

Análisis de cadena de suministro de ciclo cerrado mediante algoritmos genéticos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magíster en Gerencia de Operaciones
(modalidad de investigación)

Helga Johana Hernández Hernández

Director:
Jairo R. Montoya T.

Presentado públicamente el día 27 del mes de Abril de 2012

Jurado:

Carlos Leonardo Quintero Araujo, Universidad de La Sabana

Carlos Vega, Pontificia Universidad Javeriana

Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2012

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento:

Al profesor JAIRO RAFAEL MONTOYA TORRES (Ph.D), Director del proyecto, por su voto de confianza, su guía y apoyo académico incondicional, por la paciencia constante y ante todo por sus lecciones entusiastas y su ejemplo de perseverancia y trabajo duro.

Al ingeniero y amigo FABRICIO NIEBLES ATENCIO (candidato a MSc) por su valiosa ayuda y aporte en la programación del algoritmo del presente proyecto de grado.

A los docentes de la Maestría en Gerencia de Operaciones y de la Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas (EICEA), que aportaron con su gran conocimiento a la realización del presente trabajo de investigación.

De igual manera expreso mis agradecimientos a mis compañeros de estudio de la Maestría en Gerencia de Operaciones por su soporte y constante transmisión de conocimientos y a aquellos amigos de la Universidad de La Sabana que aportaron de una u otra manera al proyecto.

Por último, agradezco infinitamente la beca concedida por la Universidad de La Sabana para cursar la maestría y así lograr la presentación final de mi proyecto de grado en los tiempos estipulados.

Resumen: La gestión de la cadena de suministro verde surge como un enfoque importante para las empresas, que implica la aplicación de los principios de gestión ambiental para la cadena de suministro y que muestra una nueva forma de abordar el reto de la sostenibilidad. Haciendo parte de este enfoque, la logística verde busca la mejor manera de producir y distribuir productos de una manera sostenible. La logística de reversa o inversa es considerada como uno de los aspectos clave de la gestión de la logística verde. En este contexto, se plantea resolver la pregunta de investigación: ¿De qué forma se puede cuantificar el impacto de la dimensión ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministro? En este punto, se observa la necesidad de estudiar la logística inversa a través de las cadenas de suministro, como también, los sistemas de ciclo cerrado. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es cuantificar el impacto ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministros por medio del análisis de modelos matemáticos y de algoritmos genéticos, con el fin de comprender la importancia de la dimensión ambiental en el proceso de toma de decisiones logísticas. Se tomó un caso de estudio propuesto por Kannan et al. (2009) de una empresa manufacturera de neumáticos ubicada en el sur de La India. La compañía tiene por objetivo minimizar el costo total y planea reciclar los neumáticos recolectados para poder usarlos como materia prima en vez de comprar nuevo material del proveedor. Se consideran aspectos ambientales en el diseño y gestión de la cadena de suministro por medio del análisis de un modelo matemático para una cadena de suministro inversa de distribución multi-eslabón e inventario, con el fin de minimizar el costo total mediante el uso de algoritmos genéticos. En donde, solo la operación de reciclaje es considerada en la logística inversa.

Las probabilidades de cruzamiento evaluadas son tres: 0,7, 0,8 y 0,9 con tres probabilidades de mutación: 0,05, 0,1 y 0,2 para tres diferentes valores de generaciones: 50, 100 y 125.

Según el análisis de varianza ANOVA, el factor probabilidad de cruzamiento: P_c produce un efecto, mientras que los factores número de generaciones N_{gen} y probabilidad de mutación: P_m no producen efecto sobre la variable de respuesta, por sí solos. Mediante los contrastes de Bonferroni se demuestran interacciones estadísticamente significativas entre los factores: 1) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de cruzamiento: P_c y 2) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de mutación: P_m .

Palabras clave: cadena de suministro sostenible, logística de reversa, logística verde, cadena de suministro de ciclo cerrado, Algoritmo genético (AG).

Abstract: Green Supply Chain Management (GrSCM) emerged as an important approach for enterprises involving the application of environmental management principles to the supply chain and showing as a new way to address the sustainability challenge. Being part of this approach, green logistics looks for the best way to produce and distribute goods in a sustainable way and hence Reverse Logistics (RL) is considered as one of the key aspects of green logistics management. In this context, it is very important to answer the question ¿How the impact of the environmental dimension can be quantified in the design and management of the supply chain?. For this reason, it is necessary to study reverse logistics across supply chains, as well as, closed loop systems. Therefore, the goal of this document is to quantify the environmental impact in the design and management of the supply chain through the analysis of mathematical models and genetic algorithms, in order to understand the importance of the environmental dimension in the logistical decision-making process. This document is based in Kannan et al.(2009) case study of a famous tyre manufacturer for the two-wheelers and four-wheelers located in the southern part of India. The company planned to minimise the total cost and they also planned to recycle the collected returned tyres and thereby used as a raw material instead of purchasing new material from the supplier to achieve the minimum total cost. Environmental aspects are considered in the design and management of a supply chain by the analysis of a reverse logistics multi-echelon distribution inventory model using a genetic algorithm. Only recycling operation is considered in reverse logistics.

Crossover probabilities are: $P_c=0,7, 0,8$ y $0,9$ with mutation probabilities $P_m=0,05, 0,1$ y $0,2$ for three different number of generations, $N_{gen}=50, 100$ y 125 .

The multi-factor analysis of variance shows that the Crossover probability factor affects the model, while the number of generations and the mutation probability don't affect the study variable, each one is considered as main effect. By the interactions plots and the Bonferroni's test, the main interactions are: 1) number of generations and the crossover probability and 2) number of generations and the mutation probability.

Keywords: sustainable supply chain, reverse logistics, green logistics, closed-loop supply chain, Genetic Algorithm (GA).

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	4
Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	7
Capítulo 1. Introducción.....	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.1.1 Contexto	8
1.1.2 Objetivo general	9
1.1.3 Objetivos específicos.....	9
1.1.4 Justificación.....	9
1.2 Metodología de investigación	9
1.2.1 Tipo de investigación	9
1.2.2 Planteamiento Metodológico.....	9
1.3 Organización del documento.....	11
Capítulo 2. Revisión de la literatura.....	12
2.1 Desde cadena de suministro hasta logística verde: Visión general	12
2.1.1 Logística verde y logística de reversa	13
2.1.2 Consideraciones de ciclo cerrado y temas de investigación.....	14
2.2 Algoritmos genéticos como método de solución	18
2.3 Conclusiones del capítulo.....	21
Capítulo 3. Problema de cadena de suministro de ciclo cerrado mediante algoritmos genéticos	24
3.1 Descripción del problema.....	24
3.2 Formulación de modelo.....	24
3.2.1 Suposiciones.....	24
3.2.2 Notación	24
3.2.3 Modelo de Cadena de suministro de ciclo cerrado de distribución multi-eslabón e inventario.....	26
3.3 Algoritmo propuesto	32
3.3.1 Definición del cromosoma: Representación de la solución	34
3.3.2 Generación de la población inicial	35
3.3.3 Operador de cruce	36

3.3.4 Operador de mutación	40
3.3.5 Pasos del algoritmo	41
3.4 Conclusiones del capítulo.....	43
Capítulo 4. Diseño y análisis experimental.....	45
4.1 Prueba Piloto	45
4.1.1 Normalidad.....	46
4.1.2 Correlación en el tiempo	47
4.1.3 Homogeneidad de varianzas.....	48
4.2 Tamaño de muestra	50
4.3 Análisis de resultados teniendo en cuenta el tamaño de muestra.....	50
4.3.1 Comprobación de supuestos del diseño experimental.....	51
4.3.2 Interacciones entre factores	53
4.3.3 Medias de cada factor.....	55
4.3.4 Contrastes de Bonferroni.....	56
4.4 Comportamiento del algoritmo	60
4.5 Porcentaje de variación de resultados	62
4.6 Conclusiones del capítulo.....	63
Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas.....	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Perspectivas de investigación.....	66
Referencias.....	67
Anexo 1. Parámetros de entrada del algoritmo	70
Anexo 2. Datos Prueba Piloto	72
Anexo 3. Datos del Diseño de experimentos con tamaño de muestra completo.....	75

Lista de Figuras

Figura 1. Economía Lineal . Adaptado de: Dyckhof et al.(2004).	15
Figura 2. Economía de ciclo cerrado. Adaptado de: Dyckhof et al.,(2004).	16
Figura 3. Poblaciones iniciales aleatorias por cada variable	32
Figura 4. Presentación de la función objetivo	33
Figura 5. Nueva población mediante operador de cruzamiento por cada variable	34
Figura 6. Estructura de los individuos.....	35
Figura 7. Representación del Cromosoma en VB	35
Figura 8. Cromosoma desplegado en VB.	35
Figura 9. Población inicial	36
Figura 10. Cromosomas Padre. Fuente: El autor	37
Figura 11. Primer paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	37
Figura 12. Segundo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	37
Figura 13. Tercer paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	38
Figura 14. Cuarto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	38
Figura 15. Quinto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	38
Figura 16. Sexto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	39
Figura 17. Séptimo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	39
Figura 18. Octavo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor	39
Figura 19. Cromosomas hijo	40
Figura 20. Cromosomas antes de la mutación. Fuente: El autor	40
Figura 21. Cromosomas después de la mutación. Fuente: El autor	40
Figura 22. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto. Fuente: el autor	41
Figura 23. Interacciones entre Ngen * Pc	57
Figura 24. Interacciones entre Ngen y Pm	58
Figura 25. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para Pc= 0,7.....	60
Figura 26. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para Pc= 0,8.....	61
Figura 27. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para Pc= 0,9.....	61

Lista de Tablas

Tabla 1. Factores y niveles para el diseño factorial 3^3	45
Tabla 2. Prueba de normalidad de residuos estandarizados	47
Tabla 3. Prueba de correlación en el tiempo	48
Tabla 4. Prueba de homogeneidad de varianzas	48
Tabla 5. Número de observaciones para cada factor.....	49
Tabla 6. ANOVA Prueba Piloto.....	49
Tabla 7. Distribución tamaño de muestra Ngen*Pc.....	51
Tabla 8. Prueba de normalidad de residuos estandarizados para el diseño experimental	51
Tabla 9. Prueba de correlación en el tiempo para el diseño experimental	52
Tabla 10. Prueba de homogeneidad de varianzas para el diseño experimental	53
Tabla 11. ANOVA para el diseño experimental completo.	54
Tabla 12. Medias de costo mínimo para Ngen.....	55
Tabla 13. Medias de costo mínimo para Pc	55
Tabla 14. Medias de costo mínimo para Pm.....	56
Tabla 15. ANOVA teniendo en cuenta solo interacciones Ngen*Pc y Ngen *PM.....	56
Tabla 16. Medias para la interacción Ngen*Pc.....	57
Tabla 17. Resultados Contraste Bonferroni para la interacción Ngen*Pc	58
Tabla 18. Medias para la interacción Ngen*Pm	59
Tabla 19. Resultados Contraste Bonferroni para la interacción Ngen*Pm.....	59
Tabla 20. Porcentaje de variación de los resultados.....	62
Tabla 21. Capacidad de procesamiento (min).....	70
Tabla 22. Tiempode procesamiento/unid (min)	70
Tabla 23. Capacidad de almacenamiento unidades/periodo	70
Tabla 24. Demanda del minorista unidades/periodo/producto.....	70
Tabla 25. Cantidades devueltas de producto al centro de recolección.....	70
Tabla 26. Costos de procesamiento por producto/ unidad	71
Tabla 27. Costos de transporte (rupias).....	71
Tabla 28. Costos de recolección, compra y transporte desde CR a cada planta (rupias).....	71
Tabla 29. Costos de mantener inventarios en rupias.....	71
Tabla 30. Resultados Prueba Piloto	72
Tabla 31. Resultados del diseño experimental con tamaño de muestra completo	75

Capítulo 1. Introducción

1. 1 Planteamiento del problema

1.1.1 Contexto

La gestión de la cadena de suministro verde surge como un enfoque importante para las empresas con el fin de mejorar el desempeño de las dimensiones económica y ambiental (Zhu y Sarkis, 2004). Se define como la integración de las consideraciones medioambientales en la gestión de la cadena de suministro, teniendo en cuenta: diseño del producto, selección de proveedores y abastecimiento de materiales, procesos de fabricación, empaque del producto, entrega del producto a los consumidores y la gestión al final del ciclo de vida del producto después de su uso (Srivastava, 2007). Como resultado, la gestión de la cadena de suministro verde puede reducir los residuos, minimizar la contaminación, ahorrar energía, conservar los recursos naturales y reducir las emisiones de carbono (Bloemhof-Ruwaard et al, 1995).

Este enfoque de cadena de suministro verde ha conducido a un creciente interés en la logística de reversa, ya que se han empezado a ver los efectos de la actividad humana y de las prácticas logísticas actuales que no pueden ser sostenibles a largo plazo (Sbihi y Eglese, 2007). La logística de reversa se define según el Consejo Ejecutivo de Logística Inversa (RLEC) (Rogers, D. y Tibben Lembke, 2007) como el proceso de planeación, ejecución, y control del flujo eficiente y rentable de las materias primas, del inventario en proceso, de productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o la correcta disposición. Actualmente, los consumidores esperan que los productores manejen un apropiado sistema de logística de reversa y que los productos que sean retornados a la cadena sean procesados y recuperados de una manera responsable con el medio ambiente (Kannan et al., 2009).

Un buen programa de logística de reversa puede ocasionar importantes ahorros en los costos de contratación, disposición, mantenimiento de inventario y transporte (Kannan et al., 2009). La empresa que establezca una cadena de suministro inversa, ya sea por elección o necesidad, se enfrentará a muchos desafíos. Tendrá que formar a los clientes y establecer nuevos puntos para contactarlos, decidir qué actividades debe subcontratar y cuáles debe realizar, cumplir con normas medioambientales rigurosas y en general, resolver cómo mantener los costos al mínimo mientras descubre maneras innovadoras de recuperar valor (Wu y Pagell, 2010). Muchas organizaciones inicialmente se resisten al cambio, pero algunas compañías han empezado a transformar sus cadenas de suministro en esfuerzos para ser más sostenibles (Wu y Pagell, 2010).

Se podría decir que hay muchos puntos de vista en cuanto a la dificultad de esta transformación. Varios investigadores sugieren que muchas organizaciones pueden lograr al mismo tiempo los objetivos del negocio y reducir sus impactos ambientales (Russo y Fouts, 1997; Christmann, 2000; Melnyk et al., 2003). Sin embargo, mientras que la reducción de los residuos y la contaminación están alineados con los objetivos tradicionales de la gestión de operaciones, no todas las prácticas ambientales reportarán un ahorro de costos, especialmente en el corto plazo (Wu y Pagell, 2010).

Hoy en día, el reto consiste en manejar un negocio viable sin comprometer el medio ambiente en el futuro. En este contexto se plantea resolver la pregunta de investigación: ¿De qué forma se puede cuantificar el impacto de la dimensión ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministro?

1.1.2 Objetivo general

Cuantificar el impacto ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministros por medio del análisis de un modelo matemático y de algoritmos genéticos, con el fin de comprender la importancia de la dimensión ambiental en el proceso de toma de decisiones logísticas.

1.1.3 Objetivos específicos

1. Caracterizar una cadena de suministro que contemple aspectos ambientales a través de un modelo matemático con el fin de formalizar las relaciones entre los actores de dicha cadena.
2. Proponer un algoritmo genético para cuantificar el impacto de la inclusión de aspectos ambientales en la cadena de suministro.
3. Validar el algoritmo genético propuesto mediante un estudio experimental del modelo de la cadena bajo estudio para analizar su desempeño.

