i>a) $(\mu + \lambda) - EE$ y</i>
<i>b) Solo μ hijos obtenidos sobreviven</i>		<i>b) $(\mu, \lambda) - EE$</i>

Tabla 3.2 Tipos de estrategias evolutivas.

Observamos en la tabla 3.2 que Rechenberg (1973), introdujo la población de estrategias evolutivas, y propuso la $(\mu + 1) - EE$, en la cual hay μ padres que generan un solo hijo, el cual puede reemplazar al peor padre de la población.

Schwefel (1975), introdujo después el uso de múltiples hijos $(\mu+\lambda)-EE$ y la $(\mu, \lambda)-EE$. En el primer caso, en la selección se toman en cuenta tanto a hijos como a padres; en el segundo caso, en la selección solo se toman cuenta a los hijos.

3.4.3 Algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos (denominados originalmente *Planes reproductivos*), fueron introducidos por John H. Holland a principios de los años 60, y son por mucho la técnica evolutiva más popular de la actualidad (Holland, 1962). El objetivo fue el estudio formal de los procesos de adaptación natural y el traslado de estos mecanismos a la computación. Una definición bastante completa de algoritmos genéticos (AGs) es la brindada por John Koza (1992):

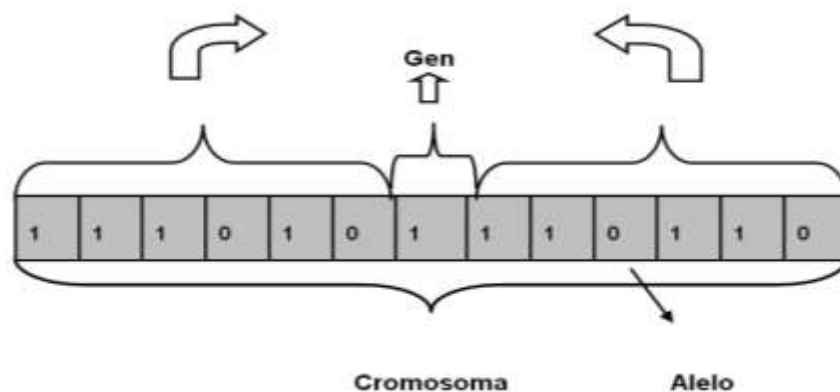
Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de una forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia una cierta función matemática que refleje su aptitud.

Para la resolución de problemas mediante AG, en primer lugar hay que codificar las soluciones candidatas en formas de *cromosomas*, manteniéndose en todo instante t una *población* de individuos o cromosomas $P(t) = \{x_1^t, x_2^t, \dots, x_N^t\}$.

Los cromosomas $(x_1^t, x_2^t, \dots, x_N^t)$, serán evaluados para comprobar lo buenos que son como solución al problema, obteniéndose de dicha evaluación una medida de su aptitud. Para ello se utilizará una función de evaluación, función aptitud, o función de adecuación, que será encargada de medir la idoneidad de cada cromosoma, representando por tanto la conexión entre el AG y el problema a resolver. El AG, enfatiza la importancia del operador de recombinación (operador principal) sobre el de mutación y emplea una selección probabilística.

para poder aplicar el AG, se requiere de los siguientes seis componentes básicos:

- 1) Una representación de las soluciones potenciales del problema. La representación es la cadena binaria para la codificación de las soluciones del problema (a la cadena se le llama cromosoma). A cada posición de la cadena se le denomina gen y al valor dentro de esta posición se le llama alelo (puede ser "0" ó "1").



La codificación binaria es la más común en los AG, y dada su universalidad, los operadores básicos de un AG se definen a partir de dicha representación, no olvidemos que un fenotipo se refiere a la apariencia del individuo, mientras que el genotipo se trata del gen.

- 2) Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones (normalmente un proceso aleatorio).*
- 3) Una función de evaluación que juegue el papel del ambiente, clasificando las soluciones en términos de su aptitud.*
- 4) Un mecanismo de selección que permita seleccionar a los individuos de acuerdo a su aptitud. En los AGs se puede llevar el proceso de selección de diversas maneras, ya sea determinística o probabilísticamente (dando la oportunidad a los menos aptos para reproducirse, y favoreciendo a los más aptos). Las técnicas de selección se pueden agrupar en tres grupos:*

a) Selección proporcional: originalmente propuesta por Holland (1962). En esta selección los individuos se eligen de acuerdo a su aptitud con respecto a la población, se subdivide en:

- i. Ruleta.*
- ii. Sobrante estocástico.*
- iii. Universal estocástico.*
- iv. Muestreo determinístico.*

Y puede presentar aditamentos como: escalamiento sigma, jerarquías y selección de Boltzman.

b) Selección mediante Torneo: Propuesto por Wetzel (1983). Se selecciona con base en comparaciones directas entre los individuos se subdivide en:

- i. Torneo determinístico.*
- ii. Torneo probabilístico*

c) Selección de estado uniforme. Propuesta por Whitley (1989), reemplaza a los individuos menos aptos de la generación por los más aptos de la nueva generación.

- 5) Operadores genéticos (cruza, mutación y elitismo) que alteren la composición de los hijos que se producirán en las siguientes generaciones. El AG enfatiza la importancia de la cruce sexual (operador principal) sobre el de la mutación (operador secundario) y necesita elitismo para poder converger al óptimo (Günter, 1994).*

Existen tres tipos principales de cruza:

- a) *Cruza de un punto: Se selecciona un punto de manera aleatoria dentro del cromosoma de cada padre y a partir de éste se intercambian los materiales genéticos para dar origen a nuevos individuos. (Holland, 1962).*
 - b) *Cruza de dos puntos: Igual a la anterior excepto que se generan dos puntos de cruza por cada padre (De Jong, 1975).*
 - c) *Cruza uniforme: cruza de n puntos (Syswerda, 1989 y Davis, 1991).*
- 6) *Valores para los diferentes parámetros que utilizan el AG (tamaño de la población, probabilidad de cruza, probabilidad de mutación, número máximo de generaciones, etc.).*

3.5 Algoritmos genéticos y evolutivos: Fase de diseño.

A la hora de diseñar un algoritmo evolutivo, se deberán seguir los siguientes pasos básicos:

1. *Elegir una representación adecuada para las soluciones del problema. Será necesario algún conocimiento de la naturaleza del problema a resolver.*
2. *Crear una población inicial de soluciones. Lo habitual es obtener la población inicial de forma aleatoria. Habrá que tener cuidado con los valores asignados cuando tengan que satisfacerse un conjunto de restricciones.*
3. *Elegir un método de selección.*
4. *Diseñar la función de evaluación, aquí se requieren conocimientos específicos del problema a resolver, por lo que puede ser la tarea más complicada si el algoritmo está siendo diseñado por un programador general, sin conocimientos específicos sobre la materia.*
5. *Elegir operadores a utilizar. Dependerá de la representación elegida para los cromosomas.*
6. *Decidir los valores que tomarán los distintos parámetros del algoritmo, como el tamaño de la población y probabilidades de aplicaciones de los distintos operadores.*

3.5.1. La población inicial: Los cromosomas.

El primer paso del algoritmo evolutivo será la creación de los cromosomas que compondrían la población inicial. Ésta estará formada por un conjunto de N cromosomas que representarán posibles soluciones al problema, codificadas de una forma útil para el algoritmo $\mathbf{P}(t) = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0\}$. Lo

habitual es generar los cromosomas de la población inicial de forma aleatoria, es decir, creando un conjunto de vectores cuyos elementos serán números obtenidos aleatoriamente.

El tamaño de la población es un parámetro importante. Un tamaño demasiado pequeño traerá consigo una convergencia demasiado rápida y que ésta se produzca hacia un óptimo local, mientras que el tamaño demasiado grande requerirá de un enorme costo computacional.

Como ya se ha comentado, los AGs tradicionales utilizan cadenas de bits como forma de representación estándar. Los cromosomas deberán contener la información correspondiente a todas las incógnitas del problema, teniendo asociado cada una de dichas incógnitas un número de genes del cromosoma, dependiendo dicho número de la precisión deseada.

Ejemplo 3.1 Supóngase que se quieren determinar los valores de las variables x_1 y x_2 que den lugar a un mínimo en la función f definida a continuación:

$$f(x_1, x_2) = -\cos(x_1) \cdot \cos(x_2) \cdot e^{-((x_1-\pi)^2(x_2-\pi)^2)}$$

Donde $-50 \leq x_1 \leq 50$ para $1 = 1, 2$.

Puesto que la codificación empleada por los AGs cada gen es un bit, un posible cromosoma sería el siguiente:

(1 0 0 1 0 1 1 1 0 1 | 0 0 0 1 1 1 1 0 1)

Donde los 10 primeros bits corresponderían a x_1 y los 10 últimos a x_2 . Con el número de bits empleado, cada variable podrá tomar 2^{10} valores diferentes entre los límites establecidos en el enunciado. Por tanto, el intervalo $(-50, 50)$ se discretizará en 1024 valores y la máxima precisión será $100/1023$ (el primer valor de los 1024 es cero). Con esto, los números codificados en binario del posible cromosoma anterior serían equivalentes a $(9.1398, -37.781)$. Si fuera necesaria una mayor precisión, habría que incrementar el número de bits de los cromosomas, con el consiguiente aumento del costo computacional.

En el caso de un algoritmo evolutivo, se podrían emplear como cromosomas vectores con números reales como elementos, que tendrían una precisión bastante mayor que $100/1023$ sin necesidad de incrementar el tamaño de los cromosomas.

3.5.2. La función de evaluación, función de aptitud o función de adecuación.

La *función de evaluación* juega el mismo papel que el entorno en la evolución natural. Mediante la función de evaluación se obtiene una medida de lo adecuadas que son las distintas soluciones al problema. Esta medida se conoce como **aptitud**.

En el diseño de la función de evaluación se requerirán unos conocimientos específicos del problema a resolver. Una ventaja de los algoritmos evolutivos, respecto a otros métodos de optimización, es que pueden emplear cualquier tipo de función de evaluación, no necesariamente analítica.

La función de evaluación será la función a optimizar por medio del algoritmo. Los algoritmos evolutivos se han mostrado eficaces en la optimización de funciones complejas, con gran número de óptimos locales, debido a su capacidad de trabajar con varias soluciones potenciales de forma simultánea. Una representación de la función del ejemplo 3.1 se muestra en la figura 3.2, donde se aprecia la naturaleza del problema.

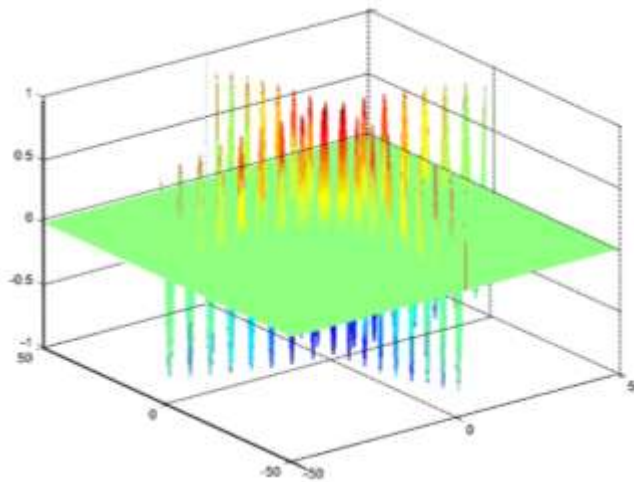


Figura 3.2 Representación de la función a optimizar en el problema 3.1.

3.5.3 Manejo de restricciones.

Dentro de los algoritmos evolutivos como tema importante, consideramos la forma de tratar las violaciones de las restricciones del problema. Dentro del espacio de búsqueda o de soluciones potenciales, se puede distinguir entre individuos *factibles* que son aquellos que satisfacen las restricciones, e individuos *no factibles*, que son los que no lo satisfacen. Michalewicz (1995) y

Coello (2002) han realizado revisiones sobre el tema, indicando las principales formas de tratar el problema:

- *No permitir la presencia de cromosomas no factibles, eliminando de la población a aquellos cromosomas que no satisfagan las restricciones. El inconveniente de eliminar los posibles caminos para la convergencia, no permitiendo la presencia en la población de individuos que, si bien no cumplen las restricciones, pueden contener genes con características benéficas que serían transmitidas a la descendencia durante la fase de reproducción. Además algunos casos puede ocurrir que el algoritmo no sea capaz de obtener soluciones válidas al problema, pues si éstas presentan una probabilidad de ocurrencia baja, no se dispondrá de una forma de hacer converger las soluciones hacia regiones favorables del espacio de búsqueda.*
- *Permitir la presencia en la población de cromosomas que infrinjan las restricciones, pero asignándoles una penalización en la función de evaluación. Este método soluciona los problemas mencionados en el punto anterior, presentando a cambio un incremento del costo computacional, ya que puede perder mucho tiempo en evaluar soluciones no válidas al problema. La forma habitual de aplicar la penalización mediante la inclusión de un término aditivo en la función de evaluación. Así la función de evaluación $f(x)$ original, se transformaría en otra función de la forma*

$$F(x) = f(x) + Q(x)$$

Donde el término $Q(x)$ representa la penalización.

- *Diseñar esquemas de representación y operadores específicos, de forma que todas las posibles soluciones al problema que se generen sean factibles. El problema de este método es que no es de aplicación general. El tipo de representación y los operadores dependerán del problema a resolver. Se deberá comenzar generando una población inicial de soluciones factibles.*
- *Convertir la solución no válida en otra que sí lo sea, por medio de un algoritmo reparador. Este método también puede requerir un alto costo computacional y será fuertemente dependiente del problema particular a resolver. El buen funcionamiento de este método depende de encontrar una heurística de reparación adecuada. Habrá problemas en los que no resuelve viable la reparación de soluciones no factibles.*

3.6 Selección de padres.

La selección de padres es fundamental dentro del proceso evolutivo, eligiéndose en ella los cromosomas que van a reproducirse y transmitir sus características a la nueva generación. Existen distintas técnicas de selección, en la cuales aquellos miembros de la población más aptos tendrán mayor probabilidad de ser seleccionados y reproducirse. Como podemos observar que en este tema no pretendemos hacer un análisis exhaustivo, por existir ya abundante bibliografía sobre la materia (como manuales de referencia se pueden consultar existiendo Golberg (1989), Iglesias (1998), Michalewicz (1995), Schwefel (1984), Coello (1999), y ampliándose la información sobre métodos de selección en Wiecek y Czech (2000) y Motoki (2002).

A la hora de diseñar el procedimiento de selección hay que llegar a una condición de compromiso entre lo que se llama la **presión selectiva** y la **diversidad**.

Una presión selectiva significa que los mejores cromosomas de la población tienen una probabilidad muy alta de tener descendientes, mientras que el resto de los cromosomas la probabilidad de decadencia es muy baja, lo anterior dando lugar a que, en pocas generaciones, la población se vuelva muy homogénea y con poca diversidad, dando lugar en muchos casos una convergencia hacia óptimos locales alejados del óptimo global.

Existen métodos de selección, y en nuestro caso solo explicaremos dos siendo: el de ruleta y el de torneo o concurso.

3.6.1 Método de la ruleta.

Consiste básicamente en lo siguiente:

1. *Se suman los valores de aptitud de todos los miembros de la población, llamando al resto **aptitud total**.*
2. *Se genera **n**, número real aleatorio comprendido entre 0 y la aptitud total.*
3. *Se selecciona el primer miembro de la población cuya aptitud, añadida a las aptitudes de los miembros precedentes de la población sea mayor o igual que **n**.*
4. *Se repite el procedimiento desde el paso 2, hasta obtener el número de padres deseados.*

Si bien se trata de una técnica aleatoria, la probabilidad que tiene cada miembro de la población de ser elegido es directamente proporcional a su índice de aptitud. Al aplicar este procedimiento durante varias generaciones, se irán eliminando las características de los cromosomas menos aptos, permaneciendo el material genético de aquellos miembros de la población con una aptitud mayor.

A continuación ilustramos un ejemplo de este método.

Ejemplo 3.2. En la tabla 3.3 mostramos el índice de aptitud de los cromosomas precedentes, a lo llamaremos *suma parcial*.

Cromosoma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de Aptitud	8.3	2.4	17.1	7.0	2.3	12.1	11.4	7.2	3.1	7.3
Suma parcial	8.3	10.7	27.8	34.8	37.1	49.2	60.6	67.8	70.9	78.2

Tabla 3.3 Valor de aptitud y suma de aptitudes de 10 cromosomas (Baños, 2006)

En la tabla 3.3 se muestran los cromosomas que serían elegidos por el método de la ruleta, para siete números obtenidos de forma aleatoria entre 0 y 78.2

Número aleatorio	23.5	50.1	75.4	12.9	2.3	27.1	57.3
Cromosoma elegido	3	7	10	3	1	3	7

Tabla 3.4 Cromosomas seleccionados. (Baños, 2006)

Como podemos observar, el cromosoma número 3, que era el más apto, fue seleccionado en tres ocasiones y el número 7 que era el tercero en aptitud fue seleccionado en dos. Sin embargo, el carácter aleatorio del método hizo que el cromosoma número 6 no fuese seleccionado, aún siendo uno de los más aptos.

La selección de padres proporcional a la aptitud, presenta problemas cuando hay gran disparidad entre las aptitudes de los miembros de la población. Así que si existiera un cromosoma con una aptitud muy buena

Una manera de modificar la solución del problema, es cambiando la función de evaluación original, dando lugar a resultados más homogéneos y evitando de esta forma el dominio ejercido por unos pocos cromosomas.

3.6.2 Método de torneo o concurso.

Este método tiene una implementación más simple que el de la ruleta, ya que no está basado directamente en las aptitudes, su procedimiento es:

1. *Se elige de forma aleatoria un número de concursantes de entre los cromosomas que componen la población.*
2. *Se selecciona como padre al más apto de todos los concursantes.*
3. *Se vuelve al paso 1 hasta completar la población de padres.*

A continuación ilustramos un ejemplo de este método.

Ejemplo 3.3. Sea 2 el número de concursantes a escoger para cada torneo. Si se quieren seleccionar 10 padres de una población de 20 cromosomas, harían falta 10 concursos o torneos con 2 participantes en cada uno, elegidos de forma aleatoria, en la tabla 3.5 se resume el proceso.

Concursantes seleccionados aleatoriamente	Padres seleccionados
(9,3)	3
(12,6)	6
(10,10)	10
(20,3)	3
(4,7)	4
(13,3)	3
(14,13)	13
(17,5)	5
(10,8)	8
(5,1)	1

Tabla 3.5 Método de torneo o concurso. (Baños, 2006)

El número de concursantes es un parámetro importante a tener en cuenta al aplicar esta técnica, pues un aumento en el número de concursantes hace aumentar la probabilidad de que los mejores cromosomas sean seleccionados, con el siguiente incremento de la presión selectiva. Lo más habitual es utilizar 2 concursantes por torneo.

3.7 Operadores genéticos.

Son los encargados de obtener los descendientes a partir de los cromosomas padres. Generalmente, cada operador genético tendrá asignado un parámetro con el valor de la probabilidad de ser utilizado. Suponiendo que p_c es la probabilidad de un determinado operador de cruce y N el tamaño de la

población, el número esperado de cromosomas que sufrirán cruza será $p_c \cdot N$. Para cada cromosoma de la población se generará un número aleatorio $0 \leq r \leq 1$, si $r < p_c$ el cromosoma sufrirá cruza.

Los operadores genéticos pueden clasificarse sobre los cromosoma de forma conjunta (aplicando primero el operador de cruza y luego, sobre los cromosomas resultantes, el operador de mutación), o de forma independiente (decidiendo de alguna forma qué operador aplicar sobre un cromosoma y aplicar únicamente ese). La aplicación por separado presenta alguna ventaja: por un lado, el procedimiento será más simple, al no tener que aplicar el operador de mutación a los cromosomas sobre los que ya se han aplicado el de cruza. Por otro lado y como ventaja fundamental, es más fácil ampliar la lista de operadores genéticos, sobre todo cuando se emplea la codificación binaria de los cromosomas, pudiéndose añadir sin dificultad nuevos operadores dependientes del problema.

Davis (1991), menciona que la mutación ha sido una forma de introducir diversidad en la población, mientras que el cruza es una técnica que rápidamente actúa para combinar lo que es bueno en la población inicial, y que continua funcionando mientras el algoritmo se ejecuta.

Sea $\mathcal{S}$ el conjunto de todas las posibles soluciones al problema, las mutaciones serán aplicaciones de forma $m : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{S}$, es decir que a partir de las modificaciones en un único cromosomas se obtendrá un nuevo cromosoma descendiente.

Las cruza, por su parte, serán aplicaciones de la forma $c : \mathcal{S} \times \mathcal{S} \times \dots \times \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{S}$, obteniéndose en este caso un nuevo descendiente, a partir de la recombinación de las características de varios individuos (normalmente dos).

3.7.1 Cruza en un punto.

El operador de cruce en un punto es aplicable tanto a cromosomas con codificación binaria, como a aquellos codificados en forma de vectores de números reales. Trabaja de la siguiente forma:

1. *Se seleccionan dos padres de la población.*
2. *Se obtiene, de forma aleatoria, un número entero comprendido entre 1 y la longitud del cromosoma menos 1.*

3. Se intercambian los genes de los cromosomas padres situados en las posiciones siguientes al número aleatorio obtenido en el paso anterior. Los cromosomas obtenidos serán los cromosomas hijos.