1.1.4 Justificación

La conciencia medioambiental es fundamental en el diseño y operación de redes integradas de la cadena de suministro a nivel mundial (Sundarakani, 2010). La necesidad de proteger el medio ambiente y la creciente demanda de recursos naturales están obligando a las empresas a reconsiderar sus modelos de negocio y reestructurar sus operaciones de cadena de suministro (Wu y Pagell, 2010). La sostenibilidad en los negocios hace referencia a que se deben proteger los recursos naturales y el medio ambiente y al mismo tiempo servir al bien común de la sociedad. Por tal motivo, hoy en día, académicos y empresas interesados en la incorporación de aspectos ambientales en sus sistemas han comenzado a crear cadenas de suministro más sostenibles.

Cada identidad de la cadena de suministro que incluye proveedores, fabricantes, distribuidores y clientes se asocia con los productos, procesos y actividades de transporte que afectan el medio ambiente. La necesidad de marcos integrados que combinen los aspectos económicos y ambientales es evidente para las cadenas de suministro sostenibles. A raíz de esta necesidad, se requiere la cuantificación de la sostenibilidad o el impacto ambiental en el diseño y gestión de cadenas de suministro y el uso de estas medidas en los modelos de optimización (Papageorgiou, 2009).

1.2 Metodología de investigación

1.2.1 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo básica y a la vez tecnológica. Según Pacheco y Cruz (2006) para el primer tipo se quiere dar solución a un problema de la realidad a través de métodos normales, en este caso: Determinar la manera de cuantificar el impacto ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministros por medio del análisis de modelos matemáticos. Para el tipo de investigación tecnológica, se realiza el diseño de una herramienta, para el presente caso: el código del algoritmo genético, para resolver el problema por este método de solución, con el fin de comprender la importancia de la dimensión ambiental en el proceso de toma de decisiones logísticas.

1.2.2 Planteamiento Metodológico

Se realiza un estudio profundo de la literatura basado en el objetivo general de estudio: Determinar la forma de cuantificar el impacto ambiental en el diseño y gestión de la cadena de suministros por medio del análisis de modelos matemáticos y de algoritmos genéticos, con el fin de

comprender la importancia de la dimensión ambiental en el proceso de toma de decisiones logísticas. A partir de este estudio se construye la revisión de la literatura y el marco teórico, de esta forma se le da soporte a la formulación de la hipótesis, sustento científico al método de aproximación seleccionado: algoritmos genéticos, y se puede llevar a cabo la planeación de la experimentación para la verificación de la hipótesis y la validación del algoritmo.

Con base en la revisión de la literatura, se toma como punto de partida para el presente proyecto, un estudio de caso específico. A partir del trabajo de Kannan et al. (2009) sobre el análisis de cadenas de suministro de ciclo cerrado usando algoritmos genéticos y optimización de enjambre de partículas, se estudia el caso de una empresa manufacturera de neumáticos ubicada en el sur de La India. La compañía tiene por objetivo minimizar el costo total y mejorar la calidad del producto. Al mismo tiempo, planea reciclar los neumáticos recolectados para poder usarlos como materia prima en vez de comprar nuevo material del proveedor con el fin de lograr el mínimo costo total. Cabe aclarar que el sistema productivo de cadena logística de ciclo cerrado es inspirado en el artículo de Kannan et al. (2009), sin embargo se realizaron modificaciones para hacer más completo el modelo.

Para modelar la cadena de suministro de ciclo cerrado del estudio de caso anteriormente mencionado, se emplean técnicas clásicas de Investigación de Operaciones y técnicas conceptuales, mediante el planteamiento de un modelo matemático de ciclo cerrado que considere todos los parámetros de entrada, ver Anexo 1; variables de decisión, restricciones del problema y la función objetivo a alcanzar.

El modelo matemático propuesto por Haq and Kannan (2006) se utiliza para minimizar los costos totales de la cadena de suministro hacia adelante. Los costos totales incluyen los costos de ordenar, costos de procesamiento, costos de transporte desde la planta a los centros de distribución y desde los centros de distribución a los minoristas, los costos de mantener el inventario en todas las plantas, en los centros de distribución y en los minoristas.

Además, Kannan et al. (2009) propone otro modelo matemático que es usado en este proyecto para minimizar los costos totales de una cadena de suministro de ciclo cerrado. Los costos totales incluyen los costos de recolección de productos retornados, costos de transporte desde el centro de recolección a la planta, costos de procesamiento, costos de transporte desde la planta a los centros de distribución y desde los centros de distribución a los minoristas, los costos de mantener el inventario en todas las plantas, en los centros de distribución y en los minoristas.

El Método de aproximación seleccionado para dar solución al problema es el de Algoritmos Genéticos (AG), ya que las numerosas variables y restricciones convierten al problema de cadena de suministro en un modelo NP-duro y por otro lado, las técnicas tradicionales de optimización y búsqueda se inclinan por obtener una solución óptima local (Kannan et al., 2009).

Se realiza el diseño del algoritmo genético a mano y se programa con la herramienta de programación Visual Basic®, donde se deben tener en cuenta los parámetros de entrada, el modelo matemático planteado, la definición del cromosoma, la generación de la población inicial y definición de su tamaño, el cálculo de la función objetivo, el operador de selección, el operador de cruzamiento, el operador de mutación y por último, el número de generaciones a estudiar.

Posteriormente se procede a efectuar la aplicación o validación del algoritmo diseñado y programado en Visual Basic, haciendo un análisis del funcionamiento del algoritmo mediante pruebas de escritorio revisando los resultados, con el fin de verificar el modelo. Es importante

aclarar que los datos para validación del modelo se obtienen del mismo estudio de caso realizado por Kannan et al. (2009) a la empresa manufacturera de llantas en la parte sur de La India.

Finalmente, se plantea un diseño de experimentos factorial para verificar el efecto de ciertos factores, sus niveles y las combinaciones entre estos sobre la variable de respuesta. En este caso, la variable de respuesta es el costo total y la función objetivo del modelo es minimizar éste costo total. La meta es evaluar cómo se comporta la variable de respuesta en diferentes situaciones, por ejemplo, con la variación de: número de generaciones, probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación.

Como se hicieron cambios al modelo matemático inicialmente propuesto por Kannan et al. (2009), se obtienen resultados diferentes en este trabajo y por lo tanto se decide realizar el análisis, la discusión y la comparación de los resultados del algoritmo propuesto en los diferentes escenarios evaluados en el diseño experimental para así poder realizar el reporte final del proyecto.

1.3 Organización del documento

El presente documento de trabajo de grado está organizado de la siguiente forma. El capítulo 2 contiene la revisión de literatura que pretende presentar el camino hacia el concepto de cadena de suministro de ciclo cerrado y una visión general de la metaheurística propuesta para dar una solución al problema. En el capítulo 3 se presenta el modelo de cadena de suministro de ciclo cerrado de distribución multi-eslabón e inventario y describe en detalle cómo se plantea el algoritmo genético realizado. El capítulo 4 plasma los resultados del diseño y el análisis del experimento y también muestra el resultado del comportamiento del algoritmo, y por último, el capítulo 5 presenta las conclusiones generales y perspectivas de investigación del proyecto.

Capítulo 2. Revisión de la literatura*

La presente revisión de la literatura pretende dar una visión general de los conceptos relacionados con cadenas de suministro de ciclo cerrado y de la metaheurística propuesta para dar una solución a este problema. Por lo cual, esta sección se organiza de la siguiente forma: Primero, se aclaran conceptos importantes para entender el problema y su importancia, se inicia con el término cadena de suministro, pasando por la gestión de la cadena de suministro sostenible hasta logística verde. En segundo lugar se presentan los conceptos de la logística verde y su relación con la logística de reversa. Posteriormente, se plasman las consideraciones de cadenas de suministro de ciclo cerrado y temas de investigación. Por último, se da una visión general del método de solución al problema, en este caso, la metaheurística de algoritmos genéticos.

2.1 Desde cadena de suministro hasta logística verde: Visión general

La gestión de la cadena de suministro fue introducida como concepto en la década de 1980, pero recibió más atención desde 1990 en adelante (Oliver y Webber, 1982). Hoy en día, las cadenas de suministro son el fundamento de toda organización que quiere actuar en la actual y competitiva economía global. Usualmente, las cadenas de suministro han sido vistas como estructuras operativas responsables de la producción y distribución de productos a los diferentes mercados dispersos en todo el mundo, cuyo principal objetivo era la satisfacción de los clientes a un costo mínimo. Este paradigma está cambiando y los avances en la competencia mundial con un agotamiento paralelo de los recursos naturales y una mayor preocupación de la sociedad hacia el medio ambiente, crean una nueva forma de pensar en la gestión de cadenas de suministro (Barbosa-Póvoa, 2009).

En la última década, el tipo de temas que han salido a la luz y han llamado la atención de los gerentes se ha extendido extraordinariamente. En lugar de considerar sólo los criterios básicos, tales como costos, calidad y entrega, los gerentes de la cadena de suministro deben manejar una compleja gama de componentes que cubren el producto y el proceso, hacia arriba y hacia abajo de la cadena de suministro (Dyckhoff et al., 2004). El desarrollo sostenible es conocido como un componente muy importante de creciente interés para los gerentes que tienen que dirigir las cuestiones sociales y ambientales relacionadas con la propia empresa, así como las relacionadas con los socios de la cadena de suministro, sólo para seguir siendo competitivos en mercados cada vez más conscientes.

El escrutinio público se ha incrementado, ya que los consumidores se han vuelto más expertos del hecho de que no es sólo el producto final, sino también la cadena de suministro que necesitan mayor observación y monitoreo. Por lo tanto, la gestión de la cadena de suministro sostenible se puede definir como la gestión de los flujos de materiales e información, así como, la cooperación entre empresas a lo largo de la cadena de suministro, teniendo en cuenta los objetivos de las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económica, ambiental y social, y al mismo tiempo, las necesidades de las partes interesadas (Seuring, 2008).

* Este capítulo está basado en el trabajo publicado por los autores: H.J. Hernández-Hernández, J.R. Montoya-Torres. "From sustainable supply chains to closed-loop systems: A critical overview of scientific literature". Proceeding of the Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development, August 3-5, 2011, Medellín, Colombia. CD-ROM. ISBN: 0-9822896-4-2.

Por tal motivo, las empresas se han preocupado más y más por las "operaciones verdes" y las han identificado como una cuestión estratégica (Halabi et al., 2011). La logística verde forma parte de la gestión de la cadena de suministro verde (GrSCM) y se refiere a la producción y distribución de bienes de una manera sostenible, teniendo en cuenta los factores ambientales y sociales (Sbihi y Eglese, 2007). En consecuencia, los objetivos de la logística verde están asociados con el impacto económico de las políticas de logística dentro de la organización y con los enormes efectos en la sociedad, como lo es la contaminación al medio ambiente.

2.1.1 Logística verde y logística de reversa

Las actividades de logística verde incluyen la medición del impacto ambiental de diferentes estrategias de distribución, reducción del uso de energía en actividades logísticas, reducción de los residuos y la gestión de su tratamiento (Halabi et al., 2011). Para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente, la logística de reversa es considerada como uno de los aspectos clave en la gestión de la logística verde. Como lo declaró Pirachican et al. (2009), la práctica de la logística de reversa permite la recuperación de bienes al final de su ciclo de vida en una forma eficiente y también se utiliza para recuperar los bienes que ya no son útiles para el consumidor.

Dowlatshahi (2000) explica la logística de reversa como "un proceso en el que un fabricante de forma sistemática acepta productos previamente enviados o partes desde el punto de consumo hasta el posible reciclaje, reelaboración, o disposición final". De acuerdo con el Consejo Ejecutivo de Logística de Reversa (RLEC) (Rogers, D. y Tibben-Lembke, 2007), la logística de reversa se define como "el proceso de planeación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de las materias primas, en el inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o la correcta disposición". Kannan et al., (2009) lo reporta como el término más frecuentemente utilizado para referirse al papel de la logística en la devolución de productos, reducción en la fuente, el reciclaje, la sustitución de materiales, reutilización de materiales, disposición de residuos, y la renovación, reparación y remanufactura.

Como un enfoque para la devolución de productos se tiene la creación de redes de recuperación de productos que implica: la recolección de los productos utilizados desde el cliente a la cadena de suministro, el reprocesamiento y la futura redistribución al mercado (Beamon y Fernandes, 2004). Como lo señaló Fleischmann(2001) las redes de recuperación abarcan una selección de las etapas de la cadena de suministro donde la responsabilidad de la recuperación se inicia con la recogida de los productos utilizados y termina con la distribución de los productos recuperados. Esta distribución inversa se puede definir como la recolección y transporte de los productos utilizados y paquetes. Según Beamon y Fernandes (2004), la distribución inversa puede llevarse a cabo a través del canal original (hacia adelante), a través de un canal de retorno por separado, o mediante la combinación del canal original (hacia adelante) y el canal de retorno.

La gestión de los flujos de retorno inducido por las diversas formas de reutilización de productos y materiales en los procesos de producción industrial ha recibido una creciente atención a lo largo de esta década. Como declaró Beamon y Fernandes (2004), las devoluciones de productos son el aspecto más común de la logística inversa. Una de las principales razones de esto es el cambio masivo de la oportunidad de ingresos que ahora sigue a cada venta de productos. Esto hace que algunas empresas seriamente consideren un enfoque de "circuito cerrado" para la cadena de suministro que incluye: devoluciones de productos, devoluciones de contratos de servicios, la baja

de productos, equipos usados y piezas de repuesto para la restauración, así como la reutilización o venta como materia prima.

Las cadenas de suministro de ciclo cerrado, que contienen remanufactura y logística inversa, podrían ser un medio importante que permita a los negocios satisfacer la creciente demanda de responsabilidad social corporativa y cumplir con objetivos sociales más amplios para reducir el uso intensivo de los recursos de la vida económica contemporánea (Desai y Riddlestone, 2002). Wells y Seitz (2005) consideran que los circuitos cerrados ofrecen oportunidades para lograr la denominada "triple línea de base" que corresponde a los beneficios sociales, económicos y ambientales.

Por lo tanto, es importante conocer que en términos generales, los ciclos cerrados están conformados por dos cadenas de suministro: una cadena hacia adelante (directa) y una cadena inversa mediante el cual un producto recuperado vuelve a entrar a la cadena hacia adelante tradicional.

2.1.2 Consideraciones de ciclo cerrado y temas de investigación

Un gran número de publicaciones han aparecido en este tema, particularmente en problemas de optimización de cadenas de suministro hacia adelante y en logística de reversa. A continuación, se resumen algunas de estas contribuciones que son importantes para el desarrollo de este proyecto.

Usualmente en una cadena de suministro hacia adelante, el consumidor es el fin del proceso. Sin embargo, una cadena de ciclo cerrado incluye el proceso de devoluciones, y el productor tiene el objetivo de captar el valor agregado y una mayor integración de todas las actividades de la cadena de suministro. De acuerdo con Guide y Harrison (2003a), las cadenas de suministro de ciclo cerrado incluyen actividades de la cadena de suministro tradicional hacia adelante y las actividades adicionales de la cadena de suministro inversa. Estas actividades adicionales incluyen:

- Adquisición de productos para obtener los productos de los consumidores finales.
- La logística inversa para mover los productos desde los puntos de uso a los puntos de disposición.
- Control, clasificación y disposición para determinar la condición del producto y la opción de re-uso, económicamente más atractiva.
- Rehabilitación para permitir la opción más atractiva económicamente: la reutilización directa, reparación, reconstrucción, reciclaje o disposición.
- Remarketing para crear y explotar los mercados de bienes restaurados y su distribución.

Como lo ha señalado Fleischmann et al. (2000), el creciente interés por la reutilización de productos y materiales es una de las consecuencias de la creciente preocupación ambiental a través de las últimas décadas. La reducción de desechos se ha convertido en una preocupación primordial en los países industrializados. Debido al agotamiento de vertederos y capacidades de incineración, se realizan esfuerzos para reintegrar a los productos utilizados en los procesos de producción industrial para su posterior utilización. Varios países han hecho cumplir la legislación medioambiental cargando a los productores con la responsabilidad del ciclo de vida completo de sus productos (Thierry, 1997). Como por ejemplo, las obligaciones de devolución de un número de categorías de productos como electrónica, material de embalaje y carros, son algunas de las medidas adoptadas (Fleischmann et al., 2000).

Schulmann et al. (2004) presenta al reciclaje de vehículos al final de su vida útil, como un ejemplo en la integración del material de productos gastados en las cadenas de suministro. Diferentes opciones de diseño para la cadena de suministro inversa son analizadas por la

combinación de la planeación en la ubicación de las instalaciones, junto con, el enrutamiento de vehículos en un enfoque integrado.

En este artículo, Schultmann et al. (2004) declaró que en el fondo, el marco de la gestión de la cadena de suministro (SCM) puede ser caracterizado por el término economía lineal (ver figura 1).

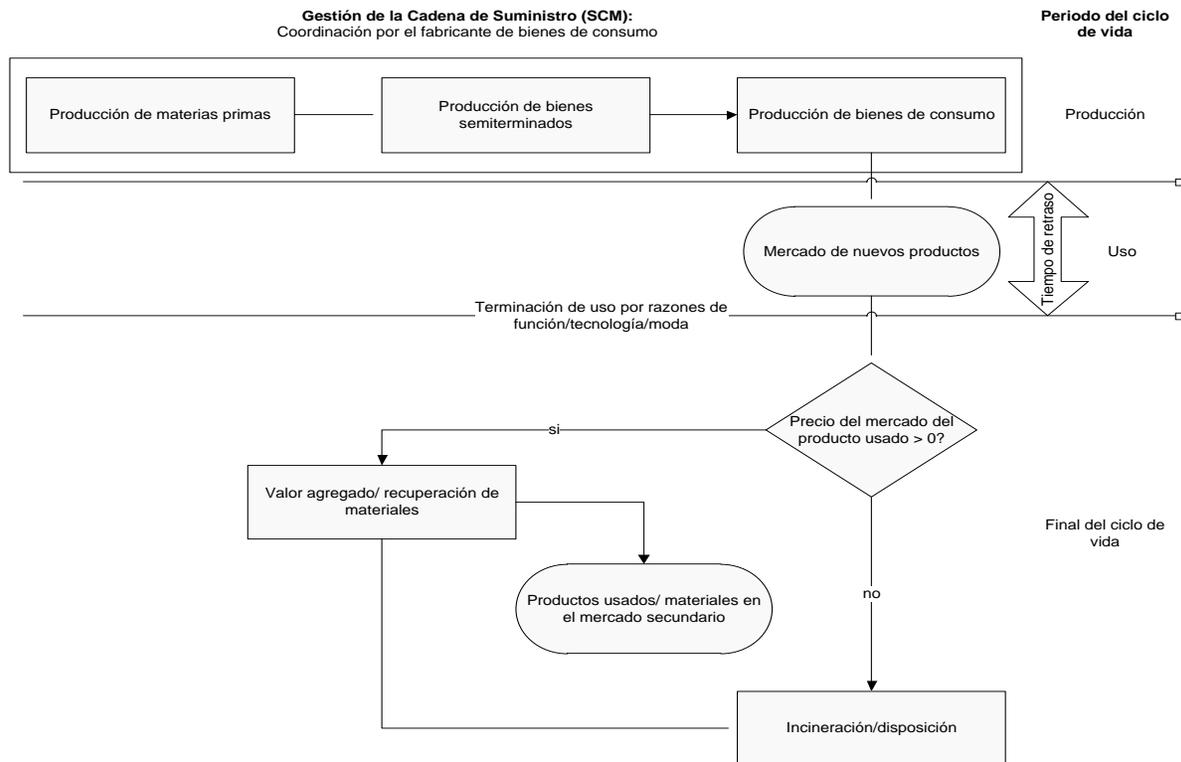


Figura 1. Economía Lineal . Adaptado de: Dyckhof et al.(2004).

El énfasis se realiza en la utilización de los recursos naturales para la producción de bienes, mientras que las opciones al final del ciclo de vida son principalmente la incineración o disposición. Sin obligaciones de recuperación de productos usados, el productor usualmente coordina la cadena de proceso más allá del punto de venta. Hoy en día, con nuevas políticas legales emergentes, cada vez más productores han tenido que aplicar las obligaciones de recuperación. Como resultado, este efecto repercute en un cambio en el marco de SCM, que puede ser caracterizado entonces como la economía de ciclo cerrado, este cambio implica dos adaptaciones importantes:

- En lugar de las opciones de disposición de una sola etapa para el final del ciclo vida útil o la etapa final en los vertederos, se presenta una multi-etapa, se aumenta el reprocesamiento de técnicas que son necesarias para la transferencia de componentes de productos gastados en materiales secundarios que cumpla con los requisitos de calidad para su reutilización en aplicaciones técnicas. Por lo tanto, una cadena de suministro adicional en la dirección inversa o una cadena de suministro inversa, como se define antes, es necesaria (ver figura 2).
- Cuando este material secundario está integrado en el proceso de producción real, frente a tareas como el procesamiento de materiales de recuperación y de segunda (ver figura 2), con el fin de evitar su baja, los efectos de retroalimentación de la cadena de suministro con respecto a las adaptaciones en tiempo y cantidad se llevan a cabo. Además de establecer la cadena de suministro inversa, la coordinación de ambas cadenas se hace necesario.

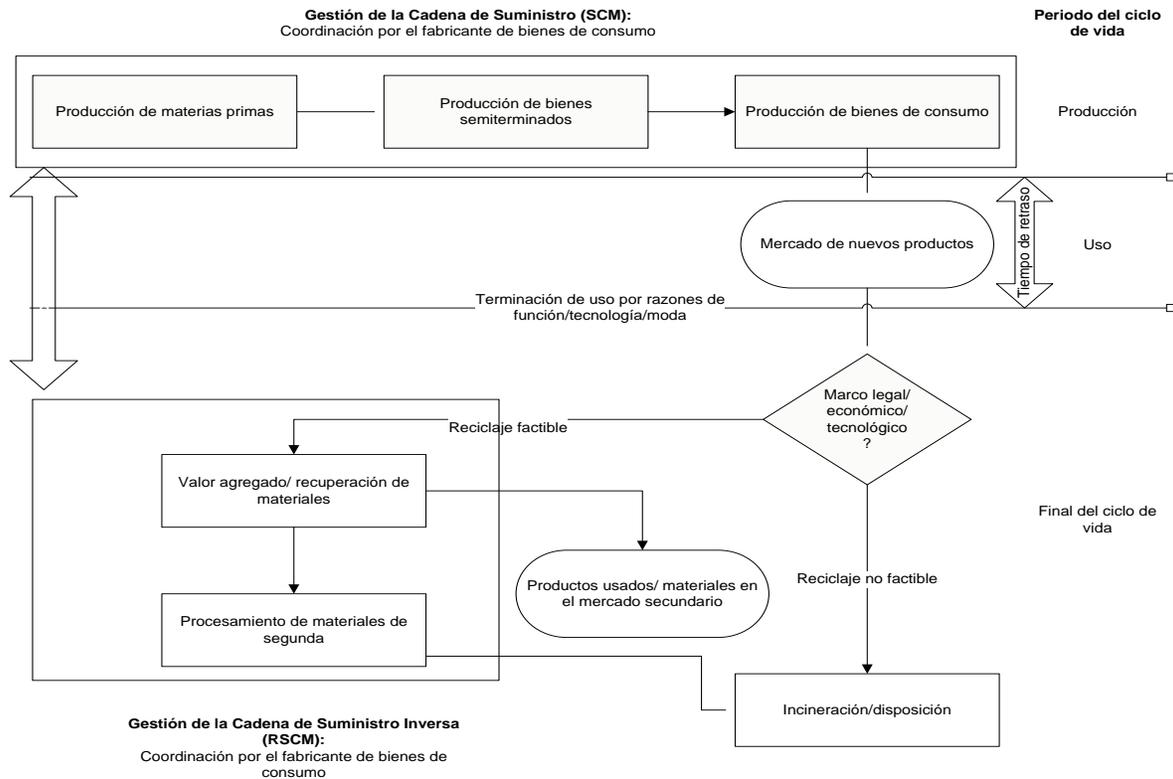


Figura 2. Economía de ciclo cerrado. Adaptado de: Dyckhof et al.,(2004).

Teniendo en cuenta el intervalo de tiempo promedio entre la producción y la recuperación, la tendencia futura de desarrollo puede estar determinada por la cantidad. Según Schultmann et al. (2004), dentro de este marco, las variables de la planeación se determinan por la ubicación de las instalaciones, la capacidad y las opciones de extensión a mediano plazo para los sitios donde el reprocesamiento se llevará a cabo. Como la recuperación de los plásticos de los vehículos ya utilizados, requiere un área que cubre instalaciones de retorno, las tareas de ruteo de vehículos tienen que ser abordadas simultáneamente. Las interdependencias entre estas tareas requieren un enfoque combinado.

Mientras que el artículo mencionado anteriormente trata a la industria automovilística como elemento adicional de enlace, el documento citado a continuación, conecta los productos de recompra y el reciclaje con la gestión del inventario. Como lo señaló Fleischmann et al. (1997) el control de inventarios es una actividad fundamental en la cadena de suministro de ciclo cerrado, en particular para los procesos de remanufactura. Varios modelos se han desarrollado en la literatura donde el objetivo es en general optimizar el costo o beneficio y encontrar la cantidad óptima de pedido para una producción integrada y de remanufactura. El control del inventario requiere mecanismos de control adecuados para integrar el flujo de retorno de los productos utilizados con la planificación de los materiales para el flujo hacia adelante.

El estudio de Inderfurth (2004) analiza el comportamiento de la recuperación del producto en una cadena de suministro de ciclo cerrado. En este caso, el análisis se realiza a una empresa de fabricantes de equipos originales OEM. En éste, un fabricante de productos originales también se dedica a la refabricación de productos utilizados devueltos por sus clientes. Para este tipo de cadena de ciclo cerrado, que se caracteriza por la incertidumbre de las demandas y devoluciones de

productos, la recuperación óptima y la política de producción son evaluadas. En este contexto, no es claro cómo diferentes fuentes y los niveles de incertidumbre afectan el comportamiento de recuperación; es decir, cómo afecta la tendencia a remanufacturar productos utilizados con fines de reutilización en lugar de disponerlos.

Fleischmann y Minner (2003) revisaron los modelos matemáticos sobre inventarios en cadenas de suministro de ciclo cerrado. Estos siguen una estructura estándar de la teoría de inventarios tradicionales y discuten las aplicaciones de configuración de ciclo cerrado para cada caso. Su análisis se centra en resaltar las características que implican una estructura de cadena de suministro de ciclo cerrado, en términos matemáticos y las implicaciones en el negocio. En este contexto, Richter y Dobos (2004) evalúan un modelo general para el control de producción e inventario de un modelo EOQ (cantidad económica a ordenar) dentro de un sistema de logística de reversa, que permite la recompra y el reciclaje o la disposición de artículos usados. El análisis muestra que la mezcla de estrategias para la combinación de producción y el reciclaje están dominadas por estrategias puras.

Torre et al, (2004) analizó las diferencias existentes de las relaciones entre las empresas embotelladoras y empacadoras pertenecientes a los sectores de alimentos y bebidas, con sus proveedores y sus clientes en países europeos con características diferentes (España y Bélgica). Guide et al. (2003b) propuso un enfoque contingente para explorar los factores que impactan en la planificación de la producción y el control de cadenas de suministro de ciclo cerrado que incorporen la recuperación del producto. Tres casos se presentaron y un marco fue desarrollado, el cual muestra las actividades comunes necesarias para todas las operaciones de remanufactura. Van Der Laan et al. (1996) presentó la estrategia de disposición de un solo producto, de un solo escalón de la producción y un sistema de inventario con devoluciones de productos y remanufactura de productos; comparando el desempeño de cada una de las estrategias alternativas con respecto a los costos, bajo diferentes condiciones del sistema. Toktay et al. (2000) desarrolló y analizó un modelo de la cadena de suministro para las cámaras de Kodak de un solo uso, que minimiza la contratación total prevista, el mantenimiento de inventario y el costo de venta. Minner (2001) analizó el efecto del costo de inventario de seguridad de las actividades de logística inversa y combinó la planificación del inventario de seguridad en una cadena de suministro general con la integración de devolución de productos externos e internos y la reutilización. Hicks et al. (2004) exploró la definición y clasificación de los residuos desde de diferentes puntos de vista y presentó un modelo funcional genérico para la modelación del material y el flujo de residuos, tanto desde el punto de vista físico como desde una perspectiva de costo acumulado.

Kannan et al. (2009) analiza una cadena de suministro de ciclo cerrado usando algoritmos genéticos (AG) y optimización de enjambre de partículas (PSO). Para lo cual diseña un modelo integrado de inventario y distribución multi-eslabón para una cadena de suministro hacia adelante (FLMEDIM), modelo propuesto por Haq y Kannan (2006) y un modelo integrado de inventario y distribución multi-eslabón para una cadena de suministro de ciclo cerrado (CLMEDIM) usando algoritmos genéticos y optimización de enjambre de partículas. En este trabajo, los modelos propuestos se validan al considerar dos casos: uno para un fabricante de neumáticos y el otro para un fabricante de artículos de plástico, ambos ubicados en la parte sur de la India. En el trabajo de Kannan et al. (2010), se presenta un caso del uso óptimo de plomo secundario recuperado del plomo ya usado, específicamente, de las baterías usadas de plomo-ácido para producir nuevas baterías. Se desarrolla un modelo para una cadena de suministro de ciclo cerrado multi-eslabón, multi-período y

multi-producto para las devoluciones de productos y se toman decisiones relativas a las compras de materiales, producción, distribución, reciclaje y eliminación. Se usan algoritmos genéticos (AG) como una metodología de solución para resolver el modelo mixto de programación lineal entera (MILP) y los resultados computacionales obtenidos a través de AG se comparan con las soluciones obtenidas por el software de optimización GAMS. La solución revela que la metodología propuesta se desempeña muy bien en términos de calidad de las soluciones obtenidas y el tiempo de cómputo. En el estudio de Wang y Hsu (2010), se integró la logística directa con la inversa mediante una cadena de suministro de ciclo cerrado con el fin de integrar las cuestiones medioambientales en un sistema de logística tradicional. Se formuló un problema de la red logística cíclica en un modelo de programación lineal entera. En éste, se consideran las operaciones de las 3R: reciclaje, reutilización y recuperación y la optimización en la selección de fábricas, centros de distribución y desmanteladoras con sus unidades de funcionamiento. Debido a la naturaleza NP-duro del modelo, un algoritmo genético que se basa en una estructura de árbol de expansión fue desarrollado. Pruebas a pequeña escala y a gran escala se compararon y los resultados demostraron la aplicabilidad del modelo propuesto con el procedimiento de solución.