Ejemplo 3.4.

1. Se selecciona los siguientes cromosomas padres:

$$C_1 =$$

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

$$C_2 =$$

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

2. Se obtiene el número 5 de forma aleatoria.
3. Los cromosomas hijos mantendrán los 5 primeros genes de los padres, intercambiando los últimos 7, siendo cromosomas resultantes:

$$H_1 =$$

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

$$H_2 =$$

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

3.7.2 Cruza uniforme.

Este operador también es aplicable tanto a cromosomas con codificación binaria, como a aquellos codificados en forma de vectores de números reales, trabaja de la siguiente forma:

1. Se seleccionan los padres de la población.
2. Se obtiene, de forma aleatoria, varios números enteros entre 1 y la magnitud del cromosoma.

3. Se intercambian los genes de los cromosomas padres situados en las posiciones de los números aleatorios obtenidos en el paso anterior. Los cromosomas obtenidos serán los cromosomas hijos.

Ejemplo 3.5.

1. Se selecciona los siguientes cromosomas padres:

$$C_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ \hline \end{array}$$

$$C_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} \\ \hline \end{array}$$

2. Se obtiene de forma aleatoria los números 3, 5, 7 y 8.
3. En los cromosomas hijos se intercambiarán dichos genes de los padres, siendo cromosomas resultantes:

$$H_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline a_1 & a_2 & b_3 & a_4 & b_5 & a_6 & b_7 & b_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ \hline \end{array}$$

$$H_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline b_1 & b_2 & a_3 & b_4 & a_5 & b_6 & a_7 & a_8 & b_9 & b_{10} & b_{11} & b_{12} \\ \hline \end{array}$$

3.7.3 Cruza aritmética.

Este operador es típico en los programas que utilizan cromosomas codificados en forma de vectores de números reales, y no es aplicable a las cadenas de bits. Funciona de la siguiente forma:

Sean C_1 y C_2 dos vectores de números reales – cromosomas – y α un número real tal que $\alpha < 1$. Los cromosomas hijos se obtendrán a partir de los padres de la siguiente forma:

$$H_1 = \alpha \cdot C_1 + (1 - \alpha) \cdot C_2$$

Para obtener un segundo hijo se puede hacer:

$$H_2 = (1 - \alpha) \cdot C_1 + \alpha \cdot C_2$$

En un espacio de búsqueda convexo, este operador asegura que si los cromosomas padres pertenecen a dicho espacio, los cromosomas hijos también lo harán. Por otro lado, se deduce fácilmente que para valores de α próximos a 1 o próximos a 0, lo que hace el algoritmo es explorar las vecindades de los cromosomas padres.

Con la introducción de este operador en el algoritmo surge la necesidad asignar un valor al parámetro α . Para determinar un valor adecuado para este parámetro habría que realizar un estudio sobre la forma en que afecta su valor al algoritmo. Una posible alternativa a esto es hacer que α sea un número aleatorio comprendido entre 0 y 1, obteniendo cada vez que se vaya a aplicar el operador.

3.7.4 Cruza heurística.

El operador de cruce heurística, al igual que el de cruce aritmética, es solo aplicable a los algoritmos con cromosomas codificados en forma de vectores de números reales. Funciona de la forma:

Sean C_1 y C_2 dos vectores de números reales – cromosomas – y r un número real comprendido entre 0 y 1. Los cromosomas hijos se obtendrán a partir de los padres de la siguiente forma:

$$H = r \cdot (C_1 - C_2) + C_2$$

Siendo C_2 al menos igual de apto que C_1 .

3.7.5 Mutación aleatoria.

Hemos comentado que durante el funcionamiento del algoritmo, se debe mantener una situación de compromiso entre la presión selectiva y la diversidad de la población. La mutación es una de las formas de aportar diversidad a la población, permitiendo la exploración de nuevas regiones del espacio de búsqueda.

Este operador es aplicable tanto a cadenas de bits como a vectores de números reales. En el caso de la codificación binaria el proceso consiste en reemplazar algunos de los genes de forma aleatoria haciéndolos igual a 1 si su valor original era 0 y viceversa. Por otro lado, en el caso de la codificación en forma de números reales, el procedimiento consiste en seleccionar de forma aleatoria los genes a cambiar y asignarles un nuevo valor también aleatorio.

La probabilidad de que se produzca mutación suele establecerse mucho menor que la probabilidad de que se produzca cruce.

3.7.6 Mutación no uniforme.

Este operador de mutación no uniforme es solo aplicable a los algoritmos con cromosomas codificados en forma de vectores de números reales. Mediante este operador se persigue el ajuste fino de las soluciones al problema. Se trata de una mutación aditiva, mediante la cual al valor de algún gen del cromosoma padre se le suma o se le resta un valor previamente determinado. Dicho valor determinado dependerá del número de generaciones producidas hasta ese momento.

Sean $C_1 = \{x_1, \dots, x_m\}$ un cromosoma y t el número de generaciones producidas.

Se selecciona x_k para esta mutación; el resultado de aplicar el presente operador será

$$H = \{x_1, \dots, x'_k, \dots, x_m\}$$

Donde:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, UB - x_k) & \text{Si un dígito obtenido aleatoriamente es 0} \\ x_k - \Delta(t, x_k - LB) & \text{Si un dígito obtenido aleatoriamente es 1} \end{cases}$$

Y LB y UB son los límites inferior y superior del dominio de la variable x_k . La función $\Delta(t, y)$ devuelve un valor en el rango $[0, y]$, tal que la probabilidad de que $\Delta(t, y)$ se aproxime a cero aumenta cuando t aumenta. Esta propiedad hace que el operador busque en el espacio de búsqueda: uniformemente al principio y localmente en etapas posteriores del algoritmo. Una posible función es la indicada por Michalewicz (1996).

$$\Delta(t, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b \dots\dots\dots (3.1)$$

Siendo: r un número real aleatorio comprendido entre 0 y 1.

T El número total de generaciones a obtener.

b Un parámetro del sistema que determina el grado de dependencia con el número de generaciones.

3.8 La nueva generación.

Una de las características interesantes de los algoritmos evolutivos es la resolución de problemas de optimización, es la de trabajar simultáneamente con varias soluciones, permitiéndonos explorar a la vez diferentes zonas del espacio de soluciones potenciales, evitando que el algoritmo converja hacia un óptimo local. Sin embargo, la limitación de tener que trabajar con poblaciones finitas disminuye el efecto anterior, por lo podría llegar a producirse la convergencia comentada hacia un óptimo local.

Para evitar este fenómeno se deben potenciar medidas que favorezcan la diversidad en la nueva población. Grefenstette (1992), propuso un método, el cual mejora la respuesta de los algoritmos genéticos como óptimos globales al incluir a cada nueva generación un pequeño número de inmigrantes totalmente aleatorios.

Una forma típica de selección es la conocida como $(\mu + \lambda)$ en la que μ padres y λ descendientes, compiten por sobrevivir pero sólo los μ mejores pasan a formar parte de la nueva población (equivalente a la $(\mu + \lambda) - EE$ que se vio para las estrategias evolutivas). Esta práctica presenta una gran presión selectiva, por lo que en lo general, no será adecuada en problemas con gran número de óptimos locales. Se dice que es **elitista**, por haber cromosomas que permanecen en la población generación tras generación.

Otra forma de selección conocida como **generacional** o (μ, λ) (equivalente a la $(\mu, \lambda) - EE$ que se trato en estrategias evolutivas). En ella los descendientes, una vez producidos, sustituyen completamente a los padres. Esta técnica presenta una menor presión selectiva y muestra un mejor comportamiento en el caso de múltiples óptimos locales. Se puede hacer elitista si se mantiene al mejor de los cromosomas de generación en generación, evitando la pérdida de buenas soluciones al problema que, de otro modo, podrían no volver a obtenerse. Una solución intermedia sería guardar estas buenas soluciones, pero fuera de la población, de manera que no afecten al comportamiento del algoritmo.

También sería importante evitar la creación de múltiples copias de un cromosoma (conocido como **supercromosoma**) en la población, dando lugar a un incremento no deseado de la presión selectiva.

3.9 Condiciones de finalización del algoritmo.

Las condiciones de finalización determinan cuánto debe incluir la búsqueda por parte del algoritmo. En muchas ocasiones se reducen a un número de generaciones, en cuyo caso el algoritmo concluirá tras haberse alcanzado dicho número.

Otros métodos tratan de comprobar si se ha producido la convergencia hacia la solución óptima, finalizando el algoritmo cuando las posibilidades de que se produzca una mejora sean muy pequeñas. Estos métodos requerirán más recursos computacionales.

También puede emplearse un método interactivo, en el que el usuario compruebe la evolución del algoritmo tras un número de generaciones y decida si debe seguir ejecutándose por haber posibilidad de nuevas mejoras. Este método requerirá almacenar el estado del algoritmo, para que éste pueda continuar desde el punto en el que se produjo la parada.

3.10 Asignación de valores a los parámetros del algoritmo.

Algunos autores han investigado la influencia de ciertos parámetros de funcionamiento del algoritmo, estudiaron como afectan el tamaño de la población y las probabilidades de ocurrencia de los distintos operadores. De Jong (1985) en su estudio buscaba los valores para los parámetros de un algoritmo genético tradicional, y que tuviese una aplicación a un conjunto de problemas de optimización numérica, encontrando de forma manual una serie de valores para los parámetros de cruce en un punto y mutación binaria, manteniendo el tamaño de la población constante en 100 individuos.

Grenfenstette (1986) empleo un algoritmo genético para encontrar buenos valores para estos parámetros, utilizando una población de 100 individuos. Los parámetros obtuvo mejores resultados obtenidos por De Jong (1985).

Schaffer, Eshelman, Caruana y Das (1989), realizaron una búsqueda exhaustiva para los valores de los parámetros. Trabajaron 12 meses tiempo CPU en sus pruebas, demostrando que los valores óptimos de los parámetros varían de un problema a otro, realizándose la prueba en una población de 100 individuos, con representación binaria, empleando operadores habituales de cruce en un punto y mutación binaria.

Para 1989 Davis desarrollo un método de búsqueda donde los valores de los parámetros se iban adaptando durante la ejecución del algoritmo, teniendo en cuenta la cantidad de cromosomas de la población que habían dado lugar a una mejora a partir del uso de un determinado operador. Este procedimiento se aplico hacia atrás, de tal forma que los padres y antecesores anteriores (cada vez en menor medida) eran recompensados, pues no podían haber dado lugar a cromosomas beneficiosos, sin que se produjeran mejoras directas. El tema de los valores de los parámetros fueron áreas de investigación, con los trabajos de Jonsson y Malec (2001) Fogel y otros (2004) y Pongchroen (2002).

CAPITULO IV

“Metodología para la resolución de problemas de localización de centros de recuperación en LI”

4.1 Introducción.

En este capítulo completaremos la revisión bibliográfica sobre la LI y se caracterizará un problema de localización dinámica de CRec, empleando técnicas meta-heurísticas y una vez identificado el modelo, procederemos al diseño del AG para la resolución del problema.

4.2 Características comunes y problemas de localización de instalaciones.

Los problemas de localización en LI se ha dividido en dos bloques con la finalidad estructurar la exposición, conocedores del tema expresan una serie de características comunes que se enuncian a continuación:

Splenger, Püchert y Rentz (1997) fueron los primeros autores que plantean diversos métodos para resolver dos problemas de decisión en LI: por un lado el desarrollo e implementación de un sistema integrado de planificación de reciclado y desmantelamiento de desechos de demolición; y por otro, resolver el problema de localización de plantas de reciclado, decidiendo que tipo de proceso utilizar.

Lowers (1999), presenta un modelo de localización de una instalación para desechos de alfombras y parecidos, omitiendo preseleccionar las localizaciones posibles y sus costos de depreciación. Los destinos de las alfombras son la valorización o el reciclado volviendo al material en bruto.

Krikke, Kooi y Schurr (1999a) plantearon el modelo **MILP** por sus siglas en ingles (*Mixed Integer Linear Problem, traducido al español, se refiere a un problema lineal entero mixta*) para abordar el reciclaje de automóviles en Holanda, este modelo fue un problema de ubicación y asignación. Realizando una revisión de modelos de este tipo usados en este campo.

Shih (2001) presenta un modelo de programación lineal mixta para optimizar el diseño y flujo de materiales minimizando los costos (transporte, operación, fijos de nuevas instalaciones, vertido, etc.) y teniendo en cuenta los precios de los materiales recuperados. Este modelo se valida con un caso de estudio en Taiwán.

González-Torre y Adenso Díaz (2002), utilizan un modelo para diseñar la recolección directa de los consumidores (primera fase de la logística). Con el objetivo de determinar cómo distribuir eficientemente los contenedores de reciclado de vidrio en una región específica de forma eficiente, teniendo en cuenta las características sociológicas y económicas de la población (educación, número de establecimientos comerciales, etc.) tratando de maximizar el material recolectado y reduciendo los costos logísticos.

Jayaraman, Patterson y Rolland (2003), proponen un modelo matemático **MILP** para resolver un problema de localización y dada la complejidad presentan una metodología de resolución que usa un heurístico que se basa en ir resolviendo pequeños sub-problemas hasta que encuentra soluciones factibles al problema completo y después un heurístico intenta mejorar las soluciones previas.

Listes y Dekker (2005), son los primeros en tratar de forma cuantitativa la incertidumbre relativa a los problemas de localización en LI. Presentan un modelo estocástico basado en uno determinista con distintos escenarios diseñados por expertos. Aplican el modelo de reciclado de arena que se obtiene en la demolición en Holanda.

Bautista y Pereira (2006), con su modelo resuelven el problema de decidir dónde colocar los contenedores de residuos en la calle, estableciendo una relación entre este problema y el problema de cubrir un conjunto de necesidades al menos costo posibles, el problema MAX-SAT, y para resolverlo emplearon un AG y un heurístico GRASP, la palabra GRASP proviene de las siglas de “Greedy Randomized Adaptative Search Procedures” que significa en español: Procedimientos de Búsqueda basados en funciones aleatorizadas adaptativas. Aplicando el modelo a un caso real en el área metropolitana de Barcelona.

Min, JeungKo y SeongKo (2006), trabajan en un modelo entero no lineal para decidir la localización de centros de retornos centralizados donde llevar el residuo, empleando AGs y probaron el modelo con un sistema de retorno de productos vendidos on-line.

Gomes Salema, Barbosa-Povoab y Novaisc (2007), generalizan las aportaciones antes mencionadas, las cuales normalmente han sido pensadas ad-hoc de problemas específicos, planteando un modelo general para el diseño de una red LI en la que hay límites de capacidad, varios productos y devoluciones. El modelo es **MILP** y se resuelve con técnicas estándar *Branch and Bound* (El funcionamiento general del algoritmo B&B consiste en reducir el espacio de búsqueda del problema podando las zonas del árbol aún no exploradas que no pueden crear mejores soluciones que la

solución en curso. Para tanto, el método de ramificación y acotación B&B busca siempre la óptima solución y, nunca una buena solución).

Wojanowski, Verter y Boyaci (2007), el objetivo de su modelo es diseñar una red de instalaciones de depósito y la determinación de la cantidad de dinero que se pagaría al cliente al depositar un residuo. Las preferencias de los consumidores relativas a la compra y la devolución se incorporan en el modelo de elecciones discretas con utilidades estocásticas.

Sheu (2007), presenta un sistema de gestión de LI para tratamiento de residuos peligrosos que se obtienen de distintos orígenes. Él plantea un modelo lineal multi-objetivo que intenta minimizar los costos logísticos y los riesgos correspondientes.

Lu y Bostel (2007), presentan un modelo de localización de dos niveles con tres tipos de instalaciones a localizar en un sistema LI, siendo del tipo lineal entero 0-1, considerando simultáneamente los flujos directos e inversos y sus interacciones mutuas y un heurístico Lagrangiano para resolverlo.

Listes (2007), crea un modelo estocástico genérico para el diseño de redes directas e inversas de ciclo cerrado. Proponiendo un enfoque de descomposición basado en procedimientos *branch-and-cut* y métodos *L-shaped*.

Hemos detectado en la revisión diversos tipos de artículos de localización en LI que resuelven problemas cuya solución tiene distinta trascendencia.

Ortega (2008), sintetiza una clasificación de los problemas de localización según su horizonte de criterio de decisión:

- *Se han encontrado muchos problemas de localización en los que se toman decisiones estratégicas. [(Spengler, Püchert y Rentz, 1997), (Gupta y Veerakamolmal, 2000), (Lambert y Stoop, 2001), (Jayaraman; Patterson y Rolland, 2003), (Sheu, 2007), (Listes, 2008)].*
- *También se han encontrado problemas, pero menos, relativos a decisiones tácticas. En su mayoría problemas de localización de contenedores de residuos en la calle. [(González-Torre y Adenso-Díaz, 2002), (Bautista y Pereira, 2006)].*
- *Pero no se han encontrado ningún artículo en el que se estudien decisiones operativas. Esto tiene razón debido a que cualquier decisión de localización, en general, tiene una naturaleza de largo plazo.*

4.3 Localización dinámica de instalaciones con múltiples capacidades posibles en LI.

El problema de **MCFLP** (por sus siglas en ingles: *Multiple Period Multiple Capacitated Facility Location Problem*, y al español se refiere a: *Problema de localización dinámica de múltiple capacidad y múltiple periodo*), puede ser considerado como una extensión del problema **CFLP** (por sus siglas en ingles: *Capacited Facility Location Problem*, y al español se refiere al problema de *localización de instalaciones con capacidad determinada*) considerado en la literatura y expresado su evolución en la tabla 4.1

Tabla 4.1 Evolución desde el problema CFLP al MPMCFLP. (Ortega, 2008)

Problema	Descripción	Referencias
CFLP	Instalaciones con una única capacidad definida (localización)	Klose y Drexl, 2000 Shetty, 1990
MCFLP	Instalaciones con varias capacidades posibles (localización y capacidad)	Ortega-Mier y Delgado, 2002
MPMCFLP	Instalaciones con varias capacidades posibles en varios periodos (Localización dinámica y capacidad)	Ortega-Mier y García-Sánchez, 2005

4.3.1 El problema de localización de instalaciones con capacidad determinada: CFLP (*Capacited Facility Location Problem*).

Klose y Drexl, (2000), y Shetty (1990). Estudiaron el problema de localización de instalaciones con capacidad conocida CFLP: *Capacited Facility Location Problem*, es un problema de optimización combinatoria conocido. Mientras que Mirchandani (1990), y Francis, McGinnis y White (1992), mencionan que CFLP, es uno de los múltiples problemas de localización en los que no se ha definido el número de instalaciones a localizar y en los que se intenta minimizar la suma total de las distancias y sus costos correspondientes.

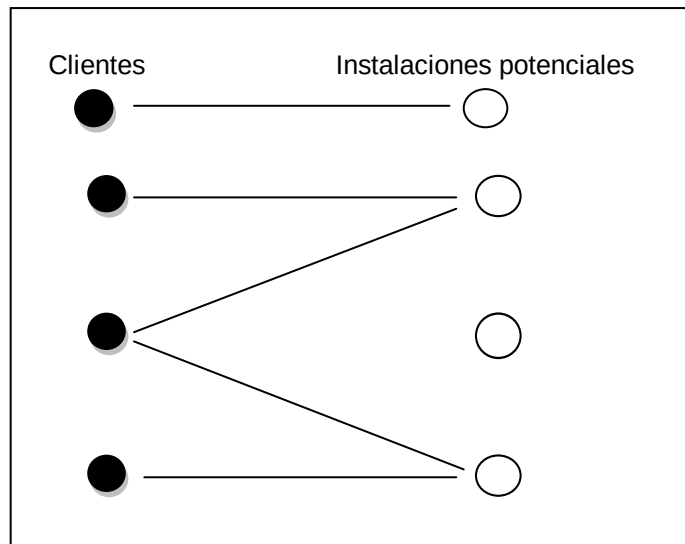


Figura 4.1 Diagrama **CFLP**.

Dado un conjunto de instalaciones potenciales, el problema consiste en decidir qué plantas o instalaciones se utilizan y como son atendidos los clientes desde esas instalaciones. El objetivo es minimizar los costos fijos derivados de la utilización de una planta y los costos operativos (conocidos como costos variables de producción y costos de transporte entre las plantas abiertas y los clientes).

Los índices, los parámetros y variables de este modelo se pueden observar en las tabla 4.2 a 4.4.

Tabla 4.2 Índices del problema **CFLP**.

Índice	Descripción	Rango
i	Orígenes del residuo	$1 \dots M$
j	Posibles destinos del residuo	$1 \dots N$

Tabla 4.3 Parámetros del modelo **CFLP**.

Parámetros	Descripción
d_i	Cantidad de residuo obtenido en el origen i
c_{ij}	Costo operativo (variable) derivado de servir una unidad de producto al cliente i desde la planta j . Suele ser la suma del costo unitario de transporte más el costo variable unitario de producción.
s_j	Capacidad de la planta j .
f_j	Costos fijos de la instalación j .

Tabla 4.4 Variables del modelo **CFLP**.