Con base en la revisión de literatura anterior, en el presente, se observa el auge en la investigación de las cadenas de suministro de circuito cerrado. Un gran número de publicaciones han aparecido en este tema, particularmente en problemas de optimización de cadenas de suministro hacia adelante (directas) y en logística de reversa. Por otro lado, se podría inferir que sólo se observa el empleo de ciertos métodos de solución para resolver problemas de optimización en cadenas de suministro de ciclo cerrado, como lo son AG, PSO, AG + GAMS y AG + Árbol de expansión. Por tal motivo, este trabajo pretende dar continuidad al trabajo de Kannan et al.(2009), usándolo como punto de partida para realizar el análisis de una cadena de suministro de ciclo cerrado mediante algoritmos genéticos.

2.2.1 Algoritmos genéticos como método de solución

En general existe una gran cantidad de problemas que se consideran difíciles de resolver. La dificultad de los problemas está caracterizada por la teoría de complejidad computacional. Muchos problemas son NP-duros, esto es, el tiempo que requieren para resolver una instancia de ese problema crece en el peor de los casos de manera exponencial con respecto al tamaño de la instancia. Por lo mismo, muchas veces se tienen que solucionar usando métodos de solución aproximados, que regresan buenas soluciones (inclusive a veces óptimas) a bajo costo computacional (Solano-Charris, 2008).

Las metaheurísticas se proponen como métodos, determinísticos o estocásticos para salir de mínimos locales, es decir, son estrategias maestras que permiten resolver de manera inteligente un problema (Melián, 2003). Entre las metaheurísticas más conocidas se encuentran los algoritmos genéticos (AG), creados por John Holland en la década de 1960 e inspirados en la teoría de la evolución (Mitchell, 1998). Los AG se definen como métodos adaptativos que se emplean principalmente para la resolución de problemas de búsqueda y optimización. Se enmarcan dentro de la rama de inteligencia artificial conocida como computación evolutiva o algoritmos evolutivos. Esta rama trata el estudio de los fundamentos y aplicaciones de técnicas heurísticas de búsqueda que emplean los principios de la evolución natural (Solano-Charris, 2008).

Según Kannan et al. (2009) los AG son diferentes de las optimizaciones tradicionales de la siguiente forma:

- Funcionan con una codificación del conjunto de parámetros y no los propios parámetros.

- Realiza la búsqueda desde una población de puntos y no un solo punto.
- Usa la información de la función de evaluación o función de Fitness, y no derivados u otros auxiliares del conocimiento.
- Utiliza reglas de transición probabilística y no normas determinísticas.

En la naturaleza, las características de un organismo están determinados por uno o más cromosomas. Un cromosoma, puede dividirse conceptualmente en genes, cada uno de los cuales se encuentra en una posición dentro del cromosoma.

Los AG trabajan con una población de soluciones (cromosomas), denominadas individuos, que procesan toda la información que ésta contiene, sobre la cual se aplica un proceso de selección y procesos de mejora de los individuos a lo largo de las distintas generaciones de la población (Solano-Charris, 2008).

El funcionamiento de un AG se describe a continuación:

2.2.1 Generación de la población inicial

Inicialmente, se genera la población inicial, que está constituida por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema. Se debe elegir la codificación adecuada y su distribución para cada gen dentro del cromosoma.

Los AGs no tienen restricciones en cuanto a la forma que deben adoptar los genes. Estos pueden representarse como cadenas binarias, números enteros, números reales o estructuras más complejas (García et al.,2003). Sin embargo, la codificación más común de las soluciones es a través de cadenas binarias (ceros y unos) (Goldberg,1989). Muchas veces se prefiere el uso de codificaciones binarias por simplicidad, o por contar con técnicas apropiadas para analizar el comportamiento del algoritmo (García et al.,2003). A pesar de ello, hay aplicaciones a las que la codificación binaria no se adapta correctamente, en estos casos se pueden utilizar números enteros, números reales o un alfabeto de varios caracteres (Mitchell, 1998).

La inicialización de la población determina el proceso de creación de los individuos para el primer ciclo del algoritmo. Aunque usualmente la población inicial es generada de manera aleatoria para ampliar el espacio de búsqueda, también se puede crear utilizando alguna técnica heurística. Con el uso adecuado de heurísticas, se puede hallar más rápido una solución, siempre y cuando, la población inicial esté lo suficientemente dispersa por el espacio de búsqueda y fundamentalmente compuesta por soluciones de calidad media (Yolis,2003).

2.2.2 Función de adaptación

Posteriormente, a cada uno de los cromosomas de esta población se le aplica la función de aptitud para saber qué tan buena es la solución que se está codificando.

Una de las premisas de la teoría de la evolución de Darwin, es que en una población de individuos siempre sobrevive el que mejor se adapte al entorno (Goldberg ,1989). Entonces, al trasladar esto para los AGs, se trata de conocer cuáles son los individuos más aptos, y esto se puede lograr definiendo una función de adaptación o de aptitud, de tal manera, que cada individuo sea evaluado por esta función de adaptación para seleccionar luego a los más aptos. Las funciones de adaptación o evaluación son específicas de cada problema.

Un buen diseño de la función de la adaptación resulta extremadamente importante para el correcto funcionamiento de un AG. Esta función determina el grado de adaptación o aproximación

de cada individuo al problema y por lo tanto permite distinguir a los mejores individuos de los peores. A esta puntuación en función de su proximidad a la mejor solución del problema se le denomina fitness (Solano-Charris, 2008).

2.2.3 Selección

Una vez conocida la aptitud de cada cromosoma, se procede a elegir los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.

El operador de selección es una versión artificial del concepto de selección natural y está basado en el concepto darwiniano de “supervivencia del más apto” (Goldberg,1989). La función de adaptación está asociada al beneficio, utilidad, bondad que desea optimizarse. La selección es el mecanismo por el cual soluciones más próximas al óptimo (individuos mejor adaptados) tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos (seleccionados) para reproducirse (Solano-Charris, 2008). La selección proporcional, selecciona a los individuos basándose en el peso de su aptitud con respecto a los demás individuos. Un método de selección bien conocido es el *Elitismo*, el cual preserva los mejores individuos de una población, asegurando que los mejores individuos de una generación, pasen directamente a la siguiente sin modificaciones (García et al.,2003). Ésta selección elitista se utiliza siempre en combinación con otros métodos como, por ejemplo, con la selección proporcional y, su importancia radica en que de esta forma nunca se pierde la mejor solución encontrada hasta el momento (Solano-Charris, 2008)..

Por otro lado, la selección basada en el orden, en cambio, crea una lista de individuos, ordenada de manera descendente por su aptitud, y selecciona los individuos teniendo en cuenta su posición en la lista. Este es el caso del método de selección conocido como *Ranking*, donde se ordena a todos los individuos de la población, de manera descendente en base a su aptitud. Luego, selecciona los m (cantidad necesaria) primeros individuos teniendo en cuenta su posición en la lista. Por lo tanto, la cantidad de copias que obtiene cada cromosoma con este método, depende de la posición que ocupa en el ranking en vez del peso de su aptitud (Mitchell, 1998).

2.2.4 Reproducción

Después de la selección de los mejores cromosomas, se realiza la reproducción sexual o cruzamiento (proceso de intensificación), éste es el principal operador genético, opera sobre dos cromosomas, para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres. Las formas más comunes de reproducción sexual son: uso de un punto único de cruzamiento y uso de dos puntos de cruzamiento (Goldberg,1989).

Para el cruzamiento por un punto, se selecciona del cromosoma una posición de corte. Luego se intercambian las partes de cada padre separadas por esa posición, generando así dos hijos.

Para el cruzamiento de dos puntos, se seleccionan del cromosoma dos posiciones de corte y se procede a intercambiar las partes de cada padre separadas por esas posiciones, generando igualmente dos hijos.

Independientemente de la técnica de cruce que sea empleada, se suele implementar la reproducción en un AG como un valor porcentual que indica la frecuencia con la que se deben realizar los cruces, y los que no se crucen pasarán como réplicas de sí mismos a la siguiente generación o, también existe la posibilidad de que por otro valor porcentual se pueda producir una mutación durante la replicación del código.

2.2.5 Mutación

Existe otro operador llamado mutación (proceso de diversificación), mediante el cual se modifica parte del cromosoma de los individuos elegidos al azar y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual (Napalkova y Merkuryeva, 2008). La mutación se maneja como un porcentaje de mutación que indica con qué frecuencia se efectuará, normalmente nunca supera el 5%. A causa de su baja probabilidad de ocurrencia, la mutación se considera un operador secundario de los AGs (Goldberg, 1989).

La mutación se realiza con el fin de aumentar la diversidad genética que favorece la aparición de individuos con un código genético distinto con la posibilidad de que sea mejor, es especialmente mejor la mutación cuando la población, después de un cierto número de generaciones, tiende a converger hacia un óptimo local. Igual que sucede en la fase de cruce (reproducción), el proceso de mutación suele implementarse como un valor porcentual y se ha comprobado que el ajuste correcto del porcentaje de mutación es de vital importancia para el correcto funcionamiento del AG (Solano-Charris, 2008). En conclusión, la mutación representa un movimiento al azar en los alrededores de una solución en particular.

2.2.6 Criterios de terminación

Una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente. Para decidir cuándo parar la ejecución del AG se debe definir un criterio de terminación. El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención: correr el AG un número máximo de iteraciones (generaciones) o detenerlo cuando no haya cambios en la población (Goldberg, 1989).

La desventaja del primer criterio, es que una vez finalizado el AG, este podría no haber encontrado una solución suficientemente buena para el problema. La segunda opción tiene como desventaja que podría pasar mucho tiempo hasta que la población converja, es decir, cuando los individuos de la población sean muy similares o iguales.

2.3 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se presentó una visión general de los conceptos relacionados con cadenas de suministro de ciclo cerrado y de la metaheurística utilizada para dar una solución al problema propuesto. En primer lugar, la cadena de suministro, ha sido vista como la estructura operativa responsable de la producción y distribución de productos a los diferentes mercados dispersos en todo el mundo, cuyo principal objetivo era la satisfacción de los clientes a un costo mínimo (Barbosa-Póvoa, 2009).

No cabe duda que el concepto de cadena de suministro ha ido evolucionando a medida que pasan los años, por lo cual, este paradigma está cambiando y los avances en la competencia mundial con un agotamiento paralelo de los recursos naturales y una mayor preocupación de la sociedad hacia el medio ambiente, crean una nueva forma de pensar en la gestión de cadenas de suministro (Barbosa-Póvoa, 2009).

Se define a la gestión de la cadena de suministro sostenible como la gestión de los flujos de materiales e información, así como, la cooperación entre empresas a lo largo de la cadena de suministro, teniendo en cuenta los objetivos de las tres dimensiones del desarrollo sostenible:

económica, ambiental y social, y al mismo tiempo, las necesidades de las partes interesadas (Seuring, 2008). Al mismo tiempo, la logística verde forma parte de la gestión de la cadena de suministro verde (GrSCM) y se refiere a la producción y distribución de bienes de una manera sostenible, teniendo en cuenta los factores ambientales y sociales (Sbihi y Eglese, 2007). En consecuencia, los objetivos de la logística verde están asociados con el impacto económico de las políticas de logística dentro de la organización y con los enormes efectos en la sociedad, como lo es la contaminación al medio ambiente. Las actividades de logística verde incluyen la medición del impacto ambiental de diferentes estrategias de distribución, reducción del uso de energía en actividades logísticas, reducción de los residuos y la gestión de su tratamiento (Halabi et al., 2011). Con el fin de ejecutar estas actividades de logística verde, se considera a la logística de reversa como uno de los aspectos clave en la gestión de la logística verde. Como lo declaró Pirachican et al. (2009), la práctica de la logística de reversa permite la recuperación de bienes al final de su ciclo de vida en una forma eficiente y también se utiliza para recuperar los bienes que ya no son útiles para el consumidor.

Beamon y Fernandes (2004) declararon que las devoluciones de productos son el aspecto más común de la logística inversa. Esto hace que algunas empresas seriamente consideren un enfoque de "circuito cerrado" para la cadena de suministro que incluye: devoluciones de productos, devoluciones de contratos de servicios, la baja de productos, equipos usados y piezas de repuesto para la restauración, así como la reutilización o venta como materia prima. Wells y Seitz (2005) consideran que los circuitos cerrados ofrecen oportunidades para lograr la denominada "triple línea de base" que corresponde a los beneficios sociales, económicos y ambientales.

Por lo tanto, es importante conocer que en términos generales, los ciclos cerrados están conformados por dos cadenas de suministro: una cadena hacia adelante (directa) y una cadena inversa mediante el cual un producto recuperado vuelve a entrar a la cadena hacia adelante tradicional.

Con base en la revisión de literatura realizada, en el presente, se observa el auge en la investigación de las cadenas de suministro de ciclo cerrado. Un gran número de publicaciones han aparecido en este tema, particularmente en problemas de optimización de cadenas de suministro hacia adelante (directas) y en logística de reversa. Por otro lado, se podría inferir que sólo se observa el empleo de ciertos métodos de solución para resolver problemas de optimización en cadenas de suministro de ciclo cerrado, como lo son AG, PSO, AG + GAMS y AG + Árbol de expansión. Por tal motivo, este trabajo está inspirado en el caso de estudio de Kannan et al. (2009) y se usa como punto de partida para realizar el análisis de una cadena de suministro de ciclo cerrado mediante algoritmos genéticos.

Entre los métodos de solución más conocidos se encuentra la metaheurística de algoritmos genéticos (AG), estos se definen como métodos adaptativos que se emplean principalmente para la resolución de problemas de búsqueda y optimización. Se enmarcan dentro de la rama de inteligencia artificial conocida como computación evolutiva o algoritmos evolutivos. Esta rama trata el estudio de los fundamentos y aplicaciones de técnicas heurísticas de búsqueda que emplean los principios de la evolución natural (Solano-Charris, 2008). Los Algoritmos genéticos son metaheurísticas que trabajan con una población inicial de soluciones, denominadas individuos, que procesan toda la información que ésta contiene, sobre la cual se aplica un proceso de selección y mejora de los individuos a lo largo de las distintas generaciones de la población (Solano-Charris, 2008). Dos procesos de mejora conocidos se realizan por medio de operadores genéticos, como lo son:

cruzamiento y mutación. El cruzamiento (proceso de intensificación) consiste en combinar las características de ambos cromosomas padres. Las formas más comunes de cruzamiento son: uso de un punto único de cruzamiento y uso de dos puntos de cruzamiento.

La mutación (proceso de diversificación) modifica parte del cromosoma de los individuos elegidos al azar y permite alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población actual (Goldberg,1989).

Una vez aplicados los operadores genéticos, se seleccionan los mejores individuos para conformar la población de la generación siguiente. El AG se deberá detener cuando se alcance la solución óptima, pero ésta generalmente se desconoce, por lo que se deben utilizar otros criterios de detención: correr el AG un número máximo de generaciones o detenerlo cuando no haya cambios en la población (Goldberg,1989).

Capítulo 3. Problema de cadena de suministro de ciclo cerrado mediante algoritmos genéticos

3.1 Descripción del problema

A la empresa manufacturera de neumáticos ubicada en el sur de La India se le propone un modelo de cadena de suministro de ciclo cerrado en el cual una cadena tradicional de distribución multi-eslabón e inventario se integra con una cadena de suministro inversa de distribución multi-eslabón e inventario con el fin de minimizar el costo total.

Este modelo es usado para optimizar la distribución y el nivel de inventario para una cadena de suministro de logística inversa usando algoritmos genéticos con el fin de minimizar el costo total de la cadena de suministro que comprende costos de compra, producción, distribución e inventario. Solamente la operación de reciclaje es considerada en la logística inversa.

3.2 Formulación de modelo

3.2.1 Suposiciones

- Solamente la operación de reciclaje es considerada en la logística inversa
- La capacidad única del centro de recolección es ilimitada y es mantenida por la misma industria
- El costo de inspección por producto desde cada planta a todos los centros de distribución, desde cada centro de distribución a todos los mayoristas y desde cada mayorista a todos los minoristas se mantiene fijo para todos los periodos dados.
- El costo de transporte por producto desde cada planta a todos los centros de distribución, desde cada centro de distribución a todos los mayoristas y desde cada mayorista a todos los minoristas se mantiene fijo para todos los periodos dados.
- El costo de mantener el inventario por producto y por periodo en todas las plantas, centros de distribución, mayoristas y minoristas se mantiene constante, a través del periodo de estudio en dicha planta, centro de distribución, mayorista o minorista.
- El costo de procesamiento por producto en cualquier planta se mantiene fijo, como es definido, a través del periodo de estudio en dicha planta.
- El costo de transporte por producto desde el proveedor a la planta está incluido en el costo de compra de la cadena hacia delante.
- La demanda diaria del consumidor es determinística, no son permitidos los faltantes y la capacidad de abastecimiento del proveedor seleccionado es ilimitada. También se asumen que el tiempo que toma para el transporte de producto entre los diferentes niveles es homogéneo y no se toma en consideración.

3.2.2 Notación

Índices

c = Centro de recolección= 1

k = Plantas= 2

j = Centros de distribución=2

i = Mayoristas=2

w =Minoristas=2

m = productos=2

z = periodos=2

Costos en la función objetivo

TC: Costo total

TRCC: Costo total de productos retornados

TPUC: Costo total de compra

TPC: Costo total de procesamiento

TCCPTC: Costo total de transporte desde el centro de recolección hasta la planta

TPDTC: Costo total de transporte desde la planta hasta el centro de distribución

TDWTC: Costo total de transporte desde el centro de distribución hasta el mayorista

TWRTC: Costo total de transporte desde el mayorista al minorista

TCCIC: Costo total de mantener inventario en el centro de recolección

TPIC: Costo total de mantener inventario en la planta

TDIC: Costo total de mantener inventario en el centro de distribución

TWIC: Costo total de mantener inventario en el mayorista

TRIC: Costo total de mantener inventario en minoristas

Parámetros de entrada

QRTc_zm: Cantidad de cada producto recolectado y retornado al centro de recolección después de inspección en el periodo z

CRTc_zm: Costo de recolección por producto retornado al centro de recolección en el periodo z (incluye el costo de inspección).

PC_km_z: Costo de procesamiento en la planta k de producto m en el periodo z

TCCCPc_kz: Costo de transporte por unidad desde el centro de recolección c a la planta k en el periodo z

TCPDk_jz: Costo de transporte por unidad desde la planta k al centro de distribución j en el periodo z

TCDWj_iz: Costo de transporte por unidad desde el centro de distribución j al mayorista i en el periodo z

TCWRI_wz: Costo de transporte por unidad desde el mayorista i al minorista w en el periodo z

ICCCc_z: Costo de mantener inventario por unidad el centro de recolección c en el periodo z

ICPk_z: Costo de mantener inventario por unidad en la planta k en el periodo z

ICDj_z: Costo de mantener inventario por unidad en el centro de distribución j en el periodo z

ICWi_z: Costo de mantener inventario por unidad en el mayorista i en el periodo z

ICRw_z: Costo de mantener inventario por unidad en el minorista w para el periodo z

Pk: Tiempo de procesamiento disponible en la planta k

PTk_m: Tiempo de procesamiento en cada planta k para el producto m

MCm_z: Costo de material prima del producto m en el periodo z

Qw_mz: Demanda del minorista w del producto m en el periodo z

PSk: Capacidad de almacenamiento en la planta k

DSj: Capacidad de almacenamiento en el centro de distribución j
WSi: Capacidad de almacenamiento en el mayorista i
RSw: Capacidad de almacenamiento en el minorista w

Variables de decisión

QPk_m_z: Cantidad procesada en la planta k de producto m en el periodo z
QTCCPc_k_z: Cantidad transportada desde el centro de recolección c a la planta k en el periodo z
QTPDk_j_z: Cantidad transportada desde la planta k al centro de distribución j en el periodo z
QTDWj_i_z: Cantidad transportada desde el centro de distribución j al mayorista i en el periodo z
QTWRI_w_z: Cantidad transportada desde el mayorista i al minorista w en el periodo z
CCFc_z: Inventario final en el centro de recolección c en el periodo z
PFk_z: Inventario final en la planta k en el periodo z
DFj_z: Inventario final en el centro de distribución j en el periodo z
WFi_z: Inventario final en el mayorista i en el periodo z
RFw_z: Inventario final en el minorista w para el periodo z
QRPk_m: Cantidad de materia prima recibida por la planta k del producto m

3.2.3 Modelo de Cadena de suministro de ciclo cerrado de distribución multi-eslabón e inventario

La función objetivo del modelo se presenta mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Minimizar } TC = TRCC + TPUC + TPC + TCCPTC + TPDTc + TDWTC + TWRTC + TCCIC + TPIC + TDIC + TWIC + TRIC \quad (1)$$

Cada costo puede ser calculado usando las siguientes relaciones, cabe aclarar que se han realizado algunas correcciones al modelo original propuesto por Kannan et al. (2009) y al ser necesario se explican en cada caso:

Costo de recolección: Costo total de recolección de productos retornados se puede determinar mediante

$$TRCC = \sum_c \sum_z \sum_m (QRT_{czm} * CRT_{czm}) \quad (2)$$

Se agregó el índice de producto debido a que en los parámetros de entrada las cantidades devueltas QRT_{czm} se ingresan por cada producto pero en la notación del modelo original solo se consideraban como QRT_{cz} .

Costos de compra: Costo total de compra que se puede determinar mediante

$$TPUC = \sum_m (QRP_{km} * MC_{mz}); \forall k, \forall z \quad (3)$$

Costos de procesamiento: Costo total de procesamiento en todas las plantas se puede determinar mediante

$$TPC = \sum_k \sum_z \sum_m (QP_{kzm} * PC_{kzm}) \quad (4)$$

Costo de transporte: El costo total de transporte a lo largo de la cadena de suministro incluye los costos de transporte desde el centro de recolección a todas las plantas, desde cada planta a todos los centros de distribución, desde cada centro de distribución a todos los mayoristas y desde cada mayorista a todos los minoristas.

El costo total de transporte desde los centros de recolección a las plantas para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TCCPTC = \sum_c \sum_z \sum_k (QTCCP_{czk} * TCCCP_{czk}) \quad (5)$$

El costo total de transporte desde las plantas a los centros de distribución para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TPDTC = \sum_k \sum_z \sum_j (QTPD_{kzj} * TCPD_{kzj}) \quad (6)$$

El costo total de transporte desde los centros de distribución a los mayoristas para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TDWTC = \sum_j \sum_z \sum_i (QTDW_{jzi} * TCDW_{jzi}) \quad (7)$$

El costo total de transporte desde los mayoristas a los minoristas para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TWRTC = \sum_i \sum_z \sum_w (QTWR_{izw} * TCWR_{izw}) \quad (8)$$

Costo de inventario en el Centro de Recolección: El costo de mantener el inventario en los centros de recolección para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TCCIC = \sum_z \sum_c (CCF_{zc} * ICCc_{zc}) \quad (9)$$

Costo de inventario en las plantas: El costo de mantener el inventario en todas las plantas para todos los periodos se puede determinar mediante

$$TPIC = \sum_z \sum_k (PF_{zk} * ICP_{zk}) \quad (10)$$

Costo de inventario en los centros de distribución: El costo de mantener el inventario en los centros de distribución en todos los periodos se puede determinar mediante

$$TDIC = \sum_z \sum_j (DF_{zj} * ICD_{jz}) \quad (11)$$

Costo de inventario en los mayoristas: El costo de mantener el inventario en los mayoristas en todos los periodos se puede determinar mediante

$$TWIC = \sum_z \sum_i (WF_{zi} * ICW_{zi}) \quad (12)$$

Costo de inventario en los minoristas: El costo de mantener el inventario en los minoristas en todos los periodos se puede determinar mediante

$$TRIC = \sum_z \sum_w (RF_{zw} * ICR_{zw}) \quad (13)$$

Las restricciones existentes se presentan a continuación:

El tiempo total de procesamiento requerido en el procesamiento de todos los tipos de productos en cada planta para cada periodo debe ser menor o igual que el tiempo disponible de procesamiento:

$$\sum_m (QP_{kzm} * PT_{km}) \leq P_k; \forall z, \forall k \quad (14)$$

La restricción original totaliza para todas las plantas, periodos y productos así:

$$\sum_k \sum_m \sum_z (QP_{kmz} * PT_{km}) \leq P_k \quad (15)$$

El cambio en la ecuación 14 se realiza al totalizar solamente en productos, ya que el tiempo total de procesamiento requerido se calcula para cada planta y para cada periodo debido a que el tiempo disponible de la planta es diferente en cada una.

La cantidad de materia primera recibida por cada planta debe ser menor o igual a la capacidad de almacenamiento de la planta y puede determinarse mediante

$$\sum_m (QRP_{km}) \leq PS_k; \forall k \quad (16)$$

La restricción original totaliza para todas las plantas, periodos y productos así:

$$\sum_k \sum_m \sum_z (QRP_{km}) \leq PS_k \quad (17)$$

El cambio en la ecuación 16 se realiza al totalizar solamente en productos, ya que la materia prima recibida se calcula para cada planta y, el periodo es un error de notación del modelo original debido a que ninguna de las variables ni parámetros lo incluye.

La cantidad procesada en cada planta de todos los productos debe ser menor o igual que la capacidad de almacenamiento de la planta y puede determinarse mediante

$$\sum_z \sum_m QP_{kzm} \leq PS_k; \forall k \quad (18)$$

La restricción original totaliza para todas las plantas, periodos y productos así:

$$\sum_k \sum_m \sum_z QP_{kmz} \leq PS_k \quad (19)$$

El cambio en la ecuación 18 consiste en totalizar solamente en productos y periodos, ya que la cantidad procesada se calcula para cada planta y la cual debe ser menor o igual que la capacidad de almacenamiento de cada planta.

La cantidad transportada desde cada planta a todos los centros de distribución debe ser menor o igual que la capacidad de almacenamiento de la planta y puede determinarse mediante

$$\sum_z \sum_j (QTPD_{kzj}) \leq PS_k; \forall k \quad (20)$$

La restricción original totaliza para todas las plantas, periodos y centros de distribución así:

$$\sum_k \sum_j \sum_z QTPD_{k j z} \leq PS_k \quad (21)$$

El cambio en la ecuación 20 se realiza al totalizar solamente en centros de distribución y periodos, ya que la cantidad transportada se calcula desde cada planta a todos los centros de distribución para todos los periodos.

La cantidad transportada desde cada centro de distribución a todos los mayoristas debe ser menor o igual que la capacidad de almacenamiento del centro de distribución y puede determinarse mediante

$$\sum_z \sum_i QTDW_{jzi} \leq DS_j; \forall j \quad (22)$$

La restricción original totaliza para todos los centros de distribución, periodos y mayoristas así:

$$\sum_j \sum_i \sum_z QTDW_{jiz} \leq DS_j \quad (23)$$

El cambio en la ecuación 22 se realiza al totalizar solamente en mayoristas y periodos, ya que la cantidad transportada se calcula desde cada centro de distribución a todos los mayoristas para todos los periodos.

La cantidad transportada desde cada mayorista a todos los minoristas debe ser menor o igual que la capacidad de almacenamiento del mayorista y puede determinarse mediante

$$\sum_z \sum_w QTWR_{izw} \leq WS_i; \forall i \quad (24)$$

La restricción original totaliza para todos los mayoristas, minoristas y periodos así:

$$\sum_i \sum_w \sum_z QTWR_{i wz} \leq WS_i \quad (25)$$

El cambio en la ecuación 24 se realiza al totalizar solamente en minoristas y periodos, ya que la cantidad transportada se calcula desde cada mayorista a todos los minoristas para todos los periodos.

La demanda en cada minorista durante un período determinado debe ser menor o igual a la capacidad de almacenamiento de ese minorista y puede determinarse mediante

$$\sum_m Q_{wzm} \leq RS_w; \forall w; \forall z \quad (26)$$

La restricción original totaliza para todos los productos y periodos así:

$$\sum_m \sum_z Q_{wmz} \leq RS_w \quad (27)$$

El cambio en la ecuación 26 se realiza al totalizar solamente en productos, ya que la demanda está dada para cada minorista en cada periodo para todos los productos.

La cantidad procesada (tasa de producción) de productos en las plantas debe ser mayor o igual que la demanda total en los minoristas durante un periodo dado y puede determinarse mediante

$$\sum_k \sum_m QP_{kzm} \geq \sum_w \sum_m Q_{wzm}; \forall z \quad (28)$$

La restricción original difiere a la anterior ecuación porque totaliza en todos los periodos así:

$$\sum_k \sum_m \sum_z QP_{kmz} \geq \sum_w \sum_m \sum_z Q_{wmz} \quad (29)$$

Entonces para facilidad de cálculo y diferenciación por periodo, la cantidad procesada de productos en todas las plantas debe ser mayor o igual que la demanda total de productos en todos los minoristas en cada periodo.

Las restricciones de inventario se adicionan, ya que en el modelo del artículo base (Kannan et al. 2009) no son presentadas, entonces debido a que se parte de un inventario inicial incluido en cada formula de inventario, se aportan nuevos elementos al modelo lo cual resulta en un modelo matemático distinto.

Inventario en el centro de recolección c en el periodo z

$$CCF_{cz} = QRT_{cz} + CCF_{cz-1} - \sum_k QTCCP_{ckz}; \nabla c; \nabla z \quad (30)$$

Inventario en la planta k en el periodo z

$$PF_{kz} = \sum_m QP_{kmz} + PF_{kz-1} - \sum_j QTPD_{kjz}; \nabla k; \nabla z \quad (31)$$

Inventario en el centro de distribución j en el periodo z

$$DF_{jz} = \sum_j QTPD_{kjz} + DF_{kz-1} - \sum_i QTDW_{jiz}; \nabla j; \nabla z \quad (32)$$

Inventario en el mayorista i en el periodo z

$$WF_{iz} = \sum_i QTDW_{jiz} + WF_{kz-1} - \sum_w QTWR_{iwz}; \nabla i; \nabla z \quad (33)$$

Inventario en el minorista w en el periodo z

$$RF_{wz} = \sum_w QTWR_{iwz} + RF_{wz-1} - \sum_m Q_{wmz}; \nabla w; \nabla z \quad (34)$$

3.3 Algoritmo propuesto

Se programa el algoritmo con la herramienta de programación Visual Basic® (VB). Las pruebas se realizaron en un equipo de cómputo con las siguientes características:

Procesador: Intel(R) Core(TM) 2 Duo CPU T7100 1,8GHz

Memoria Intalada (RAM): 2.00GB

Tipo de sistema: Windows 7 Home Premium (32 bits)

Para la programación del algoritmo se tienen en cuenta los parámetros de entrada, la definición del cromosoma, la generación de la población, el cálculo de la función objetivo, el operador de selección, el operador de cruzamiento y el operador de mutación, esto incluye la definición de la probabilidad de cruzamiento y de la probabilidad de mutación y también del número de generaciones permitidas. Las probabilidades de cruzamiento a evaluar son tres: 0,7, 0,8 y 0,9 con tres probabilidades de mutación: 0,05, 0,1 y 0,2 para tres diferentes generaciones: 50, 100 y 125. Además, cabe aclarar que los cromosomas generados aleatoriamente son evaluados usando la función objetivo específica para el modelo matemático propuesto.