Variablen	Descripción	Tipo
x_{ij}	Proporción de la demanda del cliente i que es suministrada por la planta j	Continua
y_j	Valor 0 (1) si la instalación j esta cerrada (abierta)	Binaria

La formulación matemática al problema **CFLP**, en la cual su función objetivo (4.1) busca minimizar los costos variables y los costos fijos, y corresponde como:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^N f_j \cdot y_j \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Expresando que la demanda de cada cliente debe ser satisfecha

$$\sum_{i=1}^M d_i \cdot x_{ij} \leq s_j \cdot y_j \quad \forall j \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

Expresa que la producción de cada planta, en el caso de ser utilizada, no puede superar su capacidad

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, \forall j \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$x_{ij} \leq 0 \quad \forall i, \forall j = 1 \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Las restricciones 4.4, 4.5 y 4.6 no son estrictamente necesarias en esta formulación, pero su uso ayuda a acotar más el problema y elimina los nodos del árbol de resolución al aplicar *Branch and Bound* (Harkness y ReVellenext, 2003). Forzando estas restricciones a que las variables binarias tengan valor

1 en cuanto cualquier residuo llega a ellas. Con estas restricciones, a esta formulación del problema **CFLP** se le conoce como formulación de restricción expandida (D'Alberto, 1980). Si no se utilizan estas restricciones, a la nueva formulación se la conoce como “condensada” (Davis y Ray, 1969).

Para que el problema tenga alguna solución factible se tiene que cumplir la condición siguiente:

$$\sum_{i=1}^M d_i \leq \sum_{j=1}^N s_j \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Es decir que la capacidad total de las plantas sea superior, o al menos igual, que la demanda total de los clientes.

El modelo 4.1 y 4.5 son modelos de programación lineal mixta con variables mixtas (continuas y binarias), con $(M + 1) \cdot N$ variables y $M \cdot (N + 1) + N$ restricciones. Observando que la formulación de este problema no contiene referencias temporales, ya que se trata de un problema estático, es decir se refiere a una unidad temporal fija.

4.3.2 Caracterización del problema de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad: **MCFLP** (*Multiple Capacited Facility Location Problem*).

Abordaremos un tema más complejo, debido a que las N instalaciones preseleccionadas, con sus correspondientes ubicaciones, no se tiene una capacidad a priori, sino que se puede elegir la dimensión (k_j) de cada una de las posibles plantas (j) entre un número discreto de posibilidades ($k = 1, \dots, K_j$).

Tomando como referencia el problema **CFLP**, el problema propuesto se ha denominado **MCFLP** (*Multiple Capacited Facility Location Problem*) o de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad (Ortega-Mier y Delgado, 2002).

Dado un conjunto de clientes y un conjunto de instalaciones potenciales, el problema consiste en decidir qué plantas o instalaciones se utilizarán, con dimensión de las posibles plantas y como se sirven los clientes desde esas instalaciones. El objetivo es minimizar los costos totales, mismos que serán:

- ✓ Costos fijos y variables de producción que dependen de la planta a utilizar y de la dimensión elegida.

- ✓ *Costos de transporte, que dependerán básicamente de la distancia entre el cliente y la planta.*

Los índices, los parámetros y variables de este modelo se pueden observar en las tabla 4.5 a 4.7.

Tabla 4.5 Índices del problema *MCFLP*.

Índice	Descripción	Rango
i	Orígenes del residuo	$1 \dots M$
j	Posibles destinos del residuo	$1 \dots N$
k	Dimensiones o capacidades posibles	$1 \dots P$

Tabla 4.6 Parámetros del modelo *MCFLP*.

Parámetros	Descripción
d_i	Cantidad de residuo obtenido en el origen i
ct_{ij}	Costo variable del transporte de una unidad de producto entre el cliente i y la planta j .
cv_{jk}	Costo variable de la producción de la planta j cuando esta instalada la capacidad k .
s_{jk}	Capacidad de la planta j cuando se utiliza la dimensión k .
f_{jk}	Costos fijos de la instalación j cuando se utiliza la dimensión k .

Tabla 4.7 Variables del modelo *MCFLP*.

Variables	Descripción	Tipo
x_{ijk}	Proporción de la demanda del cliente i que es suministrada por la planta j utilizada con la capacidad k .	Continua
y_{jk}	Valor 0 (1) si la instalación j esta cerrada (abierta) con la dimensión k	Binaria

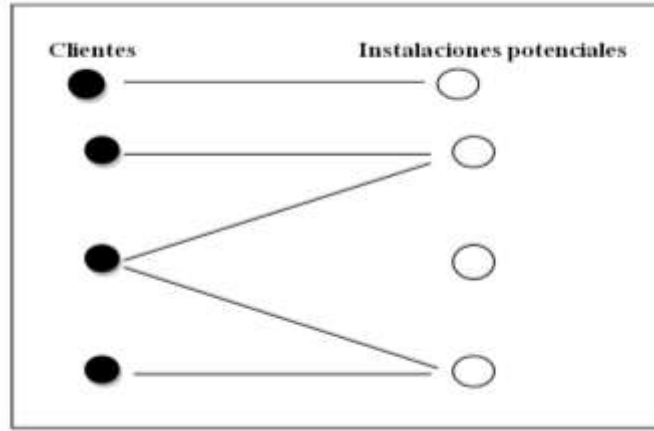


Fig. 4.2 Diagrama **MCFLP**.

La figura 4.2 muestra un diagrama que representa el problema **MCFLP** y posteriormente en las ecuaciones 4.8 a la 4.15 el modelo correspondiente.

La formulación matemática al problema **MCFLP**, en la cual su función objetivo (4.8) busca minimizar la suma de los costos variables y los costos fijos y de transporte, y corresponde como:

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P (ct_{ij} + cv_{jk}) x_{ijk} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P f_{jk} y_{kj} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Sujeto a

$$\sum_{k=1}^P y_{jk} \leq 1 \quad \forall j \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

(4.9) Solo se utiliza una capacidad de las posibles en cada instalación.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P x_{ijk} = 1 \quad \forall i \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

(4.10) La demanda de cada cliente debe ser satisfecha.

$$\sum_{i=1}^M d_{ij} x_{ijk} \leq s_{jk} y_{jk} \quad \forall j, \forall k \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

(4.11) Expresa que cada planta, en el caso de ser utilizada, no puede procesar más cantidad del producto de la capacidad instalada.

$$x_{ijk} \leq y_{jk} \quad \forall i, \forall j, \forall k = 1 \dots \dots \dots (4.12)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k \dots \dots \dots (4.13)$$

$$y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k \dots \dots \dots (4.14)$$

Las restricciones 4.12, 4.13 y 4.14 no son estrictamente necesarias en esta formulación, pero su uso ayuda a acotar más el problema.

Para que el problema tenga una solución factible se tiene que cumplir la condición siguiente:

$$\sum_{i=1}^M d_i \leq \sum_{j=1}^N s_{jk'} , \quad k' = \max (k/s_{jk'} \geq 0) \dots \dots \dots (4.15)$$

Es decir que la capacidad total de las plantas utilizadas con su mayor dimensión posible sea superior, ó al menos igual, que la capacidad total de los clientes.

Las ecuaciones 4.8 a la 4.13 tratan de un problema de programación lineal con variables mixtas (continuas y binarias), con $(M + 1) \cdot N \cdot P$ variables y $N + M + (M + 1) \cdot N \cdot P$ restricciones. Por ejemplo para un caso en el que hay 5 clientes, 5 plantas y 3 posibles dimensiones en cada planta se utilizarían $9 \cdot 6 \cdot 5 = 270$ variables de las cuales 15 son binarias y 255 continuas; y $5 + 5 + (9 \cdot 6 \cdot 5) = 280$ restricciones. Si el tamaño del problema crece, por ejemplo $100 \cdot 100 \cdot 5$, el número de variables y restricciones se hace muy grande a pesar de que este ejemplo no es de gran dimensión (50,000 variables continuas, 500 variables binarias y 50,700 restricciones).

4.3.3 Caracterización del problema de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad en múltiples periodos: *MPMCFLP* (Multiple Period Capacitated Facility Location Problem).

Al haber expuesto los temas anteriores el *CFLP* y *MCFLP*, ahora se expondremos un modelo matemático en el que se plantee un horizonte de tiempo determinado, llamándosele a este modelo: *MPMCFLP* (Multiple Period Capacitated Facility Location Problem). (Ortega-Mier, y García-Sánchez, 2005) y (Ortega-Mier, García-Sánchez, y Ponce-Cueto, 2006)

El modelo **MPMCFLP** es una ampliación del modelo **MCFLP**, que a su vez es una variante del conocido **CFLP**, observando que **MPMCFLP** trata de generalizar **MCFLP** a una situación más compleja, ya que considera varios periodos en un horizonte contemplado. El objetivo es determinar, para cada periodo, las instalaciones que darían servicio a un conjunto de clientes (orígenes) y cuál sería la dimensión elegida para cada una de ellas, de entre un conjunto de instalaciones con una ubicación y una gama de posibles capacidades previamente conocidas, todo ello incurriendo en el menor costo global.

El modelo presentado en la ecuación 4.8 asume un conjunto de hipótesis, siendo:

1. *El horizonte del problema está compuesto por un número finito de periodos (años).*
2. *Los costos de transporte del residuo son proporcionales a las distancias existentes entre el lugar y su destino de los mismos.*
3. *Al abrir una planta se consideran los costos fijos asociados a la inversión independientemente de los periodos en los que luego se use. Se considera diferenciado del costo fijo por periodo.*
4. *Se considera que una planta tiene que ser amortizada a lo largo del horizonte contemplado. Los ingresos o costos de cierre de una planta se encuentran incluidos en los costos fijos de apertura.*
5. *A lo largo del horizonte contemplado se pueden abrir una planta y luego cerrarse para abrir otras, aunque determinados problemas y para determinados tipos de plantas sí puede darse el caso de que se obligue a mantener abierta esa planta todo el horizonte.*

Observemos la figura 4.3 la cual plantea la situación en la que **M** orígenes (fragmentadoras) en los cuales hay una oferta de un producto en cada periodo d_{it} .

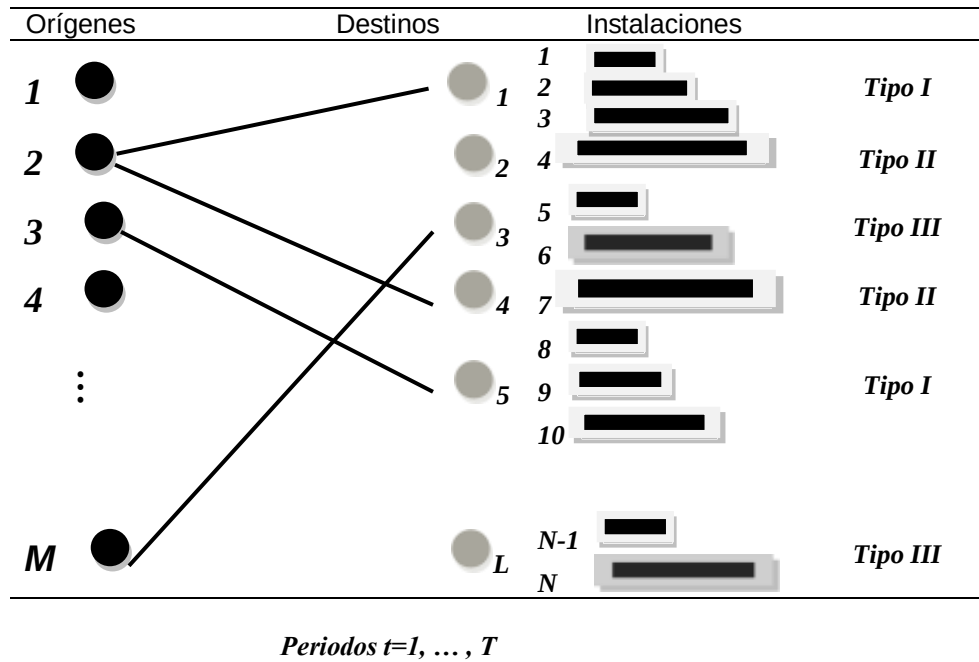


Fig. 4.3 Diagrama **MPMCFLP**.

El producto tiene que ser transportado a cada uno de los L destinos para ser tratado. En cada destino puede haber uno o más de un tipo de instalación posible o de capacidad posible para un mismo tipo de instalación. Por ejemplo si se elige que al destino L del gráfico se lleve producto, habrá que decidir qué tipo de instalación se localiza en L ; la instalación $N - 1$ que es de distinto tipo (distintos costos) y mas pequeña que la N .

Lógicamente tiene que existir una definición previa de qué tipo de instalaciones puede haber en cada localización. Se define s_j como la capacidad de la instalación j . El índice j variará entre 1 y N , siendo N la suma del número máximo posible de instalaciones totales sobre las que hay que decidir.

En las siguientes tablas 4.8 a 4.10 podemos apreciar cuáles son los índices, parámetros y variables que se consideran en el modelo.

Tabla 4.8 Índices del problema **MPMCFLP**.

Índice	Descripción	Rango
i	Orígenes del residuo	$1 \dots M$
j	Posibles destinos del residuo	$1 \dots N$
k	Dimensiones o capacidades posibles	$1 \dots P$
t	Periodos	$1 \dots T$

Tabla 4.9 Parámetros del modelo **MPMCFLP**.

Parámetros	Descripción
d_{it}	Cantidad de residuo obtenido de la fragmentadora i en el periodo t .
s_{jk}	Capacidad de la planta j cuando se utiliza la dimensión k .
CTT_{ijt}	Costo del transporte entre un origen i y un destino j en el periodo t .
CV_{jkt}	Costo variable de la instalación j con dimensión k en el periodo t .
CFA_{jk}	Costos fijos de apertura de la instalación j cuando se utiliza la dimensión k .
CF_{jkt}	Costos fijos de la instalación j cuando se utiliza la dimensión k , en el periodo t .

Tabla 4.10 Variables del modelo **MPMCFLP**.

Variables	Descripción	Tipo
x_{ijk}	Proporción de la demanda del cliente i al destino j utilizada con la capacidad k , en el periodo t .	Continua
y_{jk}	Valor 0 (1) si la instalación j con capacidad k esta cerrada (abierta) en el horizonte contemplado.	Binaria
z_{jkt}	Valor 0 (1) si la instalación j con capacidad k no se utiliza (se utiliza) en el periodo t .	Binaria

Ya definidos los índices, parámetros y variables podemos expresar el modelo de programación lineal mixta correspondientes:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P \sum_{t=1}^T CTT_{ijt} \cdot x_{ijkt} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P \sum_{t=1}^T CV_{jkt} \cdot x_{ijkt} \\ & + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P CFA_{jk} \cdot y_{jk} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P \sum_{t=1}^T f_{jkt} \cdot z_{jkt} \end{aligned}$$

Ecuación 4.16

La ecuación 4.16., que denominamos función objetivo del modelo **MPMCFLP** expresa que se quiere minimizar la suma de los costos fijos de apertura, por periodo, variables y de transporte. Siendo sus restricciones, las siguientes:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^P x_{ijkt} = 1 \quad \forall i, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

(4.17) Para cada origen y en cada año se recoge todo el residuo generado.

$$\sum_{i=1}^M d_{it} \cdot x_{ijkt} \leq s_{jk} \cdot z_{jkt} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

(4.18) Este conjunto de restricciones expresan que exista capacidad suficiente en la instalación **j** con dimensión **k** en el periodo **t** para recoger el residuo generado en los orígenes correspondientes.

$$x_{ijkt} \leq y_{jk} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad \forall t \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

(4.19) Expresa que cada planta **j** con dimensión **k** no se usa en el periodo **t**, no puede transportar residuo a ella, con esto acotamos el problema.

$$\sum_{k=1}^P z_{jkt} \leq 1 \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

(4.20) Expresa que cada periodo **t**, solo se puede utilizar una de las capacidades posibles de cada planta.

$$\sum_{t=1}^T z_{jkt} \geq T \cdot y_{jk} \quad \forall j, \forall k \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

(4.21) Expresa que si se utiliza una planta **j** con dimensión **k** dada, esa planta tiene que abrirse, si no se abre no se podrá usar en ningún periodo.

$$x_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

$$y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

$$z_{jkt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

Para problemas medianos y grandes (ceranos a casos reales), este modelo obliga a utilizar un número muy elevado de variables y restricciones:

- Número de variables continuas: $M \cdot N \cdot P \cdot T$ (continuas) y $N \cdot P \cdot (T + 1)$ (binarias)
- Número de restricciones: $M \cdot T + N \cdot P \cdot T + M \cdot N \cdot P \cdot T + N \cdot T + N \cdot P$

Es decir el número de variables crece sobre todo según el producto $M \cdot N \cdot P \cdot T$; en la tabla 4.11 se observa el número de variables y restricciones necesarias para unos problemas típicos de distintos tamaños:

M	3	9	15	20
N	3	9	15	30
P	3	9	15	20
T	1	1	10	15
Numero de variables	36	810	3600	12600
Continuas	27	729	3375	1200
Binarias	9	81	225	600
Restricciones	48	918	3975	13300

Tabla 4.11 Evolución del número de variables y restricciones con el crecimiento del problema (Ortega, 2008).

4.3.4 Caracterización del problema de localización dinámica de instalaciones en sistemas multinivel de LI. *STPNTCLP* (Single Treatment Plant and Necessary Transfer Centres Location Problem).

Al haber tratado en los temas anteriores el *CFLP*, *MCFLP*, y *MPMCFLP* ahora se expondrá un modelo matemático en el cual se plantea *STPNTCLP* llamándosele a este modelo: (*Single Treatment Plant and Necessary Transfer Centres Location Problem*). Donde se contextualiza dicho problema en una situación común en LI y se plantea el diseño de un sistema de recolección y transporte de productos fuera de uso desde los productores del mismo hasta la planta de tratamiento. (Ortega-Mier, y García-Sánchez, 2007). Dados una serie de municipios en los que se genera residuo, se trata de determinar en qué municipio colocar la planta de tratamiento a la cual enviar dichos residuos y los posibles centros de transferencias donde llevar el residuo desde cada municipio que, una vez compactado, se transporta hasta la planta de tratamiento.

En este modelo, el objetivo es incurrir en el menor costo posible durante un horizonte contemplado de varios periodos, colocando una planta de tratamientos a la cual enviar dichos residuos y los posibles centros de transferencia donde llevar el residuo desde cada municipio que, una vez compactado, se transporta hasta la planta de tratamiento.

El problema surge cuando no se tiene una red de recolección y de recuperación, por lo tanto se debe diseñar partiendo de cero. Cobrando importancia la relación entre los costos de recolección o de transporte y los costos mismos del centro de transferencia.

Asumiendo que en este modelo:

- *Se contempla un horizonte dividido en varios periodos.*
- *Los costos de transporte del producto fuera de uso son proporcionales a las distancias existentes entre el lugar de origen y destino de los mismos. Considerando la solución de este problema como estratégico ya que al decidir las instalaciones se pueden calcular las rutas correspondientes.*
- *La localización del centro de la planta de tratamiento es fija para todo el horizonte.*

De lo anterior se muestra en las tablas 4.12 a 4.14, los índices, parámetros y variables utilizados en el modelo. (Ortega-Mier, y García-Sánchez, 2007).

Tabla 4.12 Índices del problema *STPNTCLP*.

Índice	Descripción	Rango
i	Municipios productores de residuo	$1 \dots M$
j	Posibles centros de transferencia	$1 \dots N$
k	Municipios candidatos a la planta de tratamiento	$1 \dots P$
t	Periodos	$1 \dots T$

Tabla 4.13 Parámetros del modelo *STPNTCLP*.

Parámetros	Descripción
A_{it}	Producción del residuo del municipio i en el periodo t . (Expresado en ton.).
d_{ij}	Distancia entre los municipios i y j . (Km).
C_{TR}	Costo unitario de transferencia del residuo compactado entre un centro de transferencia y la planta de tratamiento (\$/km·ton).
C_{RE}	Costo unitario de transporte del residuo recogido en cada municipio hasta el centro de transferencia (\$/km·ton).
F_j	Costos fijos del centro de transferencia j (expresado en \$).
CAP_j	Capacidad anual del centro de transferencia j (ton).
CAP_{planta}	Capacidad anual de la planta de tratamiento (ton).

Tabla 4.14 Variables del modelo *STPNTCLP*.

Variables	Descripción	Tipo
z_k	Valor 0 (1) si la planta de tratamiento esta localizada en el municipio k no se utiliza (se utiliza).	Binaria
y_{jt}	Valor 0 (1) si el centro de transferencia del municipio j esta cerrado (abierto) en el horizonte contemplado t .	Binaria
x_{ijt}	Cantidad de residuo transportado desde el municipio i al centro de transferencia j en el periodo t .	Continua
h_{jkt}	Cantidad del residuo transportado desde el centro de transferencia que esta en el municipio j a la planta (en el municipio k) durante el año t .	Continua

Ya definidos los índices, parámetros y variables podemos expresar el modelo de programación lineal mixta correspondientes de la siguiente forma:

$$\min \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T F_j \cdot y_{it} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_{jkt} \cdot d_{jk} \cdot C_{TR} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T x_{ijt} \cdot d_{ij} \cdot C_{RE} \quad \dots\dots\dots(4.25)$$

La función objetivo (4.25) del modelo **STPNTCLP** expresa que se quiere minimizar la suma de los costos fijos de utilización de los centros de transferencia, los costos de recolección de residuos de los municipios y los costos de transferencia de los residuos desde la transferencia hasta la planta de tratamiento. Siendo sus restricciones, las siguientes:

$$\sum_{j=1}^N x_{ijt} = A_{it} \quad \forall i, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.26)$$

(4.26) Se tiene que recoger todo el residuo generado en cada municipio cada año.

$$x_{ijt} \leq A_{it} \cdot y_{jt} \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.27)$$

(4.27) Esta restricción se agrega al modelo para resolver el problema en forma mas rápida.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijt} \leq \sum_{j=1}^N CAP_j \cdot y_{jt} \quad \forall j, \quad \dots\dots\dots (4.28)$$

(4.28) Expresa que cada planta **j** con dimensión **k** no se usa en el periodo **t**, no puede transportar residuo a ella, con esto acotamos el problema.

$$\sum_{k=1}^K h_{jkt} = \sum_{i=1}^M x_{ijt} \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.29)$$

(4.29) El balance del residuo en los centros de transferencia.

$$h_{jkt} \leq Z_k \cdot CAP_{planta} \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

(4.30) Expresa que solo existen flujos de transferencia al municipio en el que está situada la planta, y sin sobrepasar la capacidad de la misma.

$$\sum_{k=1}^K z_k = 1 \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

(4.31) Expresa que solo se puede ubicar una planta de tratamiento.

$$x_{ijt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

$$h_{jkt} \geq 0 \quad \forall j, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.33)$$

$$z_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \quad \dots\dots\dots (4.34)$$

$$y_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.35)$$

Si se cumplen las condiciones 4.36 y 4.37, este modelo tendrá solución factible:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijt} \leq CAP_{planta} \quad \forall t \quad \dots\dots\dots (4.36)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ijt} \geq \sum_{j=1}^N CAP_j \cdot y_{jt} \quad \forall t \quad \dots\dots\dots (4.37)$$

Este problema es del tipo NP-Hard, sencillo de resolver para pequeños casos, pero con gran consumo de tiempo cuando el problema crece.

4.4 Diseño de un modelo determinístico para resolución de problema de localización dinámica en LI.

Una vez enunciado el problema de localización dinámica aplicado a LI, emplearemos las metodologías anteriores para resolver problemas de naturaleza similar, donde se propone una técnica meta-heurística en la caracterización del problema de localización dinámica en sistemas de LI, siendo el objeto de estudio de esta tesis, por lo que la metodología es aplicable a problemas generales de localización de instalaciones en LI. Los sistemas de Logística Inversa analizado en el capítulo II, que nos lleva al planteamiento de la estructura del modelo de una red de recuperación (fig. 2.7) y su

respectiva modificación transformando el centro de recuperación en una localidad híbrida, ya que en este lugar se realizará la inspección y separación integra, en otras palabras, los productos recolectados se almacenan y/o se reparan en el mismo lugar. En el modelo consideramos en el flujo inverso al (los) centro (s) de recuperación, y luego los productos recuperados se enviarán a los fabricantes a través del tiempo.

En atención a los modelos deterministas presentados en el presente capítulo, nos guiamos al establecimiento del modelo matemático identificar la solución de un problema de localización dinámica de LI multi-periodo, de múltiples productos, con la ventaja de que el modelo cuenta con la entrega directa e inversa de flujo simultáneamente. En el presente trabajo consideramos que la ubicación de los clientes, instalaciones en proceso (plantas), centros de distribución, junto con los PFU para ser recuperados, son conocidos y las demandas de los productos y las devoluciones de los mismos son conocidas en el horizonte del tiempo planificado.

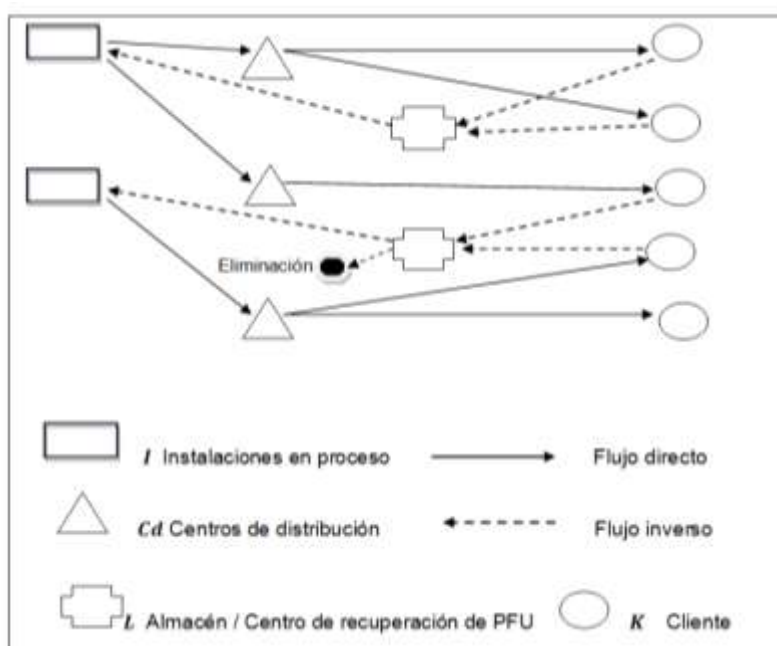


Figura 4.4 Estructura del modelo de una red de recuperación, con localización híbrida. Elaboración propia.

El objetivo del modelo es incurrir en el menor costo posible durante un horizonte contemplado de varios periodos, colocando un centro de recuperación donde llevar el PFU desde cada cliente (planta), una vez inspeccionado y separado, se transporta hasta la planta donde será reutilizado o recuperado; y en el peor de los casos este PFU ser eliminado y enviado a un centro de confinamiento. (Figura 4.4)

De lo anterior se muestra en las tablas 4.15 a 4.17, los índices, parámetros y variables utilizados en el modelo.

Tabla 4.15 Índices del problema de **LI**.

Índice	Descripción	Rango
i	Conjunto de ubicaciones de plantas de los clientes.	$1 \dots I$
j	Conjunto de almacenes actuales y nuevos sitios potenciales.	$1 \dots J$
k	Conjunto de ubicaciones de los clientes fijos.	$1 \dots K$
p	Conjunto de tipos de productos de los clientes	$1 \dots P$
l	Conjunto de centros de recuperación existentes y nuevos sitios potenciales	$1 \dots L$
t	Periodos	$1 \dots T$

Tabla 4.16 Parámetros del modelo **LI**.

Parámetros	Descripción
Pr_{it}	Capacidad de producción máxima del cliente de la planta i .
A_{jt}	Capacidad máxima del almacén j .
$Crec_{lt}$	Capacidad máxima del centro de recuperación.
EA_{jt}	Tamaño de expansión modular del almacén j .
$ECrec_{lt}$	Tamaño de expansión modular del centro de recuperación l .
MEA_j	Máximo tamaño para la expansión modular del almacén j .
$MECrec_l$	Máximo tamaño para la expansión modular del centro de recuperación l .
AP_p	Capacidad de almacenamiento del producto p por unidad.
dP_{pkt}	Demanda del producto p por el cliente k en el periodo t .
rP_{pkt}	Cantidad de devoluciones del producto p desde el cliente k en el periodo t .
Costos:	Se incluyen costo de transporte de los productos y costos de mantenimiento
CfA_{jt}	Costo fijo de almacén j en el periodo t .
CIA_{jt}	Costo por instalar almacenes j en el periodo t .
$CfEA_{jt}$	Costo fijo por ampliar el tamaño modular del almacén j en el periodo t .
CEA_{jt}	Costo por operar la expansión modular del almacén j en el periodo t .
$CfCrec_{lt}$	Costo fijo del centro de recuperación l en el periodo t .
$CiCrec_{lt}$	Costo fijo por instalar el centro de recuperación l en el periodo t .
$CACrec_{lt}$	Costo de ampliar el centro de recuperación l en el periodo t .
$CvCrec_{lt}$	Costo variable asociado con la expansión del centro de recuperación l en el periodo t .
CHI_t	Costo de ahorro por apertura del sistema híbrido en el periodo t .
Cvd_{pijkt}	Costo variable por atender la demanda del producto p en los clientes k de la planta i y almacén j en el periodo t , considerando costos de transporte y mano de obra.
Cvr_{pklit}	Costo variable del rendimiento de los productos p en los clientes k a través de centros de recuperación l de la planta i en el periodo t , considerando costos de transporte y mano de obra.

Tabla 4.17 Variables del modelo **LI**.

Variables	Descripción	Tipo
ddP_{pijkt}	Flujo directo: Cantidad del producto p demandado por los clientes k que atiende la planta i y almacén j en el periodo t	Continua
drP_{pkilt}	Flujo inverso: Cantidad de devoluciones del producto p de los clientes k a ser devuelto vía centro de recuperación l a la planta i en el horizonte contemplado t .	Continua
V_{jt}	Valor entero de la expansión modular para el almacén j en el periodo t , si el almacén j esta instalado.	Binaria
W_{lt}	Valor entero de la expansión modular para el centro de recuperación l en el periodo t si el centro de recuperación l ha sido instalado.	Binaria
Z_{jt}	Valor 0 (1) si el almacén j esta cerrado (abierto) en el periodo t .	Binaria
A_{jt}	Valor 0 (1) si el almacén j no es expandido (expandido) en el periodo t .	Binaria
G_{lt}	Valor 0 (1) si el centro de recuperación l esta cerrado (abierto) en el periodo t .	Binaria
B_{lt}	Valor 0 (1) si el centro de recuperación l no es expandido (expandido) en el periodo t .	Binaria

Ya definidos los índices, parámetros y variables podemos expresar el modelo de programación lineal mixta correspondientes de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{t=1}^T & \left[\sum_{j=1}^J CfA_{jt} \cdot Z_{jt} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CIA_{jt} \cdot Z_{jl} + \sum_{j=1}^J \sum_{t \geq 1} CIA_{jt} \cdot Z_{jt} \right. \\
 & + \sum_{l=1}^L CfCrec_{lt} \cdot G_{lt} + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CiCrec_{l1} \cdot G_{l1} + \sum_{l=1}^L \sum_{t=2}^T CiCrec_{lt} \cdot G_{lt} \\
 & + \sum_{j=1}^J (CfEA_{jt} \cdot A_{jt} + CEA_{jt} \cdot V_{jt}) + \sum_{l=1}^L (CACrec_{lt} \cdot B_{lt} +) - \sum_{\theta=j=l} CHi_t \\
 & \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Cvd_{pijkt} \cdot ddP_{pijkt} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{I_0} Cvr_{pklit} \cdot drP_{pklit} \right] \dots\dots\dots 4.38
 \end{aligned}$$

La función objetivo (4.38) del modelo **LI** expresa que se quiere minimizar el total de los costos, que consiste en: los costos fijos de operación y apertura del híbrido (almacén y centro de recuperación), costos de transporte, el de ahorro de instalaciones integradas, así como los de expansión de los flujo directo e inverso.

Siendo sus restricciones, las siguientes:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K ddp_{ijkt} \leq Pr_{it}, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.39)$$

(4.39) Se asegura que las plantas de los clientes han limitado sus capacidades en los términos del contrato.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J CfA_{pijkt} \geq A_{it}, \quad \forall p, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.40)$$

(4.40) Esta restricción se que la demanda de los clientes al mercado está satisfecha.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K AP_p \cdot ddP_{pijkt} \leq A_{jt} \cdot Z_{jt} + \sum_{\theta=1}^t EA_{j\theta} \cdot V_{j\theta}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.41)$$

(4.41) Expresa que cada la capacidad de los almacenes incluyen el tamaño de la expansión en todo el periodo del tiempo.

$$V_{jt} \leq MEA_j \cdot A_{jt}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.42)$$

(4.42) Asegura que la expansión es posible, si el almacén ha sido abierto.

$$(T - t + 1)A_{jt} \leq \sum_{\theta=t}^T Z_{j\theta}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.43)$$

(4.43) Expresa que si hay una decisión de expandir una localidad, está no deberá ser cerrada.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K drP_{pkilt} \leq Pr_{it}, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.44)$$

(4.44) Esta restricción asegura que no hay flujo de retorno en las instalaciones sin abrir.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I drP_{pkilt} \geq Pr_{it} \quad \forall k, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.45)$$

(4.45) Asegura que todos los productos regresados deben ser enviados a los clientes.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K drP_{pikt} \geq Crec_{lt} \cdot G_{lt} + \sum_{\theta=1}^t ECrecl_{l\theta} \cdot W_{l\theta}, \quad \forall k, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.46)$$

(4.46) Se impone limitación en la capacidad del centro de recuperación incluyendo el tamaño de expansión en todo el periodo de tiempo.

$$W_{lt} \leq MECrecP_l \cdot B_{lt} \quad \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.47)$$

(4.47) Esta restricción asegura que la expansión es solo posible si un centro de reparación ha sido abierto.

$$(T - t - 1) \cdot B_l \leq \sum_{\theta=t}^T G_{l\theta} \quad \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.48)$$

(4.48) En esta restricción se asegura que sí hay una decisión de expansión en cualquier centro de recuperación, esta localidad no será cerrada.

$$0 \leq ddP_{pijkt}, \quad drP_{pkilt}, \quad \forall p, \forall i, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.49)$$

(4.49) Esta restricción conserva la negatividad sobre las variables de decisión.

$$V_{jt} \in \{0, 1, 2, \dots, MEA_j\}, W_{lt} \in \{0, 1, 2, \dots, MEA_l\}, \quad \forall j, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.50)$$

(4.50) Asegura el número entero de la variable.

$$Z_{jt}, G_{lt}, A_{jt} B_{lt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots (4.51)$$

(4.51) Asegura el número binario de la variable.

4.4.1 Utilización de técnicas metaheurísticas.

En la revisión de la literatura hemos encontrado que los problemas NP-Hard no pueden resolverse con programación dinámica, así como también el método de ramificación y corte tampoco asegura la resolución de este tipo de problemas. Y al observar que se carecen de artículos que empleen meta-heurísticos en problemas de localización en LI con carácter dinámico y estocástico, vemos que el uso de esta técnica en este tipo de problemas es pertinente e innovador. Los meta-heurísticos que atacan más ampliamente el espacio de soluciones encontramos que se trata de: algoritmos genéticos, búsqueda dispersa, etc., mientras que el meta-heurístico conocido como colonia de hormigas sólo exploran parte del espacio posible de soluciones.

4.4.2 Estructura de solución.

Estos problemas de localización de instalaciones encontramos que una solución puede dividirse en dos partes muy distintas:

1. *Una parte no continua, compuesta por las variables binarias o enteras, que generalmente son variables de diseño del problema (dónde se localiza una instalación, en qué periodo, etc.)*
2. *Otra parte, continua, compuesta por el conjunto de variables continuas del problema, que suelen hacer referencia a los flujos entre distintos lugares (municipios, centros de transferencias, plantas, etc.)*

De las dos partes de solución, la parte no continua es la más interesante ya que ella, al contener la información del diseño del problema, se define la naturaleza de la solución determinada. La parte continua, necesaria para obtener el valor de la función objetivo, cuya información de detalle no es tan relevante para quien decide.

4.4.3 Herramienta propuesta.

La herramienta que proponemos es utilizando un modelador y un AG, los cuales se encuentran en dos bloques uno de ellos está formado por el código del meta-heurístico, el cual controla todo el proceso de resolución y solo cuando necesita obtener información de la función objetivo de una solución llama al modelador, enviándole ya construida gran parte de la solución (parte no continua del modelo relativa a las variables de diseño). De esta manera el modelador recibe una combinación de valores (parte no continua) que utiliza como datos o parámetros de un modelo para una configuración concreta. Para completar el proceso de resolución, el modelador llama al AG el cual resuelve el modelo, con los métodos de programación lineal mixta.

De la solución obtenida por medio del modelador, se envía el valor de la función objetivo y sus principales características a la capa del meta-heurístico donde se completa la caracterización de la solución investigada.

Este proceso se realiza masivamente, cada vez el meta-heurístico pasa por una nueva solución de la que desconoce su función objetivo. Este cálculo se realiza de manera muy rápida al ser el modelo a resolver de programación lineal mixta. El AG devuelve el resultado y el meta-heurístico puede continuar su búsqueda.

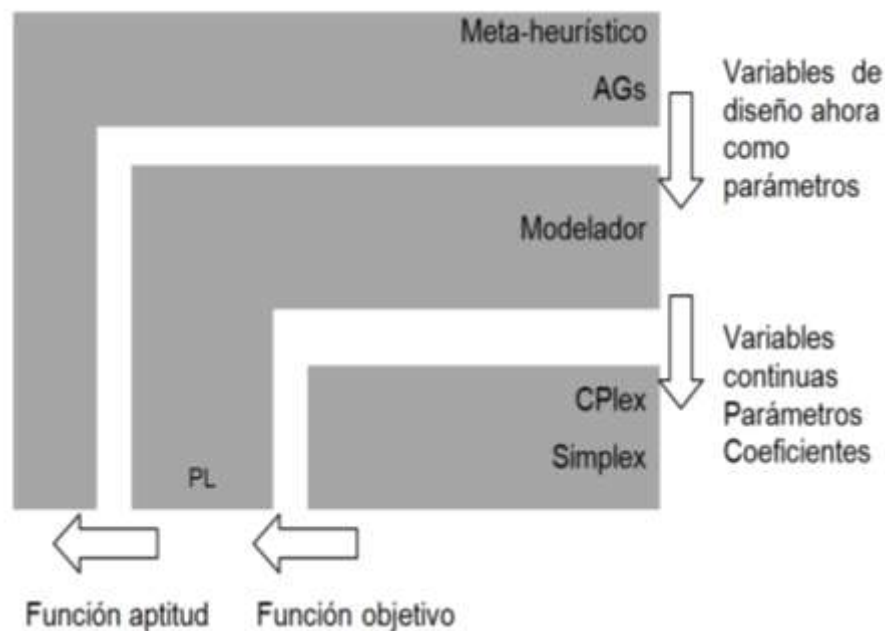


Figura 4.5 Esquema de resolución propuesto.

La aplicación de la metodología propuesta al problema tanto en variable determinista como en la estocástica, puede representarse como la que aparece en la figura 4.6, en la cual la matriz asociada a la parte no continua de la solución, solo aparecerá el valor del subíndice k que hace que para cada par de subíndices j y t , la variable $z_{jkt} = 1$ aparece (esta variable indica si la instalación j , se utiliza o no con la capacidad k en el periodo t). De tal forma que si la instalación j abre con la dimensión k de las posibles durante el periodo t ($z_{jkt} = 1$), aparecería el número entero k en la columna j , fila k_t . Si una instalación no se abre en un periodo determinado, aparecerá el valor 0 en la celda correspondiente.

En la figura 4.7, la primera instalación y la última se abren con la dimensión 1 todo el horizonte, la instalación 3 que está abierta todo el horizonte, efectúa un cambio de capacidad en el periodo cuarto y el resto de las instalaciones están cerradas todo el horizonte.

Instalaciones (almacenes j , centros de recuperación l)

	Almacén 1	Crec 1	Almacén 2	Crec 2	...	n
1	1	0	1	0	...	1
2	1	0	1	0	...	1
3	1	0	1	0	...	1
4	1	0	1	0	...	1
...	...	...	...	...	...	1
n	1	0	1	0	...	1

Periodos t

Figura 4.6 Estructura de una solución del problema de localización dinámica de LI.

La aplicación de la metodología al problema LI se va a presentar en el siguiente capítulo de forma desarrollada, empleando una técnica Metaheurísticas conocida como Algoritmos Genéticos

En este capítulo se ha presentado una metodología para resolver problemas de localización dinámica en LI.

CAPITULO V

“Solución al problema multiobjetivo en LI”

5.1 Introducción.

A continuación se presenta una aplicación de la metodología planteada en capítulo previo, utilizando AGs, que se puede utilizar tanto para el problema determinista como para el estocástico del LI.

Existen numerosas referencias en la literatura donde poder estudiar los fundamentos básicos de los AGs. (Holland, 1975), (Whitley, 1994), (Obitko, 1998), (Michalewicz, 1999), (Vose, 1999).

En la propuesta de este enfoque basado en AGs, se presentarán solo aquellos aspectos específicos y más relevantes para este problema concreto (individuos, cruza, mutaciones, soluciones no factibles). No se detalla el tratamiento que se ha dado a otros aspectos que han debido considerarse ya que, siendo importantes también para la aplicación de estas técnicas, son comunes a los que aparecen en cualquier enfoque basado en AGs y pueden ser consultados en la literatura sobre el tema.

5.2 Esquema general de la Técnica.

En el algoritmo 1, se muestra la técnica propuesta, siendo sencillo.

Algoritmo 1 Esquema general de AG

Iniciar algoritmo

Generar población inicial, $P(0)$

while No fin, generar población nueva, $P(i)$ **do**

Seleccionar dos individuos de la población actual ($P(i-1)$) como padres

Hacer cruce y generar dos nuevos individuos

Añadir nuevos individuos a la población que se está generando ($P(i)$)

end while

Fin

En cada iteración se parte de una población actual ($P(i-1)$) y se genera una población nueva ($P(i)$). Mientras no se cumpla ningún criterio de parada se van generando nuevas poblaciones. La generación de nuevas poblaciones se realiza de la siguiente manera:

De la población que se tiene ($P(i-1)$) al comienzo de la iteración se seleccionan dos individuos como padres; estos dos padres se cruzan; y los hijos incluida la posibilidad de alguna mutación, se

incluyen en la nueva población, tras pasar por algún proceso de reducción, se convierte en la siguiente población actual ($P(i)$).

5.3 Codificación del individuo.

En el problema se busca decidir en cual de la k plantas se situará el Centro de Recuperación CRec ($z_k = 1$), donde y cuando se abrirán los almacenes híbridos que en principio pueden estar en cualquiera de los posibles sitios de las plantas ($y_{jt} = 1$).