A continuación se presenta la metodología para llevar a cabo el algoritmo genético:

Paso 1: Construir una población inicial con un numero n de individuos (cromosomas). Donde el individuo cumpla con las restricciones del modelo para estar dentro del conjunto de la población inicial por cada variable a calcular.

Se generan 10 poblaciones iniciales aleatorias (m=10 matrices, ver figura 3) que representan cada variable, $P = \{x_1, \dots, x_m\}$ manteniendo el proceso de selección interno dentro de cada población generada que exige que se cumplan con las condiciones del modelo.

Cant Procesada P11				Cant trans de P11 a CD				Cant trans de CD2 a May			
598	538	522	443	487	438	768	652	715	643	655	556
465	418	503	427	786	707	595	505	438	394	589	500
411	369	480	407	745	670	481	408	496	446	473	402
468	421	631	536	749	674	456	387	580	522	419	356
431	387	642	545	735	661	898	763	419	377	475	403
543	488	595	505	778	700	574	487	552	496	709	602
574	516	558	474	648	583	545	463	412	370	408	346
422	379	513	436	707	636	765	650	574	516	402	341
436	392	548	465	770	693	474	402	695	625	526	447
527	474	501	425	462	415	711	604	426	383	555	471
Cant Procesada P12				Cant trans de P12 a CD				Cant trans de May1 a Min			
396	356	432	367	528	475	697	592	70	63	139	118
383	344	430	365	688	619	731	621	150	135	92	78
379	341	429	364	828	745	843	716	135	121	164	139
386	347	436	370	740	666	874	742	54	48	58	49
382	343	423	359	764	687	515	437	172	154	187	158
381	342	444	377	692	622	722	613	101	90	141	119
388	349	447	379	457	411	736	625	62	55	88	74
394	354	424	360	709	638	827	702	88	79	95	80
380	342	439	373	525	472	421	357	102	91	155	131
395	355	438	372	507	456	872	741	93	83	87	73
MP P11		MP P12		Cant trans de CD1 a May				Cant trans de May2 a Min			
800	720	826	743	468	421	472	401	175	157	71	60
538	457	902	766	701	630	805	684	185	166	170	144
538	484	588	529	428	385	485	412	188	169	210	178
630	535	905	769	796	716	679	577	99	89	90	76
813	731	770	693	716	644	864	734	103	92	142	120
592	503	787	668	836	752	810	688	131	117	93	79
896	806	730	657	475	427	708	601	199	179	241	204
944	802	572	486	776	698	512	435	144	129	145	123
541	486	556	500	773	695	599	509	79	71	232	197
671	570	766	651	663	596	604	513	124	111	227	192

Figura 3. Poblaciones iniciales aleatorias por cada variable

Paso 2: calcular $f(x_1), \dots, f(x_n)$ (función objetivo), se calcula $n = 10$ veces para cada solución (individuo), ver figura 4.

RESULTADOS DEL MODELO										
COSTO TOTAL DE COMPRA:	17100	129350	180750	260250	283100	357750	438250	525000	604900	704600
COSTO TOTAL DE PROCESAMIENTO:	41428	47116	45352	43712	45040	44654	43120	43026	42470	46640
COSTO TOTAL DE TRANSPORTE:	32107	33207	33216	33019	29071	31836	26983	29836	30189	29885
COSTO TOTAL DE MANTENER EN INVENTARIO:	590	9424	12705	10625	11193	11439	7121	7244	4888	7421
COSTO TOTAL DE RECOLECCION:	28500	28500	28500	28500	28500	28500	28500	28500	28500	28500
El valor de la función objetivo es:	119725	247597	300523	376106	396904	474179	543974	633606	710947	817046
Probabilidades de selección:	2.59110E	2.67926E	0.02167E	2.03493E	1.71797E	1.71037E	1.68182E	1.71407E	1.70960E	1.76826E
Padres:	2.67926	2.59110	Posición:		1	0	Aleatorio			
<input type="button" value="Aceptar"/>										

Figura 4. Presentación de la función objetivo

Paso 3: $t=t+1$; aplicar los procedimientos de (selección, cruce o mutación) generando una nueva población para cada variable $P' = \{x'_1, \dots, x'_m\}$, ver figura 5.

-

Figura 5. Nueva población mediante operador de cruzamiento por cada variable

Paso 4: reemplazar P por P'

Paso 5: si no se cumple un criterio de optimalidad ir al paso 3

3.3.1 Definición del cromosoma: Representación de la solución

En este caso cada cromosoma representa una variable del modelo, que está dado en cantidades numéricas.

Para la estructura de los individuos en la solución del problema, se especifican gráficamente las convenciones que se tienen para el desarrollo del algoritmo, de la siguiente forma:

En la cadena genética se representa cada variable, ver figura 6, la cadena está conformada por:

m Cromosomas: cantidad de elementos de la población (soluciones), $m=10$ para el conjunto inicial de soluciones.

n Genes: representan las cantidades procesadas del producto A y B en el periodo 1 y cantidades procesadas del producto A y B en el periodo 2, consecutivamente. Para este algoritmo se tuvo en cuenta que $n=4$ cantidades posibles según las condiciones del modelo.

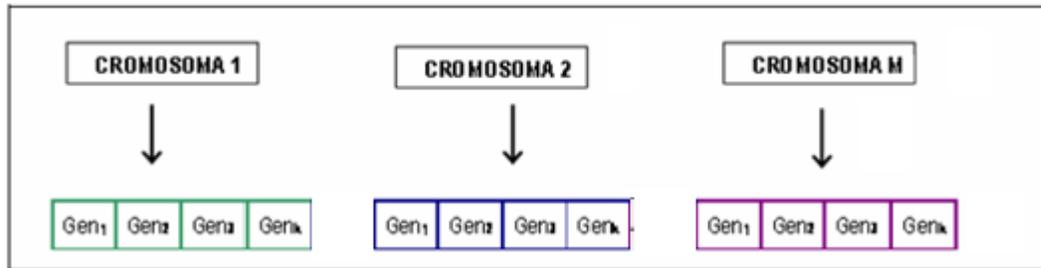


Figura 6. Estructura de los individuos.

Por ejemplo, para QPk_m_z que es la cantidad procesada en la planta k de producto m en el periodo z ; el programa de visual basic despliega una matriz con varios cromosomas como la que se presenta a continuación y su representación se muestra en la figura 7:

Cant procesada PI 1

487	438	768	652
786	707	595	505
Prod A	Prod B	Prod A	Prod B
Per 1	Per 1	Per 2	Per2

Figura 7. Representación del Cromosoma en VB

Lo que se representa el cromosoma anterior (cada fila de la matriz), son las cantidades procesadas de: producto A en el periodo1, producto B en el periodo 1, producto A en el periodo 2 y producto B en el periodo 2, todas estas en la planta 1. En la figura 8, se observa una matriz de $n=10$ filas, ya que este es el número de cromosomas calculado de acuerdo al tamaño de la población inicialmente definido. Esta representación es similar para las otras 9 variables (matrices) calculadas.

Cant procesada PI 1

487	438	768	652
786	707	595	505
745	670	481	408
749	674	456	387
735	661	898	763
778	700	574	487
648	583	545	463
707	636	765	650
770	693	474	402
462	415	711	604

Figura 8. Cromosoma desplegado en VB.

3.3.2 Generación de la población inicial

Para crear un cromosoma, se utiliza una técnica de generación de números aleatorios propia del lenguaje Visual Basic®, que consiste en la utilización de la función Rnd junto a Randomize, la cual asegura que cada número generado sea diferente, debido a que esta función utiliza como número semilla la hora del sistema.

El cromosoma generado aleatoriamente es un arreglo o vector de tamaño fijo, y corresponde a una solución inicial del problema formulado, (que no necesariamente es buena o la mejor) de modo que cumpla con las restricciones del modelo formulado. Una vez que se asegura que el cromosoma

generado cumple con dichas restricciones, éste se introduce en una matriz de número fijo de renglones y de columnas equivalente al tamaño de cada vector generado. Antes de ingresar el vector a la matriz, se evalúa que éste no sea igual a uno que ya se haya ingresado previamente en la matriz, en caso de que éste no sea el primero (si es el primero no necesita hacer esta evaluación). La generación de la población termina cuando se ha llenado toda la matriz con los cromosomas, ver figura 9, la cual se convierte en la población inicial a partir de la cual se realizarán las subsiguientes operaciones; es decir, se realizan los procedimientos que generan la población inicial para cada variable a calcular, y cada una hace parte de la función objetivo.

Cant trans de May 1 a Min

175	157	71	60
185	166	170	144
188	169	210	178
99	89	90	76
103	92	142	120
131	117	93	79
199	179	241	204
144	129	145	123
79	71	232	197
124	111	227	192

Figura 9. Población inicial
“Cantidad transportada de
Mayorista 1 a Minoristas”

Fuente: El autor

3.3.3 Operador de cruce

Realiza el cruzamiento de los todos los individuos de la población por un punto, y realiza el procedimiento del elitismo, guardando la información de los mejores individuos para compararlos en la siguiente generación. Se plantean cuatro cruces entre individuos (cromosomas) por un punto, y esta operación genera un cruce entre genes uno a uno así: para la primera mitad del primer cromosoma padre y la última mitad del segundo cromosoma padre, para la última mitad del primer cromosoma padre y la primera mitad del segundo cromosoma padre, para la primera mitad del primer cromosoma padre y la primera mitad del segundo cromosoma padre y por último, para la última mitad del primer cromosoma padre y la última mitad del segundo cromosoma padre.

Entonces se toman dos soluciones que se denominan soluciones padre que ya han sido seleccionadas y se realizan los cuatro cruces por un punto, esto si la probabilidad de cruzamiento: P_c se encuentra entre los rangos determinados para esta operación; es decir, se identifican las dos mayores probabilidades calculadas mediante la función fitness en el proceso de selección, éstas se asocian a los cromosomas que representan las cantidades con menor valor en la función objetivo y se realiza su cruzamiento. Esto se realiza para cada matriz que representa una población inicial, es decir, para el total de las 10 variables a calcular.

Se toman dos cromosomas que se denominan soluciones padre.

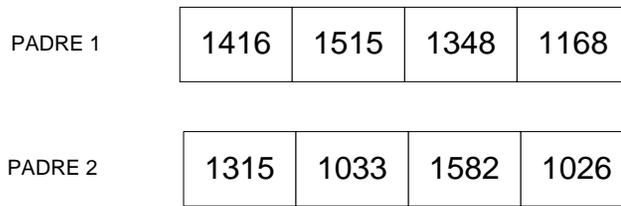


Figura 10. Cromosomas Padre. Fuente: El autor

Se selecciona una sección consecutiva de genes del padre 1 y se copia directamente al hijo, en este caso, se le asignan las dos primeras posiciones del padre 1 a la primera mitad del cromosoma hijo.

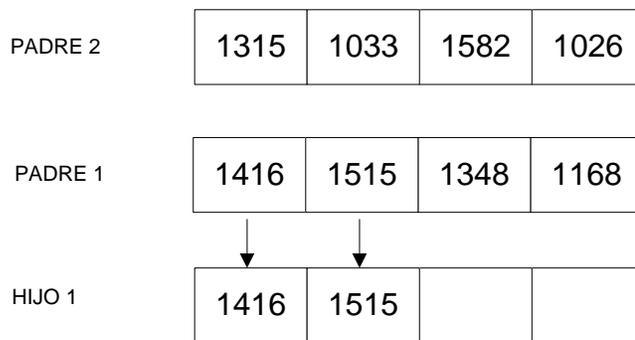


Figura 11. Primer paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Se selecciona la segunda sección consecutiva de genes del padre 2 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos siguientes posiciones del padre 2 a la segunda mitad del cromosoma hijo, así:

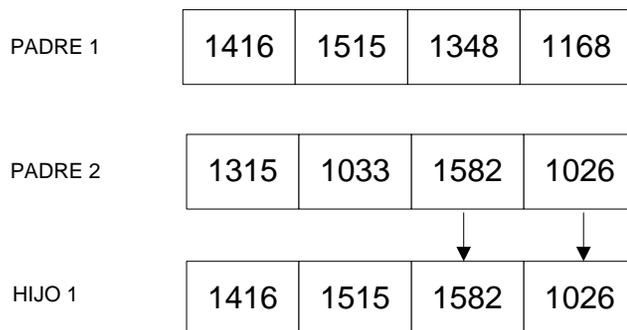


Figura 12. Segundo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Luego, para generar el segundo hijo se selecciona la segunda sección consecutiva de genes del padre 1 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos últimas posiciones del padre 1 a la primera mitad del cromosoma hijo.

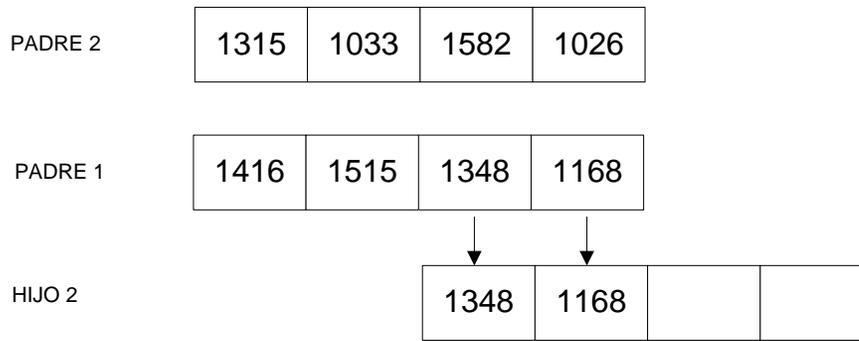


Figura 13. Tercer paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Se selecciona la primera sección consecutiva de genes del padre 2 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos primeras posiciones del padre 2 a la segunda mitad del cromosoma hijo, así:

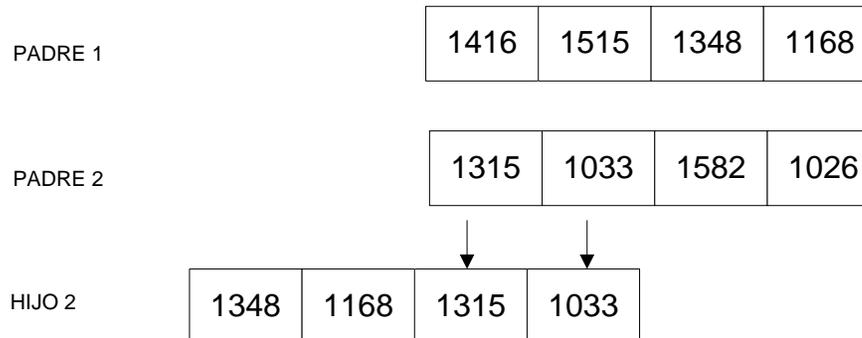


Figura 14. Cuarto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Posteriormente, para generar el tercer hijo se selecciona la primera sección consecutiva de genes del padre 1 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos primeras posiciones del padre 1 a la primera mitad del cromosoma hijo.

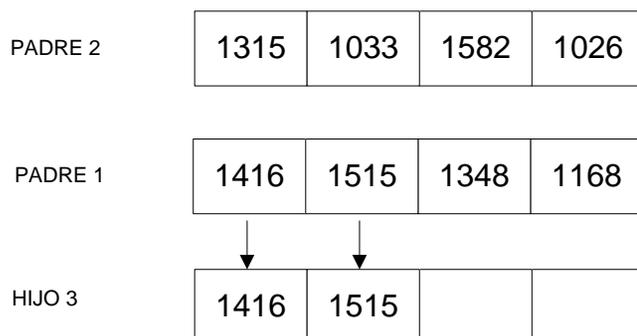


Figura 15. Quinto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Se selecciona la primera sección consecutiva de genes del padre 2 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos primeras posiciones del padre 2 a la segunda mitad del cromosoma hijo, así:

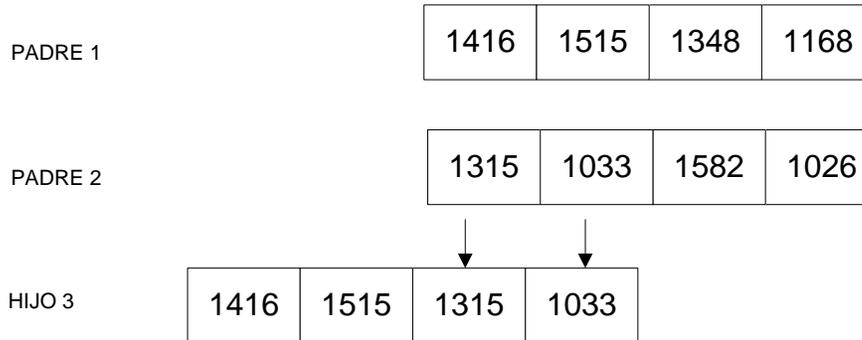


Figura 16. Sexto paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Por último, para generar el cuarto hijo se selecciona la segunda sección consecutiva de genes del padre 1 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos últimas posiciones del padre 1 a la primera mitad del cromosoma hijo.

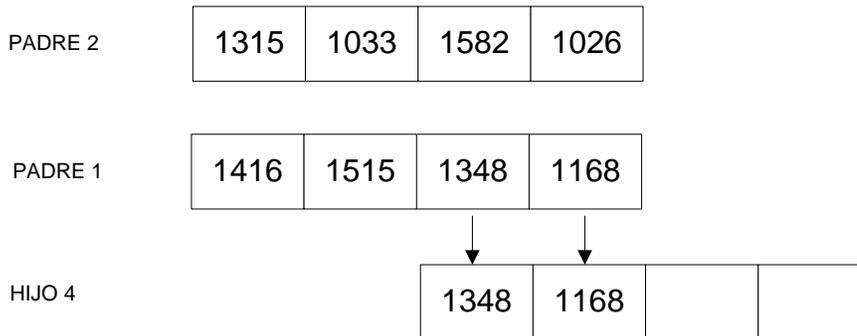


Figura 17. Séptimo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Se selecciona la segunda sección consecutiva de genes del padre 2 y se copia directamente al hijo, es decir, se le asignan las dos últimas posiciones del padre 2 a la segunda mitad del cromosoma hijo, así:

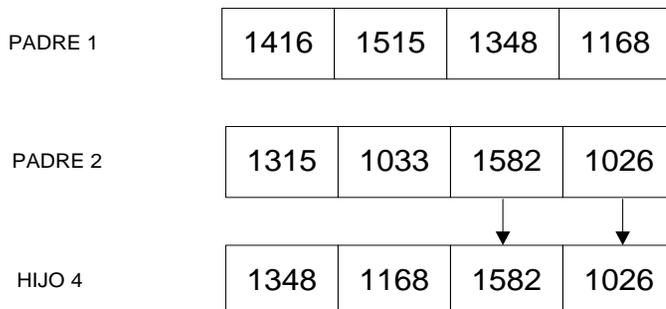


Figura 18. Octavo paso del cruzamiento por un punto. Fuente: El autor

Del proceso se obtienen las soluciones hijo:

HIJO 1	1416	1515	1582	1026
HIJO 2	1348	1168	1315	1033
HIJO 3	1416	1515	1315	1033
HIJO 4	1348	1168	1582	1026

Figura 19. Cromosomas hijo

3.3.4 Operador de mutación

Si la probabilidad de mutación generada: P_m se encuentra entre los rangos determinados para esta operación entonces se utiliza el operador de mutación por intercambio. Consiste en intercambiar dos posiciones del vector (cromosoma), de la siguiente manera: la primera con la tercera posición, la tercera con la última posición, etc. De modo que el material genético de cada uno de ellos es modificado.

Los cromosomas que mutarán son los que presentaron menor valor en la función objetivo después del proceso de selección y cambiarán como se muestra en la figura:

La posición número uno con la número tres y la posición número dos con la número cuatro como se muestra en la figura 20.

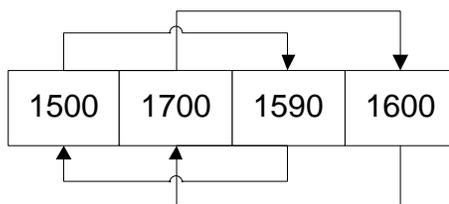


Figura 20. Cromosomas antes de la mutación. Fuente: El autor

Dando como resultado:

1590	1600	1500	1700
------	------	------	------

Figura 21. Cromosomas después de la mutación. Fuente: El autor

3.3.5 Pasos del algoritmo

En la figura 22 se presenta un diagrama de flujo del algoritmo propuesto, los números en los procesos corresponden a los pasos que se explican a continuación.

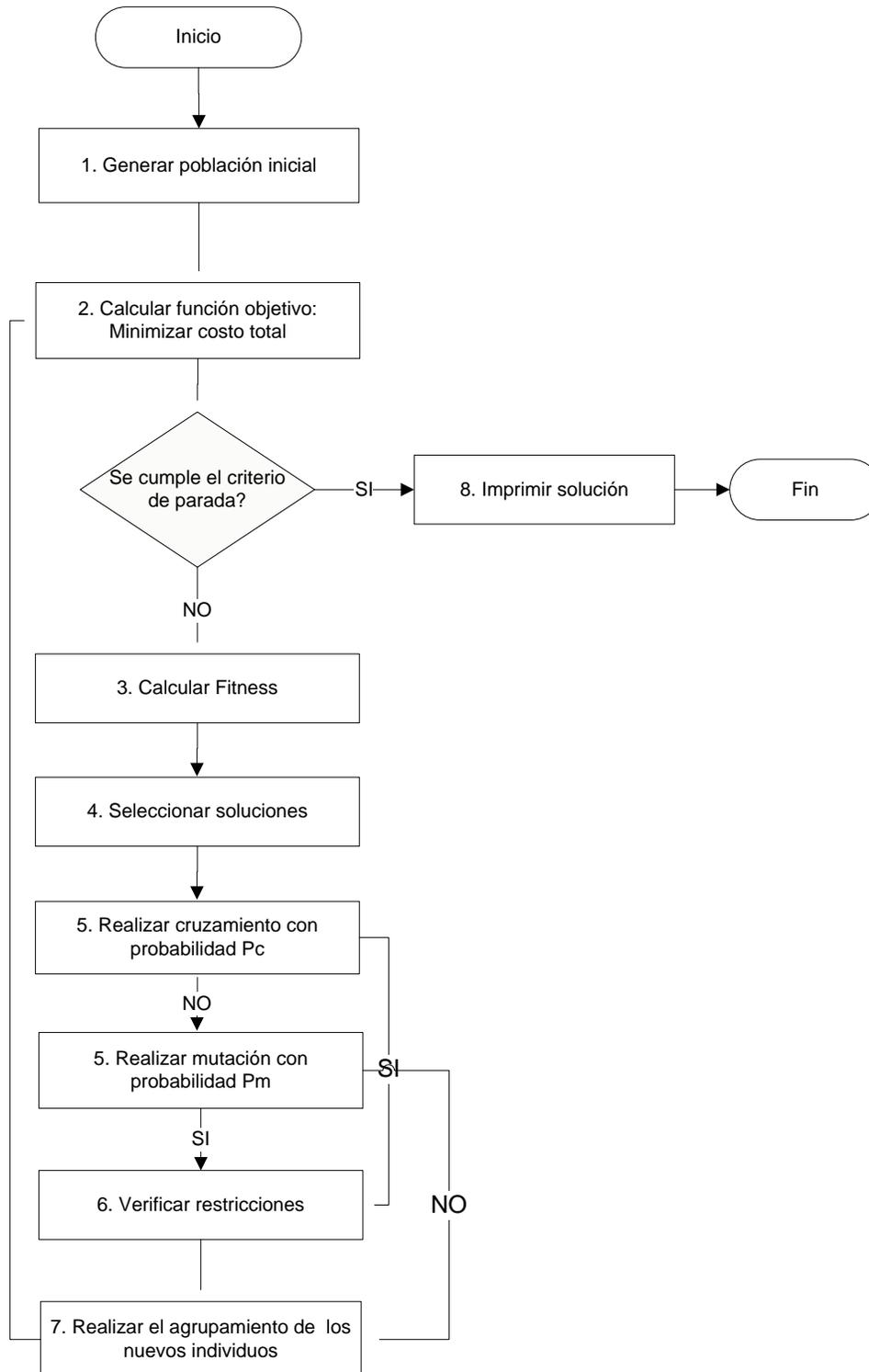


Figura 22. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto. Fuente: el autor

Paso 1. Generar la población inicial. Se generan tantas soluciones como el tamaño seleccionado de población inicial. Los cromosomas iniciales que contienen las cantidades válidas (variables de decisión), se generan de forma aleatoria y son generados por medio de vectores que validan que estos cromosomas estén dentro del rango permitido y determinado por las restricciones del modelo.

Paso 2. Calcular función objetivo. La función objetivo consiste en minimizar el costo total. Una vez que se obtienen los cromosomas iniciales se realiza la sumatoria del producto obtenido de cada variable a calcular por su costo unitario. Se calcula la sumatoria de todos los costos del modelo así (ver numeral 3.2.3):

$$\text{Minimizar } TC = TRCC + TPUC + TPC + TCCPTC + TPDTC + TDWTC + TWRTC + TCCIC \\ + TPIC + TDIC + TWIC + TRIC$$

Este procedimiento se repite hasta que se alcance el número de generaciones establecido (criterio de parada).

Paso 3. Calcular fitness. El fitness para una solución de la población se calcula a partir de una fórmula matemática. Al tener un conjunto de soluciones, que se denominan población:

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, x_m \in S \subset Z$$

y que cada una de ellas (denominadas individuos) tiene un valor de la función objetivo

$$f(x_1), \dots, f(x_n)$$

Ya que la función objetivo consiste en minimizar el costo, se elegirá para reproducirse a los cromosomas con más baja probabilidad. Entonces entre menor sea $f(x_n)$, se obtiene una menor probabilidad p_m , por la cual x_n será elegido para reproducirse. En este sentido, una manera sencilla de representación es la siguiente:

$$p_m = \frac{f(x_n)}{\sum_{j=1}^m f(x_j)}$$

Se debe garantizar que los mejores individuos tienen una mayor posibilidad de ser padres (reproducirse) frente a los individuos menos buenos. De tal forma, hay que ser cuidadosos para dar una oportunidad de reproducirse a los individuos menos buenos. Éstos pueden incluir material genético útil en el proceso de reproducción (Solano-Charris, 2008).

Paso 4. Seleccionar individuos. La selección es el mecanismo por el cual soluciones más próximas al óptimo (individuos mejor adaptados) tienen mayor probabilidad de sobrevivir y ser elegidos (seleccionados) para reproducirse (Solano-Charris, 2008). La selección de los individuos de la población inicial está limitada por el tamaño de la población y el cumplimiento de las restricciones planteadas en el modelo propuesto. Se seleccionan los dos mayores probabilidades del cálculo del fitness, es decir, se seleccionan los individuos con mejor valor de fitness. Estas

probabilidades representan cromosomas (dos del total de cada población) que proporcionan los mejores resultados en la función objetivo –minimización de costo total- para llegar a convertirse en los cromosomas padres.

Paso 5. Recombinar las soluciones. Aplicar los operadores de cruce o mutación sobre los individuos teniendo en cuenta las probabilidades respectivas.

Paso 6. Verificar cumplimiento de restricciones. Se evalúa sí después de las operaciones anteriormente ejecutadas los cromosomas hijo cumplen con las restricciones del modelo formulado y siendo aprobado se toma como una solución.

Paso 7. Realizar el agrupamiento de los nuevos individuos. Se seleccionan y copian los nuevos individuos resultantes del paso 6 y se agrupan por variables en cada matriz, después se debe regresar al paso 2, es decir, se realiza una nueva iteración donde se calcula de nuevo la función objetivo.

Paso 8. Imprimir solución. Este procedimiento se realiza hasta que se alcance el número de generaciones establecido (criterio de parada). Una vez se alcanza, se debe imprimir una solución y se establece como la solución resultante del experimento.

3.4 Conclusiones del capítulo

A la empresa manufacturera de neumáticos ubicada en el sur de La India se le propone un modelo de cadena de suministro de ciclo cerrado, en el cual una cadena tradicional de distribución multi-eslabón e inventario se integra con una cadena de suministro inversa de distribución multi-eslabón e inventario, con el fin de minimizar el costo total.

Este modelo es usado para optimizar la distribución y el nivel de inventario para una cadena de suministro de logística inversa usando algoritmos genéticos con el fin de minimizar el costo total, que comprende: costos de compra, producción, distribución e inventario. Solamente la operación de reciclaje es considerada en la logística inversa.

Se programa el algoritmo con la herramienta de programación Visual Basic® (VB), donde se deben tener en cuenta los parámetros de entrada, la definición del cromosoma, la generación de la población, el cálculo de la función objetivo, el operador de selección, el operador de cruzamiento y el operador de mutación, esto incluye la definición de la probabilidad de cruzamiento y de la probabilidad de mutación y también del número de generaciones permitidas. Las probabilidades de cruzamiento a evaluar son tres: 0,7, 0,8 y 0,9 con tres probabilidades de mutación: 0,05, 0,1 y 0,2 para tres diferentes generaciones: 50, 100 y 125.

En este caso, cada cromosoma representa una variable del modelo, que está dado en cantidades numéricas. Para crear un cromosoma, se utiliza una técnica de generación de números aleatorios propia del lenguaje Visual Basic®. El cromosoma generado aleatoriamente es un arreglo o vector de tamaño fijo, y corresponde a una solución inicial del problema formulado, (que no necesariamente es buena o la mejor) de modo que cumpla con las restricciones del modelo formulado. Este se introduce en una matriz de número fijo de renglones y de columnas equivalente al tamaño de cada vector generado. La generación de la población termina cuando se ha llenado

toda la matriz con los cromosomas, la cual se convierte en la población inicial a partir de la cual se realizarán las subsiguientes operaciones.

Si la probabilidad de cruzamiento: P_c , se encuentra entre los rangos determinados para esta operación, se toman dos soluciones que se denominan soluciones padre que ya han sido seleccionadas y se ejecutan los cuatro cruces por un punto. Al mismo tiempo, se realiza un procedimiento de elitismo, guardando la información de los mejores individuos para compararlos en la siguiente generación. Se plantean cuatro cruces entre individuos (cromosomas) por un punto, y esta operación genera un cruce entre genes uno a uno así: para la primera mitad del primer cromosoma padre y la última mitad del segundo cromosoma padre, para la última mitad del primer cromosoma padre y la primera mitad del segundo cromosoma padre, para la primera mitad del primer cromosoma padre y la primera mitad del segundo cromosoma padre y por último, para la última mitad del primer cromosoma padre y la última mitad del segundo cromosoma padre.