Periodo	Almacén						Centro de recuperación					
	1			2			1			2		
	Z	A	V	Z	A	V	G	B	W	G	B	W
$t = 1$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
$t = 2$	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$t = 3$	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0

Tabla 5.1 Representación del Cromosoma

Para este problema un individuo está codificado por tres cromosomas (figura 5.1) en un arreglo matricial 3×12 , donde cada fila representa el periodo de tiempo, las primeras seis columnas es información correspondiente a dos almacenes y las seis siguientes columnas se destinaron para los centros de recuperación.

Para cada almacén tiene tres genes, el primero (Z) representa la condición ' 1 ' de apertura y ' 0 ' de cerrado, el segundo gen indica sí el almacén recibirá expansión modular (A), y la condición ' 1 ' si el almacén se expande, y ' 0 ' lo contrario; en cuanto al tercer gen se refiere a la cantidad de expansión para el almacenaje (V), mismo que se obtiene de la multiplicación del tercer gen (valor entero) por el valor predeterminado de la expansión modular del almacén (EA_{jt}), ejemplo: si **V toma valor de ' 1 '**, indica que se expande en 600 unidades y si llega a tomar un valor de 2 se expande en 1,200 unidades, aclarando que la máxima capacidad de expansión modular del almacén (MEA_{jt}) es 4.

Para el caso de los seis últimos genes se le asigno a cada centro de recuperación 3 genes; de los cuales el primero se refiere a (G) representando la condición de ' 1 ' indica que se apertura el centro de recuperación, y ' 0 ' el centro de recuperación estará cerrado, el segundo gen indica sí el centro de recuperación recibirá expansión modular (B) donde ' 1 ' sí el centro de recuperación recibirá expansión modular, y ' 0 ' lo contrario, y por último el tercer gen se refiere a la cantidad de expansión

modular para el centro de recuperación (W) mismo que se obtiene de la multiplicación del tercer gen (valor entero) por el valor predeterminado de la expansión modular del centro de recuperación ($ECrec_{it}$). Ejemplo: si W toma valor de '1', indica que el centro de recuperación se expande en 100 unidades y si llega a tomar un valor de 2 se expande en 200 unidades, aclarando que la máxima capacidad de expansión modular de un centro de recuperación ($MCrec_{it}$) es 4.

Como se puede observar la representación del cromosoma contiene toda la información relativa a las variables de decisión del diseño (dónde ubicar las instalaciones y cuáles se abrirán y cuándo).

5.4 Soluciones no factibles.

Al realizar cruces entre individuos y las mutaciones, que se realizan de forma aleatoria, se pueden generar soluciones no factibles. Por ejemplo, al cruzarse dos padres, uno de los hijos puede resultar con pocos CRec abierto, convirtiéndose en una solución no factible.

Esta situación suele ser bastante habitual y supone perder tiempo del algoritmo en convertir soluciones en factibles. Para convertir estos nuevos individuos en factibles se tiene que implementar un procedimiento que “arregle” la infactibilidad de tal forma que se van abriendo CRec de forma aleatoria (cambiando ceros por unos en el primer cromosoma) hasta que la solución se hace factible.

5.4 Poblaciones.

Cuando se produce una generación, deja de investigarse a los individuos de la población anterior, siendo los hijos los integrantes de la nueva población.

Las poblaciones están formadas por numerosos individuos. A la vista de los resultados obtenidos utilizando diversos tamaños de población, ni puede identificarse un tamaño de población idóneo para la resolución del problema LI. Este factor de ajuste del metaheurístico puede considerarse no relevante a estos efectos.

5.5 Condición de Terminación.

Se definieron tres condiciones de terminación del algoritmo:

1. Cuando se ha investigado un número (N_1) de poblaciones determinado. Se generan (N_1) poblaciones y después el algoritmo se para.
2. Cuando se acumula un número de poblaciones determinado (N_2) sin que se haya producido una mejora en la función aptitud.
3. Cuando se llega a un valor de la función objetivo (función aptitud) previamente fijado.

5.6 Ejemplo de aplicación 1.

La intención de este problema (en el caso más complicado y más real) inspirado en la realidad es la siguiente. Supóngase que la administración correspondiente a una empresa tiene que diseñar la red de recuperación de Productos Fuera de Uso, donde para ilustrar las propiedades del problema y del modelo, se nos proporciona los valores en las tablas 5.2 a 5.4, los cuales muestran los datos de un modelo 3PL (es un acrónimo para "Third Party Logistics" ó logística tercerizada; Significa contratar a una empresa especializada para realizar la logística de su negocio, permitiéndole concentrarse en las actividades claves de su empresa), indicando la existencia de 2 clientes, 10 almacenes y 10 centros de recuperación posibles, consideramos tres periodos de un horizonte de planeación (periodos mensuales). Las ubicaciones potenciales para el mercado de clientes, almacenes, centros de recuperación, y plantas de los clientes son generadas por una distribución uniforme con una distancia mínima a máxima de 0 a 150 km (**en el sistema coordenado x, y**). Además suponemos que se conocen las demandas de los clientes de la zona, con un mínimo de 90 a 120 unidades. Y que la cantidad de productos de retorno será del 10% de la demanda del cliente.

Tabla 5.2 Datos de localización

No.	Almacén		Centro de recuperación		Plantas de clientes		
	x	y	x	y	x	y	M_{it}
1	122.67	34.76	122.67	34.76	38.73	100.55	3000
2	36.56	94.63	36.56	94.63	117.05	60.94	6000
3	116.01	64.09	116.01	64.09			
4	8.16	140.26	8.16	140.26			
5	97.32	1.06	97.32	1.06			
6	130.63	65.96	130.63	65.96			
7	137.39	110.19	137.39	110.19			
8	98.50	95.59	98.50	95.59			
9	41.64	95.97	41.64	95.97			
10	82.41	146.71	82.41	146.71			

Por lo extenso de los datos, y simplificando; asumimos que el espacio de almacén por producto (β_p) se considera como una unidad, y los parámetros de los costos son constantes a lo largo del horizonte. En la tabla 5.5 se muestran los costos adicionales en dólares estadounidenses basados en el modelo lineal.

Tabla 5.3 Datos del cliente 1, en base a un modelo lineal

Cliente 1								
No.	Coordenada		$t = 1$		$t = 2$		$t = 3$	
	x	y	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>
1	148.06	31.36	104	11	102	11	101	10
2	24.80	16.81	94	11	105	11	94	10
3	35.48	12.38	96	10	95	11	99	10
4	138.98	127.80	108	11	95	10	100	11
5	98.60	138.7	110	10	107	11	108	10
6	28.22	14.07	94	11	103	11	94	10
7	91.95	17.89	0	0	98	11	109	11
8	94.79	48.55	0	0	99	11	95	10
9	22.03	136.17	0	0	106	11	100	10
10	84.21	97.08	0	0	99	10	101	10
11	60.34	89.21	0	0	0	0	93	10
12	117.39	0.72	0	0	0	0	101	10
13	34.96	14.13	0	0	0	0	96	10
14	10.03	52.38	0	0	0	0	97	10
15	118.57	115.08	0	0	0	0	108	10

Tabla 5.4 Datos del cliente 2, en base a un modelo lineal.

Cliente 2								
No.	Coordenada		$t = 1$		$t = 2$		$t = 3$	
	x	y	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>	<i>Demanda</i>	<i>Retorno</i>
1	85.06	74.91	191	20	0	0	207	21
2	142.28	53.39	207	20	0	0	198	20
3	146.86	126.00	205	21	0	0	194	20
4	72.97	86.95	199	20	0	0	201	21
5	89.88	141.82	202	21	207	20	203	20
6	13.93	52.39	197	21	210	20	205	20
7	9.30	37.89	202	20	195	21	205	20
8	35.05	44.90	200	21	191	21	196	20
9	121.52	2.90	196	20	208	21	194	21
10	94.80	125.85	0	0	204	20	206	20
11	132.83	29.85	0	0	201	21	200	20
12	26.38	46.43	0	0	197	21	204	20
13	95.08	139.79	0	0	201	20	210	20
14	108.91	98.62	0	0	194	20	201	21
15	141.36	37.98	0	0	196	21	195	21

Tabla 5.5 Parámetros del modelo lineal

Costos fijos por operar el almacén	CfA_{jt}	\$ 8,000
Costo de instalación de un almacén	CIA_{jt}	\$ 120,000
Capacidad máxima del almacén	A_{jt}	3000 unidades
Expansión modular del almacén	EA_{jt}	600 unidades
Costos fijos de la expansión del almacén	$CEfA_{jt}$	\$ 2,100
Costos variables de la expansión para un almacén	$CEvA_{jt}$	\$ 15,000
Costos fijos de operación del centro de recuperación	$CfCrec_{it}$	\$ 3,000
Costo por instalar un centro de recuperación	$CiCrec_{it}$	\$ 30,000
Capacidad máxima de un centro de recuperación	$Crec_{it}$	300 unidades
Expansión modular de un centro de recuperación	$ECrec_{it}$	100 unidades
Costos fijos por expandir un centro de recuperación	$CACrec_{it}$	\$ 200
Costos variables por expandir un centro de recuperación	$CvCrec_{it}$	\$ 4,500
Ahorros por operar un sistema híbrido Almacén-Centro de recuperación	CH_t	\$ 6,000
Máxima expansión modular del almacén	MEA_{jt}	4
Máxima expansión modular del centro de recuperación	$MCrec_{it}$	4
Costo unitario de transporte de la planta del cliente al almacén	Ctr_{ijt}^f	0.05
Costo unitario de transporte del almacén a la planta del cliente	Ctr_{jkt}^f	0.50
Distancia euclidiana entre la ubicación x y y en el tiempo t	K_{xyt}	
Costo unitario de flujo directo	C_{pijkt}^f	$C_{ijk}^f * K_{ij} + C_{jkl}^f * K_{jkt}$
Costo unitario de transporte del centro de recolección al cliente	C_{kl}^r	0.05
Costo unitario de transporte del centro de recuperación a la planta del cliente	C_{li}^r	1.50
Costo unitario del flujo inverso	C_{pklit}^r	$C_{kl}^r * K_{kl} + C_{li}^r * K_{li}$

5.6.1 Modelo propuesto de solución al problema planteado.

Se identifica la necesidad de plantear la solución a un problema de localización dinámica de LI multi-periodo, de múltiples productos, con flujo tanto directo como inverso.

El objetivo del modelo es incurrir en el menor costo posible durante un horizonte contemplado de varios periodos, colocando un centro de recuperación donde llevar el PFU desde cada cliente (planta), una vez inspeccionado y separado, se transporta hasta la planta donde será reutilizado o recuperado; y en el peor de los casos este PFU será eliminado y enviado a un centro de confinamiento.

Es importante mencionar que el algoritmo propuesto contempla un esquema distinto en cuanto al manejo de restricciones permitiendo que algunas soluciones no factibles intervengan en la cruza ayudando a resolver eficientemente problemas multiobjetivo con restricciones (los cuales suelen ser más difíciles).

De lo anterior se muestra en las tablas 5.6 a 5.8, los índices, parámetros y variables utilizados en el modelo.

Tabla 5.6 Índices del problema de **LI**.

Índice	Descripción	Rango
i	Conjunto de ubicaciones de plantas de los clientes.	$1 \dots I$
j	Conjunto de almacenes actuales y nuevos sitios potenciales.	$1 \dots J$
k	Conjunto de ubicaciones de los clientes fijos.	$1 \dots K$
p	Conjunto de tipos de productos de los clientes	$1 \dots P$
l	Conjunto de centros de recuperación existentes y nuevos sitios potenciales	$1 \dots L$
t	Periodos	$1 \dots T$

Tabla 5.7 Parámetros del modelo **LI**.

Parámetros	Descripción
Pr_{it}	Capacidad de producción máxima del cliente de la planta i .
A_{jt}	Capacidad máxima del almacén j .
$Crec_{lt}$	Capacidad máxima del centro de recuperación.
EA_{jt}	Tamaño de expansión modular del almacén j .
$ECrec_{lt}$	Tamaño de expansión modular del centro de recuperación l .
MEA_j	Máximo tamaño para la expansión modular del almacén j .
$MECrec_l$	Máximo tamaño para la expansión modular del centro de recuperación l .
AP_p	Capacidad de almacenamiento del producto p por unidad.
dP_{pkt}	Demanda del producto p por el cliente k en el periodo t .
rP_{pkt}	Cantidad de devoluciones del producto p desde el cliente k en el periodo t .
Costos:	Se incluyen costo de transporte de los productos y costos de mantenimiento
CfA_{jt}	Costo fijo de almacén j en el periodo t .
CIA_{jt}	Costo por instalar almacenes j en el periodo t .
$CfEA_{jt}$	Costo fijo por ampliar el tamaño modular del almacén j en el periodo t .
CEA_{jt}	Costo por operar la expansión modular del almacén j en el periodo t .
$CfCrec_{lt}$	Costo fijo del centro de recuperación l en el periodo t .
$CiCrec_{lt}$	Costo fijo por instalar el centro de recuperación l en el periodo t .
$CACrec_{lt}$	Costo de ampliar el centro de recuperación l en el periodo t .
$CvCrec_{lt}$	Costo variable asociado con la expansión del centro de recuperación l en el periodo t .
CHI_t	Costo de ahorro por apertura del sistema híbrido en el periodo t .
Cvd_{pijkt}	Costo variable por atender la demanda del producto p en los clientes k de la planta i y almacén j en el periodo t , considerando costos de transporte y mano de obra.
Cvr_{pklit}	Costo variable rendimiento de los productos p en los clientes k a través de centros de recuperación l de la planta i en el periodo t , considerando costos de transporte y mano de obra.

Tabla 5.8 Variables del modelo **LI**.

Variabes	Descripción	Tipo
ddP_{pijkt}	Flujo directo: Cantidad del producto p demandado por los clientes k que atiende la planta i y almacén j en el periodo t	Continua
drP_{pkilt}	Flujo inverso: Cantidad de devoluciones del producto p de los clientes k a ser devuelto vía centro de recuperación l a la planta i en el horizonte contemplado t .	Continua
V_{jt}	Valor entero de la expansión modular para el almacén j en el periodo t , si el almacén j está instalado.	Binaria
W_{lt}	Valor entero de la expansión modular para el centro de recuperación l en el periodo t si el centro de recuperación l ha sido instalado.	Binaria
Z_{jt}	Valor 0 (1) si el almacén j está cerrado (abierto) en el periodo t .	Binaria
A_{jt}	Valor 0 (1) si el almacén j no es expandido (expandido) en el periodo t .	Binaria
G_{lt}	Valor 0 (1) si el centro de recuperación l esta cerrado (abierto) en el periodo t .	Binaria
B_{lt}	Valor 0 (1) si el centro de recuperación l no es expandido (expandido) en el periodo t .	Binaria

El modelo de matemático de programación lineal mixta correspondientes es:

$$\begin{aligned}
\min \sum_{t=1}^T & \left[\sum_{j=1}^J CfA_{jt} \cdot Z_{jt} + \sum_{j=1}^J ClA_{jt} \cdot Z_{jl} + \sum_{j=1}^J ClA_{jt} \cdot Z_{jt} \right. \\
& + \sum_{l=1}^L CfCrec_{lt} \cdot G_{lt} + \sum_{l=1}^L CiCrec_{l1} \cdot G_{l1} + \sum_{l=1}^L CiCrec_{lt} \cdot G_{lt} \\
& + \sum_{j=1}^J (CfEA_{jt} \cdot A_{jt} + CEA_{jt} \cdot V_{jt}) + \sum_{l=1}^L (CACrec_{lt} \cdot B_{lt} +) - \sum_{\theta=j=1} CHi \\
& \left. + \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Cvd_{pijkt} \cdot ddP_{pijkt} + \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{I_0} Cvr_{pklit} \cdot drP_{pklit} \right]
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

La función objetivo del modelo **LI** (ecuación 5.12), expresa que se quiere minimizar el total de los costos, los cuales son: los costos fijos de operación y apertura del híbrido (almacén y centro

de recuperación), costos de transporte, el de ahorro de instalaciones integradas, así como los de expansión de los flujo directo e inverso.

Siendo sus restricciones, las siguientes:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K ddP_{pijkt} \leq Pr_{it}, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

Se asegura que las plantas de los clientes han limitado sus capacidades en los términos del contrato.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J CfA_{pijkt} \geq A_{it}, \quad \forall p, \forall k, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

Esta restricción se que la demanda de los clientes al mercado está satisfecha.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K AP_p \cdot ddP_{pijkt} \leq A_{jt} \cdot Z_{jt} + \sum_{\theta=1}^t EA_{j\theta} \cdot V_{j\theta}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

Expresa que cada la capacidad de los almacenes incluyen el tamaño de la expansión en todo el periodo del tiempo.

$$V_{jt} \leq MEA_j \cdot A_{jt}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

Asegura que la expansión es posible, si el almacén ha sido abierto.

$$(T - t + 1)A_{jt} \leq \sum_{\theta=t}^T Z_{j\theta}, \quad \forall j, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.6)$$

Expresa que si hay una decisión de expandir una localidad, esta no deberá ser cerrada.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K drP_{pkilt} \leq Pr_{it}, \quad \forall i, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.7)$$

Esta restricción asegura que no hay flujo de retorno en las instalaciones sin abrir.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I drP_{pkilt} \geq Pr_{it} \quad \forall k, \forall p, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.8)$$

Asegura que todos los productos regresados deben ser enviados a los clientes.

$$\sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K drP_{pikt} \geq Crec_{lt} \cdot G_{lt} + \sum_{\theta=1}^t ECrecl_{l\theta} \cdot W_{l\theta}, \quad \forall k, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.9)$$

Se impone limitación en la capacidad del centro de recuperación incluyendo el tamaño de expansión en todo el periodo de tiempo.

$$W_{lt} \leq MECreCP_l \cdot B_{lt} \quad \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.10)$$

Esta restricción asegura que la expansión es solo posible si un centro de reparación ha sido abierto.

$$(T - t - 1) \cdot B_l \leq \sum_{\theta=t}^T G_{l\theta} \quad \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.11)$$

En esta restricción se asegura que sí hay una decisión de expansión en cualquier centro de recuperación, esta localidad no será cerrada.

$$0 \leq ddP_{pijklt}, \quad drP_{pkilt}, \quad \forall p, \forall i, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.12)$$

Esta restricción conserva la negatividad sobre las variables de decisión.

$$V_{jt} \in \{0, 1, 2, \dots, MEA_j\}, W_{lt} \in \{0, 1, 2, \dots, MEA_l\}, \quad \forall j, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.13)$$

Asegura el número entero de la variable.

$$Z_{jt}, G_{lt}, A_{jt} B_{lt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \forall l, \forall t \quad \dots\dots\dots(5.14)$$

Asegura el número binario de la variable.

CAPITULO VI

“Análisis y discusión de resultados”

6.1 Introducción.

Recordemos que la herramienta propuesta es emplear un modelador y un **AG**, los cuales se encuentran en dos bloques uno de ellos está formado por el código del meta-heurístico, el cual controla todo el proceso de resolución y cuando necesita obtener información de la función objetivo de una solución llama al modelador, enviándole ya construida gran parte de la solución. De esta manera el modelador recibe una combinación de valores que utiliza como datos o parámetros de un modelo para una configuración concreta. Para completar el proceso de resolución, el modelador llama al **AG** el cual resuelve el modelo, con los métodos de programación lineal mixta.

6.2 Análisis descriptivo de los resultados computacionales.

Cabe mencionar que el problema fue resuelto anteriormente por otros autores con heurísticas, programado en lenguaje c^{++} y la solución óptima fue en LINGO mathematical programming software con un tiempo computacional de 8.77 minutos y la mejor solución fue de \$1'314,463.00, indicando la apertura de dos almacenes y dos centros de recuperación.

Para resolver de forma óptima el problema, éste se resolvió por heurísticas basadas en **AGs**, donde los parámetros de los valores se establecen a través de numerosos experimentos. Siendo sus valores:

Población máxima:	300	Número de generaciones:	50
Tasa de cruza:	80%	Clonación:	20%
Tasa de mutación:	0.2 – 0.5%		

El algoritmo genético se utilizo de la caja de herramientas de MatLab 2008^a (Mathematical Programming Software) y se ejecuto en una PC con procesador Intel ® Atom TM a 1.80 GHz, memoria en Ram de 2 Gb y sistema operativo de 32 bits, con una duración de 0.38 minutos. La figura 6.1 muestra la imagen de pantalla del uso del modulo de Algoritmos Genéticos en MatLab, donde indica que los datos generados de resultados son demasiado extensos, por lo que recurrimos a exportar los resultados en hoja de cálculo para su interpretación (Figura 6.2)

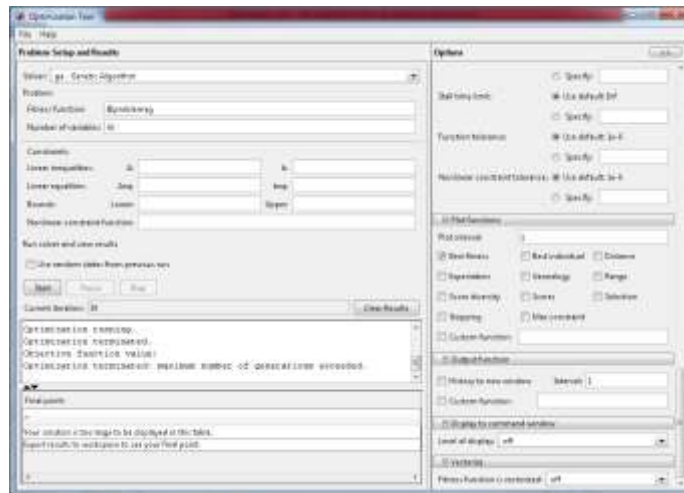


Figura 6.1 Imagen de pantalla del modulo de Algoritmos Genéticos de MatLab.

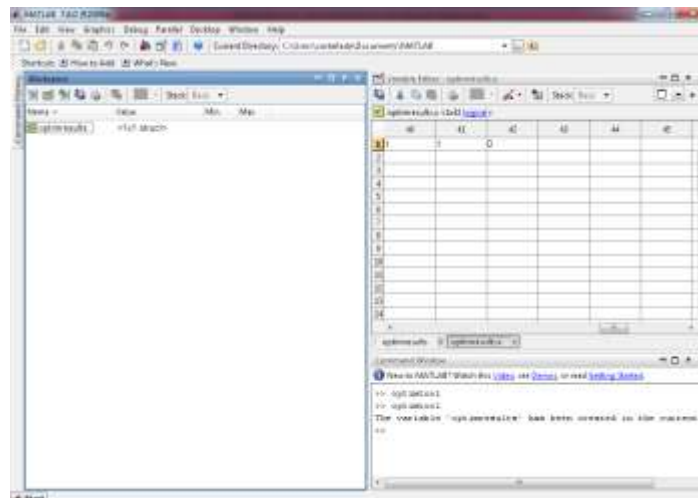


Figura 6.2 Imagen de pantalla de exportación de resultados a hoja de cálculo.

Para obtener mejores resultados se generaron 50 poblaciones con 150 individuos en la ejecución del Algoritmo Genético, lo cual permitió escoger como la mejor solución, encontrando aquella que converge en una corrida normal, en un tiempo de 0.35 segundos, la replica que obtuvo el menor costo total, por lo que en la figura 6.3 se muestra la mejor solución con un costo total de US \$ **1'205,872.00**, y que consideramos como la mejor respuesta al conformar tanto almacenes como CRec, para atender la demanda de los clientes del problema 3PL planteado.

En la figura 6.3 muestra el comportamiento que corresponde a la iteración en la cual se interrumpió la ejecución siguiendo el criterio de parada, permitiendo terminar la ejecución del programa antes de alcanzar un número máximo de iteraciones, si después de cierto tiempo no se encuentran en la solución con un nivel de tolerancia de 0.001%

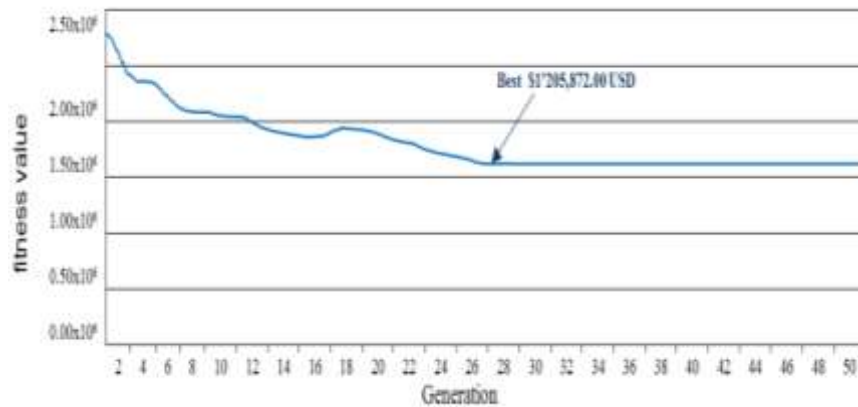


Figura 6.3 Mejor solución por generación.

Para verificar el cumplimiento del objetivo de la función aptitud, la cual se centro en la reducción de costos logísticos en un modelo 3PL, atendiendo los índices, parámetros y variables del modelo LI, procedemos a la interpretación de la tabla 6.1, la cual muestra los costos resultantes de la mejor respuesta al caso analizado, con respecto al resultado obtenido anteriormente, dando un ahorro de **\$108,591.00** dólares mensuales. Observemos que el costo más alto proporcionado en esta información se refiere a \$672,534.00 dólares, tratándose del costo de transporte en flujo directo, así como también vemos que el costo de operar un almacén es de aproximadamente el triple que el costo de operación de un CRec

Tabla 6.1 Costo total.

Costo de operación del almacén	\$	341,150.00
Costo de transporte en flujo directo	\$	672,534.00
Costo de operación del centro de recuperación	\$	82,400.00
Costo de transportación de flujo inverso	\$	106,918.00
Costo ahorrados	\$	2,870.00
Total de costos	\$	1'205,872.00

Luego de ejecutar el AG para este problema, se llego a un plan de Apertura, Cierre y Expansión, tanto de Almacenes como CRec, como lo muestra la tabla 6.2 misma que indica la solución al cromosoma en base al modelo lineal, y en la cadena de bits del cromosoma, encontramos:

Periodo 1: Almacén1 cerrado.

Almacén 2 abierto y se expande para 600 unidades extras,

Centro de Recuperación (C_{Rec}) 1y 2 Abiertos sin expansión.

Periodo 2: Almacén1 abierto y se expande para 600 unidades extras,
 Almacén 2 abierto sin expansión,
 C_{Rec} 1y 2 Abiertos sin expansión.

Periodo 3: Almacenes 1 y 2 abiertos sin expansión,
 C_{Rec} 1 abierto con doble expansión modular para 200 unidades extras.
 C_{Rec} 2 abierto sin expansión.

Index	Almacén						Centro de recuperación					
	1			2			1			2		
	Z	A	V	Z	A	V	G	B	W	G	B	W
$t = 1$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
$t = 2$	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
$t = 3$	1	0	0	1	0	0	1	1	2	1	0	0

Tabla 6.2 Solución al cromosoma en base al modelo lineal.

6.3 Discusión de resultados

El problema planteado en este trabajo está centrado en el Diseño un modelo de logística inversa, que garantice un nivel de servicio objetivo con un mínimo de compromiso de recursos, a través de una modelación que optimiza los recursos logísticos tanto en flujo directo como en flujo inverso. Abordando el problema dinámico de localización de (los) Centro (s) de Recuperación, además permitirá en el futuro una operación y seguimiento de sus PFU en tiempo real con los beneficios de mejorar la gestión y control de inventarios. Dicho modelo será optimizado con el uso de AGs.

Tanto en los resultados que obtiene el modelo **STPNTCLP** a un problema 3PL por medio de Lingo como en los obtenidos con el modelo evolutivos propuestos AGs, llegamos a obtener soluciones muy cercanas al óptimo en ambos casos, una de las la diferencias es el tiempo de ejecución. En el caso del método determinístico es necesario en primera instancia diseñar el modelo matemático que satisfaga las condiciones, así como también establecer las restricciones del problema y posteriormente programar el proceso en el software correspondiente, siendo Lingo v10 el utilizado en el caso presentado anteriormente. Ahora bien cuando aplicamos **AGs**, solo se requiere insertar las tablas de valores del problema y establecer las condiciones de la función aptitud siendo la

codificación más simple y por ende más rápida con respecto al tiempo de programación, y su correspondiente implementación en **Matlab 2008^a**. Con lo que se presenta otro novedoso medio para llegar a determinar un modelo de **LI**, mismo no se había explorado anteriormente para este fin. Una de las ventajas principales de este enfoque es que los resultados obtenidos muestran que hay otras alternativas de solución que alcanzan una aproximación al valor óptimo con un costo computacional mucho más bajo.

6.4 Ejemplo de aplicación 2.

Con el paso del tiempo, la sociedad de consumo nos ha acostumbrado a obtener de forma inmediata y sin excepciones la satisfacción de nuestras necesidades y/o deseos, bien sea por la vía de un producto o servicio. Es por ello que el presente ejemplo, ha sido elaborado con el objetivo de plantear la Logística Esbelta como una de las soluciones actuales en la competitividad de las empresas, este método eficaz ayuda a aumentar los niveles de servicio de una empresa sin penalizar los costos de distribución, en específico nos referimos a la reducción de costos de transporte y la operación de centros de distribución, en una empresa fabricante de cable de transmisión eléctrica de alta, media y baja tensión, que atiende al sector eléctrico en México.

Con lo anterior se expresa la necesidad de que las redes de transporte tengan opciones de mejorar su gestión logística empleando los recursos de forma adecuada, reduciendo costos y mejorando sustancialmente su estrategia competitiva. Para lo mencionado anteriormente, se empezó con una breve introducción del estado actual del sector eléctrico en México, las necesidades del sector del transporte para afrontar los cambios y mejorar la gestión logística; se investigó y se recopiló información sobre la importancia de la gestión logística y la aplicación de herramientas de Excelencia Esbelta para el planteamiento estratégico y las ventajas que se pueden obtener en este sector.

La empresa del sector eléctrico es uno de los sectores donde se puede trabajar la aplicación de Logística Esbelta, ya que existen procesos que se pueden optimizar, entre ellos encontramos la logística de distribución, siendo esta un factor que más influye en el costo total de los productos

La intención tratar los temas de Logística Esbelta y Excelencia Esbelta es hacer frente a los retos actuales como:

- Mejorar la productividad de los procesos y centros logísticos,
- Reducir los costos innecesarios, reducir los tiempos de espera de determinados servicios,

- Aumentar la fiabilidad de entregas completas y a tiempo.

El cumplimiento de estas metas se logra a través del uso de la herramienta Logística Esbelta. (Di Giovanni, Escanciano, 2010).

6.4.1 Logística Esbelta (LE)

La gestión de la cadena de suministro ha sido diseñada para la eliminación de desperdicios en los diferentes procesos involucrados dentro de una empresa. El reto importante en los fabricantes, mayorista, distribuidores, proveedores y cada una de las partes involucradas en la cadena de suministro es el reducir los costos, mantener el equilibrio a lo largo de ésta, respetar horarios y siempre mantener inventario ideal en los procesos.

Martichenko (2009), menciona que la logística esbelta plantea varios desafíos, en especial en los procesos que se manejan a nivel internacional, ya que los tiempos necesarios para traslados tanto de carga como de información veraz debe ser en tiempo real, siendo esta una condición básica que garantiza la satisfacción de las necesidades del cliente. Encontrando que cuando exista la posibilidad de cometer errores por parte de los involucrados como proveedores, transportistas, terminales, agente aduanal, entre otros, se incurrirá en costos adicionales y pérdidas de tiempo.

El objetivo de la Logística Esbelta, es eliminar los desperdicios, reduciendo así el trabajo en el proceso de inventarios innecesarios a través de esfuerzos disciplinados para entender y reducir la variación que, a su vez, disminuye los tiempos de ciclo y aumenta la velocidad del flujo en la cadena de suministro (Goldsby y Martinchenko, 2005).

Dada la dinámica acelerada de los mercados y entorno competitivo a nivel global, se han creado diversas formas de hacer negocio y se ha adoptado el sistema esbelto y seis sigma, esta combinación es nombrada como Lean de Excelencia, herramienta que apoyan la iniciativa de reducción de costos (Martinchenko, 2009).

6.4.2 El sector eléctrico en México

Se ha convertido en un factor determinante en la economía de México, ya que competitividad en la industria hace uso intenso de energía eléctrica, por ello en el 2010 el gobierno federal emprendió acciones orientadas a mejorar su competitividad en el sector eléctrico, y con la extinción de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro en un año logro ahorrar la capacidad de operación y ejecución de obras por un monto de 12 mil millones de pesos. Abatiendo rezagos que se tenían de solicitudes de conexión en el área central. (Kessel, G. 2010)

Kessel (2010), en su premisa básica de la elaboración de un programa denominado **Prospectiva del sector eléctrico 2010-2025**, señala que las estimaciones de demanda y consumo de energía eléctrica para el mediano y largo plazo constituyen un insumo fundamental para el dimensionamiento y diseño del plan de expansión de capacidad de generación y transmisión, con el fin de satisfacer con calidad, confiabilidad y estabilidad las necesidades de la población, en materia de energía eléctrica. Agrega que el programa de expansión del sistema eléctrico nacional, ascienden a **\$1,264,838** millones de pesos para el periodo 2011-2025, en esta cantidad se consideran los rubros de inversión en generación (50.9%), transmisión (16.0%), distribución (20.4), mantenimiento (12.1%) y otras inversiones (0.6%), siendo esta inversión presupuestada a Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Cabe mencionar que en el caso de **transmisión** se empleará cable de alta temperatura, para el proyecto de inversión en **distribución** se necesita cable de alta, media y baja tensión. (CFE, 2010).

6.4.3 Localización de instalaciones para ubicar centros de distribución aplicado a la industria fabricante de cable.

La localización de instalaciones investiga dónde ubicar físicamente un conjunto de facilidades, de modo de satisfacer las demandas de un grupo de clientes (Hale & Moberg, 2003). Las actividades relacionadas con la cadena de suministro se pueden clasificar en 4 áreas (Garrido, 2001): Localización de recursos, Producción, Inventarios y Transporte.

Estas áreas de decisión son usadas en el diseño, planificación y operación de la cadena de suministro, teniendo un alcance temporal y espacial en la organización. Las decisiones de localización apuntan a instalar plantas de producción, centros de distribución, puntos de venta, etc.

Los modelos de localización son aplicados a casos específicos, siendo su estructura (objetivos, restricciones y variables). Por lo que, modelos con distinto objetivo, pueden provocar diferentes soluciones para el mismo caso en estudio (Brandeau & Chiu, 1989).

Los modelos discretos de localización en redes se pueden clasificar de acuerdo con la distancia (Current et al., 2001), existiendo:

P-Centro: (Hakinmi, 1964-1965) pertenece a los modelos de máxima distancia, cuyo objetivo es minimizar la máxima distancia entre un nodo de demanda y su facilidad más cercana, dado un número predeterminado de facilidades a instalar.

P-Mediana: Este modelo (Hakinmi, 1964, 1965), a diferencia del modelo anterior encuentra la ubicación de **p** facilidades con el objetivo de minimizar la demanda-distancia total entre los nodos de

demanda y la facilidad a la cual son asignados, es por esto se dice que este modelo pertenece a los modelos de distancia total o promedio.

Multi-product capacitated plant and warehouse location Model: En este modelo (Pirkul & Jayaraman, 1996), consideran que los clientes demandan múltiples productos, los cuales son enviados desde los almacenes hacia los clientes, y a la vez los almacenes los reciben desde las plantas de manufactura. Se asume que la localización de los clientes es conocida, así como su demanda; también se conoce el número de plantas y almacenes por instalar. Por último, sólo un almacén puede cubrir las demandas de un cliente, pero un almacén puede tener varias plantas proveedoras.

Warehouse location-routing model: Perl & Daskin, (1985) intentan dar respuesta a tres decisiones importantes en la cadena de suministro (Daskin et al., 2003):

1. Localización de almacenes.
2. Asignación de clientes a los almacenes.
3. Distribución de productos a los clientes (Ruteo de Vehículos).

Dentro de las características del modelo Warehouse location-routing se encuentran que los costos de entrega a un cliente dependen de entregas hechas a otros clientes en la misma ruta y dependiendo también de la secuencia en que son visitados los clientes.

El separar las decisiones de localización y ruteo puede llevar a una decisión global no óptima, a pesar que las dos decisiones por separado lo sean. Para la formulación de este modelo se sigue la nomenclatura propuesta por (Daskin et al., 2003), donde además utiliza el término facilidad en vez de almacén. El objetivo de este modelo que considera sólo un tipo de producto, es minimizar la suma de:

- Costos fijos de instalación de las facilidades.
- Costos de transporte entre los proveedores y las facilidades.
- Costo variable de producir en la facilidad j .
- Costos de distribución a clientes.

6.4.4 Formulación del problema.

Como se expuso anteriormente, el sector eléctrico en México demanda 3 tipos de cables para transmisión y distribución de energía eléctrica, encontramos que la industria fabricante de cable, se encuentra ante una oportunidad de ofrecer sus productos, como cable de alta, media y baja tensión.

Esta empresa tiene que transformarse y ser competitiva, y su transformación en gran parte estará dada por la tecnificación de procesos, nuevos métodos de mejoramiento de procesos, nuevos esquemas en sus redes logísticas y nuevos equipos que le permitan desarrollar en forma eficiente sus actividades,

por ello necesita identificar procesos clave, su tecnología, su cadena de suministro y conocer avances tecnológicos que le permitan mejorar sus prácticas de negocio.

En este párrafo emplearemos un caso real que se aplico en una Industria Fabricante de Cable (la cual por políticas propias se omite su razón social, por ello la denominamos **IFC**), donde consideramos el modelo de la P-Mediana como idóneo, para identificar centros de distribución y por la importancia de la información proporcionada por la empresa, estos centros de distribución deben satisfacer algunos criterios de costo como los de transporte.

Como podemos observar se proporciona información respecto a los diversos puntos de consumos y sus respectivas distancias expresadas en kilómetros (tabla 6.3), con dicha información se construyo la matriz de costos de transporte en función del kilometraje recorrido (tabla 6.4), y se considero a los clientes de mayor volumen demandado.

Tabla 6.3. Matriz de distancias entre clientes y plantas.

Plantas potenciales	Mercados Potenciales (Kms.)					
	Apizaco	Pachuca	Puebla	Nvo. Laredo	DF	Piedras Negras
Apizaco	0.00	229.00	50.00	1292.00	143.00	1475.00
Pachuca	229.00	0.00	213.00	1131.00	88.00	1314.00
Puebla	50.00	213.00	0.00	1344.00	125.00	1457.00
Nvo. Laredo	1292.00	1131.00	1344.00	0.00	1187.00	183.00
Distrito Federal	143.00	88.00	125.00	1187.00	0.00	1302.00
Piedras Negras	1475.00	1314.00	1457.00	183.00	1302.00	0.00
Campeche	1350.00	1283.00	1169.00	2127.00	1295.00	2310.00
Hermosillo	2178.00	2006.00	2128.00	2075.00	2002.00	2045.00
Tijuana	3061.00	2908.00	3005.00	2611.00	2880.00	2458.00

Fuente: IFC (2010)

Tabla 6.4. Matriz de costo por Kilómetros.

PRIMERA MATRIZ DE COSTOS						
	Apizaco	Pachuca	Puebla	Nuevo Laredo	D. F.	Piedras Negras
Apizaco	0	266	58	1500	166	1712
Pachuca	266	0	247	1313	102	1526
Puebla	58	247	0	1560	145	1692
Nuevo Laredo	1500	1313	1560	0	1378	212
D. F.	166	102	145	1378	0	1512
Piedras Negras	1712	1526	1692	212	1512	0
Campeche	1567	1490	1357	2469	1503	2682
Hermosillo	2529	2329	2471	2409	2324	2374
Tijuana	3554	3376	3489	3031	3344	2854

Fuente: IFC (2010)

En función del Costo por kilometro que es de \$ 0.580495 dólares (Costo proporcionado por la gerencia de logística), se determina la matriz final de costo, donde consideramos la demanda mensual

del mercado a ser cubierta (ver tabla 6.5) y la capacidad del transporte de carga empleado es de 1,450 ft. Lineales de producto.

Tabla 6.5. Demanda de mercados en pies lineales.

Mercado	Demanda (pies al mes)
Apizaco, Tlaxcala	160,000
Pachuca, Hidalgo	66,000
Puebla, Puebla	53,700
Nuevo Laredo, Tamaulipas	55,900
México Distrito Federal	101,200
Piedras Negras, Coahuila	93,300

Fuente: IFC (2010)

Para el cálculo de los costos finales, fue necesario conocer las demandas por mes de producto (tabla 6.5), en nuestro caso, el requerimiento es en pies lineales de producto, y con las tablas 6.3 y 6.4, recurrimos a determinar los costos finales (Tabla 6.6) donde se considera, kilometraje, costo por kilometraje, demandas por mes, siendo estas variables importantes para la modelación matemática.

Tabla 6.6 Matriz final de costos en dólares americanos.

MATRIZ DE COSTOS						
	Apizaco	Pachuca	Puebla	Nvo. Laredo	D. F.	Piedras Negras
Apizaco	0	12248	2150	57828	11587	110188
Pachuca	29337	0	9158	50622	7131	98161
Puebla	6405	11392	0	60155	10129	108843
Nvo. Laredo	165517	60492	57788	0	96182	13671
D. F.	18320	4707	5375	53128	0	97264
Piedras Negras	188961	70280	62646	8191	105500	0
Campeche	172948	68622	50263	95201	104933	172566
Hermosillo	279022	107292	91497	92873	162220	152769
Tijuana	392143	155536	129205	116864	233364	183622

Fuente: IFC (2010)



Figura 6.4 Ubicación entre clientes y plantas (Situación actual). Fuente: IFC (2010)

La figura 6.4 muestra las ubicaciones geográficas de las posibles plantas del grupo empresarial IFC del problema.

Tabla 6.7 Matriz de datos adicionales.

Planta	capacidad de planta (ft lineales)		Costos fijos
	Diario	al mes	
Apizaco	3500	253050	273000
Pachuca	2200	159060	237000
Puebla	2400	173520	243000
Nvo. Laredo	1800	130140	207000
D.F.	2800	202440	252000
Piedras Negras	3000	216900	267000
Campeche	2000	144600	215000
Hermosillo	1900	137370	215400
Tijuana	2300	166290	240000

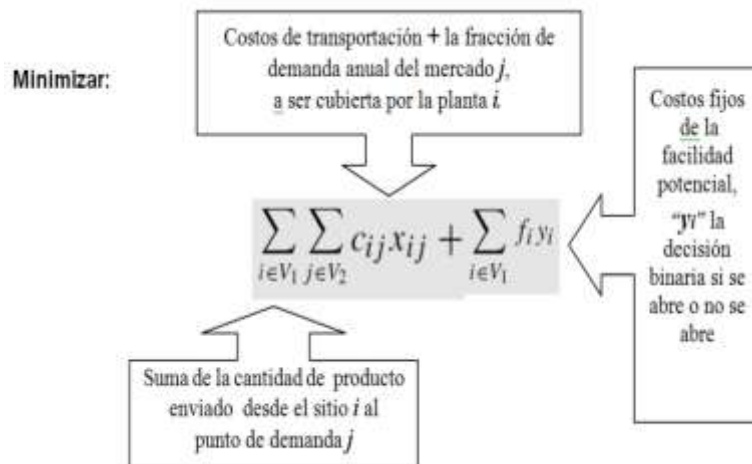
Fuente: IFC (2010)

6.4.5 Modelo propuesto de solución.

Con apego al diseño metodológico, sin olvidar el planteamiento de la necesidad de ubicar centros de distribución, presentamos la información siguiente: En las diversas reuniones con personal de la empresa IFC, y con la información proporcionada, externaron la necesidad de ubicar otros centros de distribución, además de considerar la potencialidad de atender las necesidades de C.F.E.

El objetivo del modelo de **P-Mediana** considera sólo un tipo de producto, y la función objetivo es minimizar la suma de:

- Costos fijos de instalación de las facilidades.
- Costos de transporte entre los proveedores y las facilidades.
- Costo variable de producir en la facilidad j.
- Costos de distribución a clientes.



Y sus restricciones son:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m; \quad \text{Fracción de la demanda del mercado } j, \text{ satisfecho por la planta } i$$

$$\sum_{j=1}^m d_i x_{ij} \leq s_j y_j, \quad j = 1, \dots, m; \quad \text{Que la demanda sea menor a la capacidad de la planta}$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad i \in V_1, j \in V_2, \quad \text{Conserva la negatividad sobre las variables de decisión.}$$

$$y_j = \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n; \quad \text{Decisión binaria}$$

6.4.6 Herramienta propuesta de solución.

En este problema mostramos, por un lado, la importancia de las decisiones en el diseño de la cadena de suministro y, por otro, el empleo de un modelo de localización presentado, a un caso práctico, dicho modelo se resolvió inicialmente con el programa computacional Lingo 10.0, y la solución optima en su mejor solución fue de **\$684,950.30, USD**. Ahora la herramienta que proponemos es utilizar **Algoritmos Genéticos (AG)**, los cuales se encuentran en dos bloques uno de ellos está formado por el código del meta-heurístico, el cual controla todo el proceso de resolución y cuando necesita obtener información de la función objetivo de una solución llama al modelador, enviándole ya construida gran parte de la solución, el modelo se resuelve, con los métodos de programación lineal mixta.

Este problema se estableció con numerosos experimentos y se utilizó el módulo de algoritmos genéticos de la caja de herramientas de MATLAB R2008a.

Se determinó por diseñar 9 cromosomas de 6 bits cada uno, presentado en filas y columnas (Tabla 6.8),

Tabla 6.8 Cromosoma de 42 bits

Plantas	Demandas					
	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

El cromosoma 1 contiene los bits 1 al 6 corresponden a las demandas que puede atender la planta 1, el valor **(0,1)** representa '1' atender la demanda por la planta 1 al mercado y '0' significa que no se atiende la demanda por la planta 1 al mercado, así sucesivamente tenemos la siguiente distribución (Tabla 6.9):

Tabla 6.9 Distribución de la cadena de bits

Cromosoma	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bits	1 al 6	7 al 12	13 al 18	19 al 24	25 al 30	31 al 36	37 al 42	43 al 48	49 al 54

Fuente: Elaboración propia

6.4.7 Experimentación y resultados.

El algoritmo genético para este ejercicio fue ejecutado con los siguientes datos:

Población máxima: 100	Número máximo de generaciones: 30
Radio de cruce: 0.8	Clonación: 20%
Radio de mutación: 0.2	Método de selección: Torneo

Los cromosomas óptimos resultantes son los mostrados en la Tabla 6.10 de acuerdo con la posición del valor binario, se observa que la planta 1 atiende a los mercados 1, 3 y 5, la planta 2 atiende a los mercados 2, 5 y 6 y la planta 4 atiende su propia demanda únicamente. Mientras que las plantas 3, 5, 6, 7, 8 y 9 no se presentan apertura de ellas.

Tabla 6.10 Cromosomas Óptimos.

Plantas (Cromosoma)	Demandas (%)					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	0	1	0
2	0	1	0	0	1	1
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los requisitos es conocer cuáles plantas atienden a los mercados y cantidades que aportarán para satisfacer la demanda, por ello se elaboro la tabla 6.11, donde se indican las cantidades que satisfacen las demandas.

Tabla 6.11 Cromosomas Óptimos, con aportaciones por planta.

Plantas (Cromosoma)	Demandas (%)					
	1	2	3	4	5	6
1	100% 160000	0	100% 53700	0	27.67% 28002.04	0
2	0	100% 66800	0	0	72.33% 73197.96	20.42% 19051.86
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	100% 55900	0	79.58% 74248.14
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6.5 muestra la gráfica de las mejores soluciones por generación para encontrar el resultado óptimo, el cual fue alcanzado en la generación 16. El costo promedio fue de \$510,286.4655 USD, el mejor costo fue de **\$490,732.58 USD** y el peor costo fue de \$702,236.89 USD.

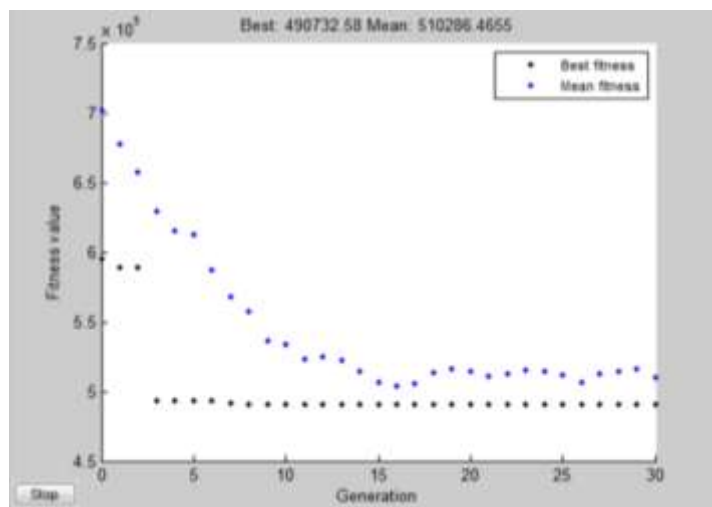


Figura 6.5 Mejor solución grafica en 30 ejecuciones del Algoritmo Genético.

6.4.8 Análisis y comparación de resultados.

Tanto en los resultados que obtiene el modelo determinístico P-med por medio de Lingo como en los obtenidos con el modelo evolutivos propuestos GAs, llegamos a optimizar la solución.

En el caso de la solución con Lingo resulto un costo de **\$684,950.30** y la tabla resultante indico que se requería solo de dos plantas para atender la demanda, incrementándose notablemente los costos de transporte.

Tabla 6.11 Resultados de Lingo.

Plantas	Demandas					
	1	2	3	4	5	6
1	160000	0	53700	21460	0	0
2	0	0	0	0	0	93300
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	66800	0	34440	101200	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
Total	160000	66800	53700	55900	101200	93300

Ahora bien la corrida en AG, que ofrece mejor costo, sugiere la operación de tres plantas que fabrican cable de alta, media y baja tensión, y se ubicaran con la siguiente distribución (mostrada geográficamente en la figura 6.5):

Planta 1 Apizaco (95.51% de su capacidad instalada), atiende los mercados de Puebla, México Distrito Federal y misma demanda de Apizaco.



Figura 6.5 Ubicación geográfica de respuesta al problema. Fuente: Elaboración propia.

Planta 2 Pachuca (67.10% de su capacidad instalada), atiende su propia demanda, México Distrito Federal y Piedras Negras Coahuila, y Finalmente.

Planta 4 Nuevo Laredo Tamaulipas (62.87% de su capacidad instalada) satisface su demanda.

Cuando aplicamos GAs, solo se requiere insertar las tablas de valores del problema y establecer las condiciones de la función aptitud siendo la codificación más simple y por ende más rápido con respecto al tiempo de ejecución, y su correspondiente aplicación del modulo de algoritmos genéticos de la caja de herramientas de Matlab **2008^a**. Con lo que se presenta otro novedoso medio para llegar a determinar centros de distribución que no se había explorado anteriormente para este fin.

Una de las ventajas principales de este enfoque es que los resultados obtenidos muestran que hay otras alternativas de solución que alcanzan una aproximación al valor óptimo con un costo computacional mucho más bajo.

Los resultados del problema presentado y tratado con Lingo y con AG, nos demuestran la valía de los GAs como una alternativa diferente para llegar a soluciones muy cercanas a las óptimas. Por otra parte definen y explotan de manera más específica los criterios de diversificación e intensificación mediante los operadores de selección, cruza y mutación. Hasta el momento existe en la literatura gran diversidad de trabajos dedicados al estudio y aplicación de los GAs, sin embargo se han limitado en su aplicación a la optimización en la cadena de suministro, la importancia de su aplicación de esta herramienta para el tipo de problemas de localización de centros de distribución.

CAPITULO VII

“Conclusiones y trabajos futuros”

7.1 Conclusiones.

La conclusión más relevante que se desprende del trabajo de esta tesis, en cuanto al aspecto de la Logística Inversa, es:

- La logística inversa está teniendo una importante relevancia en estos tiempos. El desmedido aumento de la cantidad de los residuos, de los productos devueltos o refabricados, y de otros flujos inversos está haciendo que aparezca un nuevo problema que años atrás no se tenía tanta importancia o, si la tenía no con la misma relevancia.
Debido a esta importancia se están creando y publicando numerosas leyes o decretos por parte de los gobiernos (local, estatal y federal) y surgen numerosas empresas que tratan de resolver los problemas que aparecen.
- Lo antes expuesto nos conlleva a proponer el cierre del círculo logístico. De ahí que la Logística Inversa no puede ser olvidada entre el resto de las actividades logísticas de la empresa.
- La investigación sobre la Logística Inversa es reciente, existiendo pocas referencias de más de veinte años, aun y con esto, ya existe una metodología más o menos aceptada por los investigadores.
- Se identificaron pocos trabajos de logística inversa aplicados a la localización de instalaciones, entre ellos *MCFPL*, *MPMCFLP* y *STPNTCLP* y otros muchos aún no estudiados.
- De los pocos trabajos encontrados tratan sobre la localización dinámica o estocástica en logística inversa. En este trabajo se incluyeron ambas características, ya que los problemas en la vida laboral pasan de estáticos a dinámicos, ó de determinístico a estocástico, incrementando notablemente la dificultad de resolución. Ante este interesante campo de investigación, se buscan métodos específicos de resolución eficaz y eficiente para este tipo de problemas, sobre todo cuando son de gran tamaño, tal como ocurre en casos reales.
Se crea la necesidad de métodos y herramientas que permitan resolver problemas del tipo de localización dinámico o estocástico, o ambos a la vez, en un tiempo razonable que ayude a tomar decisiones.
- En la presente tesis se presento una metodología que ayuda abordar la resolución de problemas de localización dinámica y estocástica en logística inversa, basado en:

- Empleo de técnicas metaheurísticas.
- Estructura de solución basada en matrices.
- Herramienta de resolución compuesta por un metaheurístico y un modelador, que resuelve en forma rápida modelos lineales continuos.

A modo de conclusión con respecto a optimización, encontramos que:

La mayoría de los problemas de optimización conllevan la maximización y/o minimización de varios objetivos de forma simultánea. En la mayoría de los casos esos objetivos suelen estar en conflicto, es decir, la mejora en algunos de ellos provoca el deterioro en otros.

En optimización mono-objetivo existe un óptimo global, mientras que en el contexto multi-objetivo no existe una solución claramente definida sino un conjunto que optimiza todos los objetivos. En la década pasada, la mayoría de los trabajos en el campo multi-objetivo hacen uso del concepto de Pareto-optimalidad, basando su estrategia en frentes pareto generando un conjunto de soluciones no dominadas como una aproximación al frente de Pareto-optimos.

Durante el trabajo conducido en la presente tesis, se ha desarrollado una metodología basada en algoritmos genéticos, para el diseño y optimización de un modelo de Logística Inversa, dicha metodología ha sido aplicada a dos problemas para demostrar su eficacia.

Se escogieron los algoritmos genéticos por sus características intrínsecas, que los hacen un método adecuado para el tratamiento de problemas multiobjetivo. Se permitió explorar distintas regiones del espacio de búsqueda, misma que debe satisfacer múltiples objetivos, donde muchos de ellos se contraponen.

Otra característica de los algoritmos genéticos son su flexibilidad y adaptabilidad al tipo de problema a resolver. La metodología desarrollada permite trabajar directamente con las especificaciones de diseño, e incluir en la función de evaluación todos los parámetros que se consideren oportunos.

Para llevar a cabo la ordenación de las distintas poblaciones, se utilizó el método de prioridades de variables. En problemas de optimización multiobjetivo, las aptitudes de los cromosomas son función de los distintos objetivos considerados; se tienen entonces dos posibilidades: agrupar las medidas sobre los grados de consecución de cada objetivo en un valor único, o trabajar directamente en aptitudes vectoriales.

Otros de los resultados encontrados en la realización de esta tesis, son:

- Una selección cuidadosa de los individuos a recombinar, proporciona una capacidad de explotación excelente, conjugándolo con un elitismo apropiado, se pueden poblar más rápida y eficientemente los espacios promisorios, dando con ello una mayor probabilidad de encontrar nuevas soluciones no dominadas.
- Es necesario que convivan activamente, una capacidad explorativa robusta y la exploración eficiente de una región, de tal manera que se complementen; la primera encontrando espacios de búsqueda atractivos y la segunda poblándolos rápidamente.
- Aún empleando diferentes métricas para medir el desempeño de algoritmos para optimización multi-objetivo, es difícil lograr unánimemente a un vencedor. De esto se intuye que mediante la creación de una técnica basada en una metodología multi-objetivo, que involucre todas las técnicas a comparar, es posible solucionar este problema de medición de desempeño.

En una forma global de concluir, podemos decir que el trabajo ofrece un enfoque diferente a lo propuesto hasta este momento en la literatura para la resolución de problemas localización de instalaciones en logística inversa. Contemplando el carácter dinámico y estocástico, no solo supone una innovación en el estudio en el estudio cuantitativo de este tipo de problemas, sino que facilita la comprensión de la naturaleza de las decisiones de localización de instalaciones en logística inversa.

Este enfoque y herramienta desarrollada ofrecen resultados satisfactorios para los tipos de problemas evaluados. Además, el trabajo realizado puede servir de partida para desarrollos futuros, como los que se ofrecen a continuación en el siguiente apartado.

7.2 Trabajo futuro.

Existen diversas extensiones posibles que pueden realizarse a la propuesta presentada en esta tesis, dejando abiertas algunas líneas de investigación, las cuales son:

- En primer lugar se podrían introducir mejoras respecto al trabajo ya realizado en esta tesis, siendo: mejorar el código desarrollado para programar la herramienta, agregando interfaces para hacer el sistema accesible a su interpretación.
- Aplicar elitismo (el uso de una población secundaria para retener a las soluciones no dominadas producidas a lo largo del proceso evolutivo) siendo una característica

imprescindible para la creación de un algoritmo eficiente. Promoviendo la velocidad en la convergencia al impedir pérdidas en las mejores soluciones previamente encontradas y al proporcionar un camino promisorio de búsqueda.

- Desarrollar de nuevo la herramienta a base de software libre e independiente, permitiendo el inconveniente del precio.
- Respecto al tipo de problemas estudiados, se sugiere buscar otros casos de localización en logística inversa en los que aparezcan la componente dinámica del mismo o la conveniencia de utilizar enfoques estocásticos.
- Proponemos como desarrollo futuro el análisis de las soluciones de los problemas de localización en logística inversa, centrándose en el estudio de robustez (sensibilidad) de las soluciones, en el interés de buscar una mejor solución cuando hay incertidumbre en los datos, o en la búsqueda de los límites en los que estudiar los problemas como dinámicos o estocásticos carece de ser relevante.
- Es urgente la creación de asociaciones de profesionales en logística, con miembros multidisciplinarios, de reconocida trayectoria laboral en cadenas de abastecimiento e investigadores académicos, que aseguren alcanzar los objetivos científicos y prácticos, a través de la investigación y desarrollo, que puedan ofrecer al mercado soluciones informático-logísticas eficientes y de menor costo.
- Es necesario que estas agrupaciones integren la gestión logística, los problemas de optimización y las TICs en un solo esfuerzo para resolver los problemas que se plantee.
- En un sector tan competitivo como el de los operadores logísticos, donde los precios no son altos y las empresas buscan el margen de contribución de cada producto, con costos de operación crecientes en el mercado en México, cada punto que se logre reducir en los costos logísticos será la diferencia.

En general, la estrategia de la logística inversa es una zona bastante nueva y por descubrir, así cualquier investigación adicional sobre este tema sería un aporte benéfico tanto para la sociedad académica y el mundo empresarial.

REFERENCIAS

- Ammons, J. C., Realff, M. J. y Newton, D. (1997). "Reverse production system design and operation for carpet recycling". Working Paper. Georgia Institute of Technology . Atlanta. Georgia.
- Ballou, R.(2004), *Bussines Logistics Management*. Pearson Education Prentice Hall, New Jersey.
- Bañegil, T. M. y Rivero, P. (1998). "¿Cómo de verde es su marketing?". EsicMarket 99, 97-111.
- Baños, R., (2006), Meta-heurísticas Híbridas para Optimización Mono-objetivo y Multi-objetivo. Paralelización y Aplicaciones. Universidad de Almería, Departamento de Computadores y Electrónica, Ph. D. Disertación, Almería Diciembre 2006.
- Barros, A. I., Dekker, R. y Scholten, V. (1998). "A two-level network for recycling sand: a case study". European Journal of Operational Research 110, 199-214.
- Bautista, B., Pereira, J. (2006), Modeling the problema of location collection areas for urban waste management. An applicatio to the metropolitana rea of Barcelona. Omega, 34(6): 617-629.
- Bloemhof-Ruwaard, J. M. Van Beek, P., Hordijk L. y Van Vassenhove L. (1995), " Interaction between operational research and environmental management", European Journal of Operational Research 85, 229-293.
- Blum, C., Roli, A., (2003), Meta-heuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison, ACM Computing Surveys 35(3), 268-308.
- Bowersox, D. J. (1974). Logistical management. MacMillan Publishing Co. New York.
- Brandeau, M., & Chiu, S. (1989). An a Overview of Representative Problem in Location Research Management Science, 35(6), 645-674
- Carrasco, J., (2000), Evolución de los enfoques y conceptos de la logística: Su impacto en la dirección y gestión de las organizaciones. Economía Industrial, 331: 17-34.
- Carter, C. R., Ellram, L. M., (1998), Reverse Logistic: A review of literature and framework for future investigation. International Journal of business Logistics, 19 (1): 12-85.
- Chase, R. B. y Aquilano, N. J. (1994). Dirección y administración de la producción y de las operaciones. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Christopher, M., (1998), Logistics and Supply Chain Management – Strategics for reducing Cost and Improve service. Pitman Publishing.
- CHURCH, L. Richard, Cobra: A new Formulation of the Clasic P-Median Location Problem, Annals of Operation Research, p-103.
- Claycomb, C.; Droge, C.; Germain, R. (1999): The effect of Just-in-Time with Customers on Organizational Design and Performance, International Journal of Logistics Management, Vol. 10 No 1, pp. 37-58.
- CLM (1985) Council of Logistics Management. Oak Brooks. Illinois.
- Coello Coello, C. A., (1999), *A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjtieve Optimization Techniques*. Knowledge and Information System. An International Journal, 1(3): 269-308, August 1999.

Coello Coello, C. A., (2002), Theoretical and Numerical constrain-handling Techniques used with Evolutionary Algorithms: a survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, 1245-1287.

Comision Federal de Electricidad, (2010), *Costos y parámetros para la Formulación de Proyectos de Inversión "COPAR" (tomo de generación) 2010*, CFE, México.

CSCMP (antiguo CLM), (2007), Council of Supply chain management professionals, <http://www.cscmp.org>.

Current, J., Daskin, M., & Berger, R., (2001). Discrete Network Location Models. In *Facility Location Theory: Applications and Methods*, pp 85-112. Berlin: Z. Drezner & H. Hamacher Eds.

Daskin, M., Snyder, L., & Berger, R. (2003) *Facility Location in Supply Chain Desing*. Working paper, No. 03-101 Northwestern University

Davis, L., (1989), *Adapting Operator Probabilities in Genetic Algorithms*. In J. David Schaffer (ed.), *Proceedings of the third International Conference on Genetic Algorithms*. San Mateo, California,: Morgan Kaufmann Publishers.

Davis, L., (editor), (1991), *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York.

De Brito, M., (2003). *Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management*, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus University Rotteram, Tesis Doctoral.

De Brito, M., y Dekker, P. (2003). *A framework for Reverse Logistic*, Erasmus University Rotteram, Report Series Research in Management, ERS-2003-045-LIS.

De Jong, K. A., (1985), *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptative Systems*. University of Michigan, Ph. D. Dissertation.

Di Giovanni, V., Escanciano, V., (2010), *Caso de éxito Lean: Cómo mejorar la productividad de un centro de distribución.*, Grupo Galgano, España.

Dorigo, M., Di Caro, G., (1999), *The Ant Colony Optization Meta-heuristic*, In *New Ideas in Optimization*, F. Glover (ed.), Mc Graw-Hill, 11-32.

Dowlatshahi, S., (2000). "Developing a reverse logistics theory", *interfaces* 30 (3), 143-145.

Druker, P., (1962), "The economy's dark continent", *Fortune*, 72, 1962.

Eiben, A. E., y Smith, J. E., (2003), *Introduction to Evolutionary Computing*. Natural Computing Series, Springer, November 2003.

ELA, (1991), European Logistics Association. What is ELA?. *Inf. Téc.*, ELA

Ellinger, A.; Lynch, D.; Andzulis, J.K. and Smith, R. (2003): B-to-B E-Commerce: A Content analytical Assessment of Motor Carrier Websites, *Journal of Business Logistics*, Vol. 24 No 1, pp. 199-221.

Feo, T., Resende, M., (1995), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*, *Journal of Global Optimization* 6, 109-133.

Ferrer, G. (2000). "Market segmentation and remanufacturing". *Proceedings of First World Conference on Production and Operation Management*, POMS, Sevilla 2000.

Fleischmann, M., (2001). Quantitative models for reverse logistics. Lecture notes in Economics and Mathematical Systems 501.

Fleischmann, M., (2001). Quantitative models for reverse logistics. Lecture notes in Economics and Mathematical Systems 501.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. y Van Vassenhove L. (1997), "Quantitative models for reverse logistics: a review". European Journal of Operational Research 103, 1-13.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. y Van Vassenhove L. (1997), "Quantitative models for reverse logistics: a review". European Journal of Operational Research 103, 1-13.

Fogel, G. B., Weekes, D. G., Sampath, R., y Ecker, D. J., (2004), *Parameter Optimization of an Evolutionary Algorithms for RNA Structure Discovery*. Congress on Evolutionary Computation, CEC2004, Vol 1, 607-613, June 2004.

Fonseca, C. M., y Fleming, P. J., (1998), Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms – Part I: A unified Formulation and Part II: Application Example. IEEE transaction

Francis, R., McGinnis, L., y White, J., (1992), Facility layout and location: An analytical approach, Prentice-Hall.

García, O. A., (2006). Recomendaciones Táctico-operativas para implementar un programa de Logística Inversa, Estudio de Caso en la industria del reciclaje de plástico. Edi. Eumed.net.

Garey, M. R., Johnson, D. S., (1979), *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman & Company. San Francisco.

Garrido, R. (2001). Modelación de sistemas de distribución de carga. Santiago Ediciones Universidad Católica de Chile.

Gattorna, J. y Walters, D. Managing the Supply Chain – A strategic perspective. MacMillan Press.

General Cable Latinoamérica, (2010), Personal de GCL que colaboraron: LNI Roberto Cruz, Ing. Horacio Hernández Bretón, Ing. Francisco Ribes Pérez, Ing. Rubén Rojas, Equipo Green Team, Ing. Luis Rosete.

Gerencia de Logística, (2010) IFC (LNI. Roberto Cruz, Ing. Francisco. Ribes Perez.)

GHIANI, Giancarlo, Introduction to Logistic Systems Planning and Control, John Wiley and Sons, Ltd, England 2004, P.81-83.

Ginter, P. y Starling, J. M. (1978). Reverse distribution channels for recycling. California Management Review, 20(3):72-86.

Glover, F., (1975), Heuristics for Integer Programming using Surrogate Constraints, Decision Sciences 8(1), 555-568.

Glover, F., Kochenberger, G. A., (2003a), *Handbook of Meta-heuristics*, International Series in Operations Research Management Science.

Glover, F., Laguna, M., (1997), *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers Boston.

Glover, F., Laguna, M., Dowsland, K. A., (1993), *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. C. R. Reeves (ed.) Blackwell, London

Glover, F., Melián, B., (2003b), *Búsqueda Tabu*, Inteligencia artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial 19(2), 7-28.

Goldberg, D. E., (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, New York.

Goldberg, D. E., Sastry, K., (2001), *A Practical Schema Theorema for Genetic Algorithms Desing and Tuning*, AProceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Cenfrence (GECCO-2001).

Goldsby, T., Martinchenko, R., (2005), *Lean Six Sigma Logistics: Strategic Development to Operational Success*, Ed. J. Ross Publishing, Inc. ISBN 1-932159-36-3, U.S.A.

Gomes-Saleman, M., Barbosa-Povoab., y Novoais, A., (2007), An optimization model for the capacited multi-product reverse logistics networks with uncertainty. *European Journal of Operation Research*, 179(3), 1063-1077.

Gonzales-Torre, P., y Adenso-Diaz, A., (2002), A model for the reallocation of recycling containers: application to the case of glass. *Waste Management & Research*, 20(5), 398-406.

Gonzales-Torre, P., y Adenso-Diaz, A., (2006), A scatter search approachmto the optimum disassembly sequence problema. *Computers & Operation Research*, 33(6), 1776-1793.

Grant, R. M. (1991). "*The resource-based theory of competitive advantage*". *California Management* 18, 467-4683.

Grefenstette, J. J., (1986), *Optimization of Control Parameters for genetic Algorithms*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-16(1)

Grefenstette, J. J., (1992), *Genetic Algorithms for Changing Environments in Parallel Problem Solving from Nature 2*. R.Manner and B. Manderick, Eds. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 137-144.

Grotschel, M., (1995), *Combinatorial Optimization*, In *Handbook of Combinatorics*, vol. 2, chapter 28, R. Graham y col. (eds.), North-Holland, 1541-1597.

Guide Jr., V. D. R. (2000). "Production planning and control for remanufacturing: practice and research needs". *Journal of Operations Management* 18, 467-483.

Guiltinan, J. P. y Nwokoye, N. G. (1975). Developing distribution channels and system in the emerging recycling industries. *International Journal of physical Distribution*, 6(1):28-38.

Gupta, S., Veerakamolmal, P., (2000), A bidirectional supply chain optimization for reverse logistics. En *proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the environment*. San Francisco, U.S.A.

Gutiérrez, G. y Prida, B. (1998). *Logística y distribución física: Evolución, situación actual, análisis comparativo y tendencias*. MacGraw-Hill.

Haijun, Y., Minqiang, L., y Jisong, K., (2003), *Exact Schema theorem base don the Space of Schema*. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cibernetics*, Vol. 1, 349-354.

Hakimi, S. L. (1964), *Optimun Location of switching Centers and the absolute Centres and medians of a Grap*. *Operations Research* 12,450-459

- Hakimi, S. L. (1965), Optimum distribution of switching Centers and some Graph-Related Theoretic Problems. *Operations Research* 13,462-475
- Hale, T., & Moberg, Ch. (2003). Location science research: A review. *Annals of Operations Research*, 123(1), 21-35
- Hansen, P., Mladenovic, N., (1999), An Introduction to Variable Neighborhood Search, In *Meta-heuristics, Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, S. Voss (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 433-458.
- Henne, A. (1997). “*The nature of strategic management*”. *Long Range Planning* 30 (6), 933-938.
- Heskett, J., Ivie, R. y Glaskowsky, N. (1973), “Business logistics; physical distribution and materials management”, Ronald Press Co.
- Holland, J., (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press.
- IFC, Industria fabricante de cable, (2012), Estudio técnico, de la logística y de mercado y su red de distribución, Tetla, Tlaxcala, México.
- Iglesias, M. T., (1998), *Algoritmos genéticos generalizados: Variaciones sobre un tema*. Universidad de Coruña. Servicio de Publicacións, Setembro 1998.
- Janikow, C., y Michalewicz, Z., (1990), *Specialized Genetic Algorithms for Numerical Optimization Problems*. *Proceedings of the International Conference on Tools for AI*, 798-804.
- Jayaraman, V., Guide, V. D. R., y Srivastava, R. (1999). “A closed-loop logistics models for remanufacturing”. *Journal of Operational Research Society* 50, 497-508.
- Jayaraman, V., Patterson, R., y Rolland, E., (2003), The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150(1), 128-149.
- Johnson, P. F. (1998). “Managing value in reverse logistics system”. *Logistics and Transport Review* 34 (3), 217-227.
- Jonsson, R., y Malec, J., (2001), *Towards computing the Parameters of the Simple Genetic Algorithm*. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation CEC2001*.
- Kant, R.; Stenger, A. y Wu, H.J. (1994): Training Future Logistics Managers: Logistics Strategies within the Corporate Planning Framework, *Journal of Business Logistics*, Vol. 15 No 2, pp. 249-260.
- Kessel, G., (2010), *Prospectivas del sector eléctrico 2010-2025*, Ed. Secretaria de Energía, Subsecretaria de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., (1983), *Optimization by Simulated Annealing*, *Science* 220, 671.
- Klausner, M. y Hendrickson, C. T., (2000). “Reverse logistics strategy for product take-back”. *Interfaces* 30 (3), 156-165
- Klose, A., y Drexler, A., (2000), Lower bounds for the capacitated facility location problem based on column generation. *Inf. Téc., Universität St. Gallen*.
- Kopicki, R. (1993). *Reuse and recycling*. CLM. 1993

- Kotler, P. (1994). Dirección de Marketing. 8ª edición, Prentice Hall.
- Krikke, H. R., (1998). "Recovery strategies and reserve logistic network design". Institute for Business Engineering and Technology Application (BETA)
- Krikke, H. R., Kooki, E. J. y Schuur, P. C. (1999). "Network design in reverse logistics: A quantitative model". New trends in distribution Logistics. Lectures in Economics and Mathematical System. 480. Springer-Verlag. 45-61
- Krikke, H., Kooi, E. y Schrurr, P., (1999), Network desing in reverse logistics: A quantitative model. New trends en Distribution Logistics, Economical Notes in Economics and Mathematical Systems, 480.
- Krikke, H., Van Nunen, J., Papis, C., (2003). Creating value form returns, CentER Applied Research working, paper no. 2003-2.
- Kroon, L. y Vrijens, G. (1995). "Returnable containers: an example of reverse logistics", International Journal of Physical Distribution and Logistics Management 25 (2), 325-333.
- Lambert, A., Stoop, M., (2001), Processing of discarded household refrigerators: Lessons from the dutch example. Journal of Cleaner Production, 9 (3): 243-252.
- Langley, J. y Holcomb, M., (1992), *Creating logistics custumer value*. Journal of bussines Logistics, 13 (2): 417-442.
- Listes, O., (2007), A generic stochastic model for supply-and-return network desing. Computers & Operations Research, 34(2), 417-442.
- Listes, O., y Dekker, R., (2005), Astochastic approach to case study for product recovery network desing. Eurpean Journal of Operation Research, 160(1), 268-287.
- Louwers, D., Kip, B. J., Peters, E., Souren, F. y Flapper, S. D. P.. (1999). "A facility location allocation for reusing carpet materials". Computer & Industrial Engineering 36, 855-869.
- Lowers, D., (1999), A facility location allocation for reusing carpet materials. Computers & Industrial Engineering, 36, 855-869.
- Lu, Z., y Bostel, N., (2007), A facility location model for logistic systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. Computers & Operations Research, 34, 299-323.
- Marti, R., Laguna, M., Glover, F., (2006), *Principles of Scatter Search*, European Journal of Operations Research 169(2), 359-372.
- Martichenko, R., (2009), Lean Logistic-Understanding. Lean Corp. <http://www.ltdmgmt.com/mag/understanding-lean-logistic.html> wordl wide shipping, www.ltdmgmt.com
- Mejias Sacaluga, A., (2001) "Situación actual y perspectivas de las estrategias de colaboración logística en el sector alimentario. Análisis en el contexto Gallego". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Michalewicz, Z., (1996), Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutions Programs. Springer Journal.
- Michalewicz, Z., (2002), *A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods*. In Proceedings of the 4th Annual Conference on Evolutionary Programing. Cambrige, MA, 135-155.

Michalewicz, Z., Janikov, C., y Krawczyk, k., (1992), *A Modified Genetic Algorithm for Optimal Control Problems*. Computers & Mathematics with Applications, Vol. (23), No. 12, 88-94.

Michalewicz, Z., Vignaux, G. A., y Hobbs, M., (1991), *A Non-standard Genetic Algorithm for the Nonlinear Transportation Problem*. ORSA Journal Computing, Vol. (3), No. 4, 307-316.

Min, H., Juengko, H., y Seingko, C., (2006), A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics networks for product returns. *Omega*, 34(1), 56-69.

Mirchandani, P., (1990), *Discrete Location Theory*. Jhon-Wesley & Sons, Inc.

Moscato, P., (2000), *Memetics Algorithms*, In *Handbook of Applied Optimization*, P. M. Pardalos y M. G.C. Resende (eds.) Oxford University Press.

Motoki, T., (2002), Calculating the expected loss of diversity of selection schemes. *Evolutionary Computation*, 397-422.

Nation Online Project, <http://www.nationsonline.org>

Olcese, A.; Rodriguez, M. A.; Alfaro, J. (2008). *Manual de empresa responsable y sostenible*, MacGrawHill.

Ortega-Mier, M., (2008), (Disertación de tesis doctoral) Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

Ortega-Mier, M., y Garcia-Sánchez, A., (2005), Revisión bibliográfica del problema multiperiodo de localización de instalaciones con capacidades distintas. En IX Congreso de Ingeniería de Organización.

Ortega-Mier, M., y Garcia-Sánchez, A., (2007), Locating a treatment plant and the necessary transfer center in a reverse network using scatter search. En Proceedings of the 8th workshop of the EURO Working Group EU/ME, the European Chapter on Metaheuristics.

Ortega-Mier, M., y Garcia-Sánchez, A., y Ponce-Cueto, E., (2006), The multiple-period, multiple capacities facility location problema MPMCFLP. Background different approaches and chakkenges. En ECCO XIX-CO2006.

Parada, J. L. (2009). Incorporación de LI en la cadena de suministros y su eficiencia en la estructura organizativa de las empres. Tesis Doctoral Universitat de Barcelona, España, [Http://www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)

Pardalos, P. M., Resende, M. G. C., (eds.), (2000), *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press.

Perl, J., & Daskin, M. (1985). A Warehouse Location-Routing Problem. *Transportation Research*, 19B(5), 381-396

Pohlen, T. y Farris, I. (1992). Reverse Logistics in plastic recycling. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22 (7):35-47.

Pongcharoen, P., Hicks, C., Braiden, P. M., y Stewardson, D. J., (2002), *Determining optimum Genetic Algorithm parameters for scheduling the manufacturing and assembly of complex products*. *International Journal of Production Economics* 78, 311-322, Elsevier.

Porter, M. E. (1987). *Ventaja Competitiva: Creación y sostenimiento de un desempeño*. Ed Continental.

Porter, M. E. (1995a). "Green and Competitive: Ending the stalemate". Harvard Business Review, 73n (5):120-134.

Porter, M. E. (1995b). "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship", Journal of Economics Perspectives 9 (4), 97-118.

Prikul, H., & Jayaraman, V. (1996). Production, Transportation, and Distribution Planning in a Multi-Commodity Tri-Echelon System. T

Programa Lingo ver. 10.0

Puchinger, J., Raidl, G., (2005), Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization: A Survey Classification, Springer-Verlag Lecture Notes in Computer Science 3562, 41-53.

Rainer Storn and Kenneth Price. (1997), Differential evolution- a fast and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of global Optimization, (11): 341-359.

Ramalhino, H., Martin, O., Stutzle, T., (2002), *Iterated Local Search*, In *Handbook of Metaheuristics*, F. Glover y G. Kochenberger (eds.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, 321-353.

Realf, M. J., Ammons, J. C. y Newton, D. (1999). "Carpet recycling: The reverse production system design", Journal of Polymer-Plastic Technology and Engineering 38 (3), 547-567.

RevLog. (1998). RevLog, The european working group on reverse logistics. <http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/>, 1998, URL <http://www.fbk.nl/OZ/REVLOG/>.

Roger, D. y Tibben-Lembke, R. (1999). Going backwards: Reverse logistics, Trends and Practices, Logistics Executive Council.

Rogers, D.; Tibben-Lembke, R. (2001), *An examination of reverse Logistic practices*, Journal of Business Logistics, Vol. 22, n° 2, pp. 129-148.

Rubio, S. (2003). El Sistema de la Logística Inversa en la empresa: Análisis y aplicaciones. Ed. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones, <http://www.pcid.es/public.htm>

Sánchez, T., Durán, A. y Gutiérrez, G. (2001). Servicios logísticos orientados al comercio electrónico B2C: Situación actual y perspectivas". Universidad Carlos III de Madrid y Asociación de usuarios de internet.

Schaffer, J. D., Caruana, R. A., Eshelman, L. J., y Das Rajarshi, (1989), *A study of Control parameters affecting online performance of Genetic Algorithms for function optimization*. In J. David Schaffer (ed.), *Proceeding of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, San Mateo, Calif.: Morgan Kaufmann Publishers.

Schwefel, H-P., (1984), Evolution Strategies: A Family of Non-Linear Optimization Techniques Based on Imitation Some Principles of Organic Evolution. Annals of Operations Research, Vol. 1, 165-167.

Shetty, B., (1990), Approximate solutions to large scale capacitated facility location problems. Applied Mathematics and Computation, 39, 159-175.

Sheu, J., (2007) A coordinated reverse logistics system for regional management of multi-source hazardous waste. Computer & Operations Research, 34(5), 1442-1462.

Shih, L., (2001), Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. Resources conservation & recycling, 32(1), 55-72

Smith, K., (1999), Neural networks for Combinatorial Optimization: A Review of More Than a Decade of Research, *INFORMS Journal on Computing* 11, 15-34.

Smykay, E., Bowersox, D., y Mossman, F., (1961), "Distribution management: Logistics problems of the firm", New York, MacMillan.

Soto Zuluga, J. P. (2005). Reverse Logistics: Models and applications, Departament of Economics and Business, Graduate Program in Economics, Management and Finance, Universitat Pompeu Fabra, Tesis Doctoral.

Spengler, T. H., Püchert, T. P. y Rentz, O., (1997), Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 308-326.

SRIDHARAN R., The Capacitated Plant Location Problem, *European Journal of Operational Research* 87 (1995) pp- 203 – 205.

Stevens, G. (1989), *Integrating the supply chain*. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, 19 (8), 3-8.

Stock, J. (1988). Development and implementation of reverse logistics programs. Oak Brook, Illinois (CLM), 1988.

Stock, J. R., (1992), Reverse Logistic. Council of Logistic Management. Oak Brook, Illinois.

Stock, J. R., (1998), Development and implementation of reverse logistics programs. Council of Logistic Management. Oak Brook, Illinois.

Stock, J. R., (2001), "los siete pecados capitales de la logística inversa". Manuscrito. Foro internacional PILOT. Zaragoza 7 y 8 de mayo 2001.

Talbi, E-G., (2002), *A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics*, *Journal of Heuristics* 88(5), 541-564.

Thierry, M. C. (1997), "An analysis of the impact of product recovery management on manufacturing companies". PhD. Thesis. Erasmus University Rotterdam. The Netherlands.

Thierry, M. C., Salomon, M., Van Numen, J. A. E. E., y Van Vassenhove, L. (1995), "Strategic issues in product recovery management" *California Management Review* 37 (2), 114-135.

Van der Laan, E. A. y Salomon, M. (1997). "Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal". *European Journal of Operational Research* 1025, 264-278.

Van der Laan, E. A., Dekker, R., Salomon, M. y Ridder, A. (1996). "An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal". *International Journal of Production Economics* 46-47, 339-350.

Van der Laan, E. A., Salomon, M. y Dekker, R. (1999). "An investigation of lead time effects in manufacturing/remanufacturing system under simple PUSH and PULL control strategies". *European Journal of Operational Research* 115, 195-214.

Vieira, D. A. G., Adriano, R. L. S., Vasconcelos, J. A., y Krähenbühl, L., (2004), *Treating Constraints as Objectives in Multiobjective Optimization Problems Using Niched Pareto Genetic Algorithm*. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No. 2, March 2004.

Vob, S., Martello, S., Osman, I. H., Roucairol, C., (1999), *Meta-Heuristics Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Voudouris, C., Tsang, E. P. K., (1998), *Guided Local Search*, European Journal of Operational Research 113(2), 80-110.

Watanabe, K., y Hashem, M. M. A., (2004), *Evolutionary Computations*. Studies in Fuzziness and Soft Computing, April 2004.

Wieczorek, W., y Czech, Z. J., (2002), *Selection Schemes in Evolutionary Algorithms*. Proceedings of the IIS'2002, Symposium on Intelligent Information Systems, 185-194.

Wojanowski, R., Verter, V., y Boyaci, T., (2007), Retail-collection network desing under deposit-refund. Computer & Operations Research, 34(2), 324-345.