Si la probabilidad de mutación generada: P_m se encuentra entre los rangos determinados para esta operación entonces se utiliza el operador de mutación por intercambio. Consiste en intercambiar dos posiciones del vector (cromosoma), es decir, la primera con la tercera posición, la tercera con la última posición, etc. De modo que el material genético de cada uno de ellos es modificado.

Por último, los pasos definidos para el desarrollo del algoritmo son: Generación de la población inicial, Cálculo de la función objetivo, Cálculo del fitness, Selección de individuos, Recombinación de las soluciones, Verificación del cumplimiento de restricciones, Realización del agrupamiento de los nuevos individuos e Impresión de la solución.

Capítulo 4. Diseño y análisis experimental

El diseño experimental se define como una metodología estadística para la planificación y el análisis de un experimento. Su utilidad radica en que permite evaluar diferentes situaciones para una variable determinada, brindando información estadísticamente válida mientras se realiza una adecuada gestión de los recursos.

Un diseño experimental está conformado por una serie de factores, los cuales influyen en una variable de respuesta establecida. La combinación de diferentes niveles de dichos factores se conoce como tratamiento.

Existen unos requerimientos para llevar a cabo un diseño experimental, entre los que se encuentran la asignación aleatoria de tratamientos a las unidades experimentales, un tamaño de muestra representativo y adecuado para el tipo de experimento, la comprobación de los supuestos para un diseño experimental y finalmente, la comparación de los resultados obtenidos al aplicar cada uno de los tratamientos.

Para este estudio en particular el diseño planteado es un diseño factorial, el cual según McGuijan (1996), se define como: “un diseño en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes,”. Esta definición establece que los diseños factoriales se utilizan para manipular las variables independientes simultáneamente y permiten evaluar por separado los efectos de cada variable independiente al igual que la interacción entre ellas. Un diseño factorial puede utilizar dos o más variables independientes con cualquier cantidad de niveles o valores para determinar estadísticamente sus efectos (Mongomery, 2008). En conclusión, el objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores (Gutierrez, 2008).

El diseño experimental que se presenta es un diseño factorial 3^3 , es decir, de tres factores y tres niveles para cada factor tal y como se muestra en la Tabla 1. La variable de respuesta es el costo total el cual será minimizado.

Tabla 1. Factores y niveles para el diseño factorial 3^3

Factores	Notación	Valores		
Número de generaciones	Ngen	50	100	125
Probabilidad de cruce	Pc	0,7	0,8	0,9
Probabilidad de mutación	Pm	0,05	0,1	0,2

4.1 Prueba Piloto

Para llevar a cabo la prueba piloto se realizaron 4 réplicas para los 9 tratamientos por cada factor, como son 3 factores se tiene un total de 108 corridas. En el Anexo 2 se muestran los resultados del diseño factorial 3^3 para la prueba piloto (Gutierrez, 2008), se presenta una tabla con el costo total por cada número de generaciones Ngen, probabilidad de cruzamiento Pc, probabilidad

de mutación Pm y ZRE 1 con los residuos estudentizados del modelo, todos estos obtenidos mediante el software estadístico SPSS Statistics®. Este software se encarga de generar el cálculo de los valores estadísticos, de acuerdo al modelo planteado, que son necesarios para la interpretación de los resultados del diseño experimental.

Con la prueba piloto se busca verificar los supuestos del diseño experimental los cuales se cumplen en su mayoría. Se cumple con el supuesto de normalidad de los residuos estudentizados, que se prueba a continuación con el test de Kolmogorov-Smirnov, el cual es el supuesto más importante. El supuesto de correlación con el tiempo se cumple, lo que indica que el tiempo u orden de las corridas no afecta la ejecución del diseño. Por último, se aplica la prueba de Levene para verificar la homogeneidad de las varianzas, las cuales resultaron no homogéneas, debido a la alta variabilidad de los datos. Sin embargo, el incumplimiento de este supuesto no es tan grave, debido a que los tamaños de muestra son iguales para las observaciones de los factores con el mismo número de niveles.

Por otro lado, esta ejecución inicial sirvió para observar también las posibles interacciones entre los factores y sus respectivos niveles, lo cual se presenta mediante un análisis de varianza ANOVA en la tabla 6, en la cual se observa que al menos uno de los factores causa un efecto y que la interacción de los factores: Ngen*Pm y/o sus respectivos niveles, genera un efecto en la variable de respuesta. Sin embargo, esto se debe probar con contrastes, en este caso de Bonferroni, ya que es un contraste planeado.

Para demostrar la validez del experimento se verificarán los siguientes supuestos:

1. Normalidad de residuos estandarizados
2. Correlación en el tiempo
3. Homogeneidad de varianzas

A continuación se presenta la comprobación de los supuestos:

4.1.1 Normalidad

Mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov se realiza la siguiente prueba de hipótesis para comprobar la normalidad de los residuos:

H_0 : Los residuos estandarizados de la muestra provienen de una población con distribución normal.

H_1 : Los residuos estandarizados de la muestra no provienen de una población con distribución normal.

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0
Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 2. Prueba de normalidad de residuos estandarizados

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra		Residuo estandarizado para CostoMin
N		108
Parámetros normales ^{a,b}	Media	,0000
	Desviación típica	,87006
	Absoluta	,063
Diferencias más extremas	Positiva	,063
	Negativa	-,055
Z de Kolmogorov-Smirnov		,650
Sig. asintót. (bilateral)		,792

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Al realizar esta prueba se tiene un p-value de 79.2% (tabla 2), el cual es mayor al nivel de significancia del 5%, se concluye que no se rechaza la hipótesis nula, lo que quiere decir que los residuos tienen un comportamiento normal con media relativamente cercana a cero y varianza constante.

Esto quiere decir que el ANOVA es robusto, ya que tener residuos normales indica que lo que queda después del modelo es ruido blanco, y que la variabilidad que se presenta en el experimento es debido al error aleatorio inherente al sistema, el cual no se puede eliminar completamente, pero que no influye de manera significativa en el resultado del experimento.

4.1.2 Correlación en el tiempo

Mediante la prueba de correlación se pueden comprobar las siguientes hipótesis:

H_0 : Los errores no están correlacionados con el tiempo

H_1 : Los errores están asociados con el tiempo.

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0

Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 3. Prueba de correlación en el tiempo

Correlaciones		ID	Residuo estandarizado para CostoMin
ID	Correlación de Pearson	1	-,012
	Sig. (bilateral)		,899
	N	108	108
Residuo estandarizado para CostoMin	Correlación de Pearson	-,012	1
	Sig. (bilateral)	,899	
	N	108	108

Esta prueba arroja un p-value de 0.899 (tabla 3); como se tiene una significancia mayor que 0.05, entonces no se rechaza H_0 . Por lo tanto, se concluye que no existe una correlación de los errores en el tiempo.

4.1.3 Homogeneidad de varianzas

Se ejecuta la prueba de Levene para igualdad de varianzas. Del mismo modo que para el caso anterior, para demostrar la homogeneidad de varianzas se realiza la prueba de hipótesis para comprobar si las varianzas son iguales:

$$H_0: \sigma_1 = \sigma_2$$

$$H_1: \sigma_1 <> \sigma_2$$

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0
Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 4. Prueba de homogeneidad de varianzas
Variable dependiente: CostoMin

F	gl1	gl2	Sig.
5,443	26	81	0,000

Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error^a

a. Diseño: Intersección + Ngen + Pc + Pm + Ngen * Pc + Ngen * Pm + Pc * Pm + Ngen * Pc * Pm

Al realizar la prueba de Levene el nivel de significancia obtenido es menor que 0.05 (relativamente cercano a cero), ver tabla 4, por lo cual, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las varianzas de los grupos son diferentes; es decir, existe una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos. Esto se debe a la alta variabilidad de los datos. Sin embargo, el incumplimiento de este supuesto no representa un problema grave, debido a que los tamaños de muestra son iguales para las observaciones de los factores con el mismo número de niveles como se muestra a continuación:

Tabla 5. Número de observaciones para cada factor
Según el No de niveles de cada uno

Factores inter-sujetos		N
	50	36
Ngen	100	36
	125	36
	,70	36
Pc	,80	36
	,90	36
	,05	36
Pm	,10	36
	,20	36

En la tabla ANOVA se observa que el factor número de generaciones tiene un efecto sobre la variable de respuesta; por el contrario, la probabilidad de cruzamiento y la probabilidad de mutación, no generan efecto. Además, si se observan las interacciones entre los factores, se concluye preliminarmente que solamente se presenta efecto en la variable de respuesta por la interacción de los factores número de generaciones y probabilidad de mutación con sus respectivos niveles; sin embargo, esto se debe probar mediante un contraste de bonferroni, ya que se trata de un contraste planeado.

Tabla 6. ANOVA Prueba Piloto

Pruebas de los efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: CostoMin					
Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	26367194188,667 ^a	26	1014122853,410	2,344	,002
Intersección	2966047611200,127	1	2966047611200,127	6855,396	,000
Ngen	4766367057,722	2	2383183528,861	5,508	,006
Pc	232984132,167	2	116492066,083	,269	,765
Pm	559181762,667	2	279590881,333	,646	,527
Ngen * Pc	1588022998,111	4	397005749,528	,918	,458
Ngen * Pm	9788990126,611	4	2447247531,653	5,656	,000
Pc * Pm	4053057158,667	4	1013264289,667	2,342	,062
Ngen * Pc * Pm	5378590952,722	8	672323869,090	1,554	,152
Error	35045366372,250	81	432658844,102		
Total	3027460171761,000	108			
Total corregida	61412560560,917	107			

a. R cuadrado = ,429 (R cuadrado corregida = ,246)

4.2 Tamaño de muestra

Para definir un tamaño de muestra, se utiliza la siguiente fórmula con la cual se calcula el tamaño de muestra por cada tratamiento del factor que se está evaluando:

$$r = 2v\sigma^2\Phi^2/\Delta^2$$

donde:

v: El número de tratamientos o niveles del factor

σ : Varianza del ruido

Φ : Combinación de potencia, significancia, tratamientos y réplicas

Δ : Mínima diferencia detectable

Reemplazando los valores de $v = 3$ (los tres diferentes factores), $\sigma^2 = 432658844$ unidades cuadradas, se ha definido una potencia del 98% y un nivel de significancia del 5% para hallar Φ entonces el valor exacto de $\Phi = 2,55$ (valor obtenido de la tabla con $v_1 = v-1=3-1=2$ y v_2 grande la primera vez, es decir, 1000) y $\Delta=18000$ rupias, la cual es la diferencia mínima detectable de 18000 rupias en el costo total (variable de respuesta). Por lo tanto, el tamaño de muestra r viene dado por:

$$r = 2(3)(432658844)(2,55)^2/(18000)^2$$
$$r = 52,09 \approx 52$$

Para la segunda iteración se toma el valor de $v_1=2$ nuevamente y $v_2 = v(r-1) = 3(52-1) = 3(51) = 153,29$ y se calcula nuevamente el valor de Φ para la potencia y significancia estipulada. Este valor se halla por interpolación y da como resultado el valor de 2.58.

$$r = 2(3)(432658844)(2,58)^2/(18000)^2$$
$$r = 53,45 \approx 54$$

Al definir nuevamente el valor de Φ con base a los valores de v_1 y v_2 provenientes de la tabla, se observa que este valor es el mismo $\Phi = 2.58$; por lo tanto, no se sigue iterando ya que r se estabiliza y se concluye que un tamaño de muestra adecuado para este factor de número de generaciones es 54. Lo mismo se afirma para los otros dos factores: probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación, donde ambos factores también tienen tres niveles.

4.3 Análisis de resultados teniendo en cuenta el tamaño de muestra

Para llevar a cabo el experimento se realizaron 18 réplicas para un total de 54 datos por tratamiento y teniendo en cuenta que son 9 tratamientos por cada factor, se tiene un total de 162 datos por nivel del factor, luego al tener 3 factores se obtiene un total de 486 corridas, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Distribución tamaño de muestra Ngen*Pc

Recuento	Pc			Total
	0,7	0,8	0,9	
50	54	54	54	162
100	54	54	54	162
Ngen 125	54	54	54	162
Total	162	162	162	486

En el anexo 3, se muestran los resultados del diseño factorial 3^3 para el experimento (Gutierrez, 2008) con el tamaño de muestra anteriormente calculado, esta tabla presenta el costo mínimo total por cada número de generaciones Ngen, probabilidad de cruzamiento Pc, probabilidad de mutación Pm y ZRE 1 son los residuos estandarizados del modelo, estos últimos fueron obtenidos mediante el software estadístico SPSS Statistics®.

4.3.1 Comprobación de supuestos del diseño experimental

Se deben comprobar nuevamente los tres supuestos para validar el diseño experimental:

Normalidad

Mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov se plantean las siguientes hipótesis para comprobar la normalidad de los residuos:

H_0 : Los residuos estandarizados de la muestra provienen de una población con distribución normal.

H_1 : Los residuos estandarizados de la muestra no provienen de una población con distribución normal.

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0
Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 8. Prueba de normalidad de residuos estandarizados para el diseño experimental

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra		Residuo estandarizado para CostoMin
N		486
Parámetros normales ^{a,b}	Media	,0000
	Desviación típica	,97283
	Absoluta	,059
Diferencias más extremas	Positiva	,040
	Negativa	-,059
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,310
Sig. asintót. (bilateral)		,064

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Al realizar esta prueba se tiene un p-value de 6.4%, ver tabla 8 , el cual es mayor al nivel de significancia del 5%, se concluye que no se rechaza la hipótesis nula, lo que quiere decir que los residuos tienen un comportamiento normal con media relativamente cercana a cero y varianza constante.

Entonces se tiene un ANOVA robusto, ya que tener residuos normales indica que lo que queda después del modelo es ruido blanco y la variabilidad que se presenta en el experimento es debido al error aleatorio inherente al sistema, el cual no se puede eliminar completamente, pero que no influye de manera significativa en el resultado del experimento.

Prueba de correlación

Mediante la prueba de correlación se pueden comprobar las siguientes hipótesis:

H_0 : Los errores no están correlacionados con el tiempo

H_1 : Los errores están asociados con el tiempo.

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0

Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 9. Prueba de correlación en el tiempo para el diseño experimental

Correlaciones			
		ID	Residuo estandarizado para CostoMin
ID	Correlación de Pearson	1	-.006
	Sig. (bilateral)		.886
	N	486	486
Residuo estandarizado para CostoMin	Correlación de Pearson	-.006	1
	Sig. (bilateral)	.886	
	N	486	486

Esta prueba arroja un p-value de 0.886, ver tabla 9; como se tiene una significancia mayor que 0.05, entonces no se rechaza H_0 . Por lo tanto, se concluye que no existe una correlación de los errores en el tiempo.

Homogeneidad de varianzas

Se ejecuta la prueba de Levene para igualdad de varianzas. Del mismo modo que para el caso anterior, para demostrar la homogeneidad de varianzas se realiza la prueba de hipótesis para comprobar si las varianzas son iguales:

H_0 : $\sigma_1 = \sigma_2$

H_1 : $\sigma_1 \neq \sigma_2$

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H_0

Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H_0

Tabla 10. Prueba de homogeneidad de varianzas para el diseño experimental

Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error^a

Variable dependiente: CostoMin

F	gl1	gl2	Sig.
4,989	26	459	,000

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos.

a. Diseño: Intersección + Ngen + Pc + Pm + Ngen * Pc + Ngen * Pm + Pc * Pm + Ngen * Pc * Pm

Al realizar la prueba de Levene el nivel de significancia obtenido es menor que 0.05 (relativamente cercano a cero), ver tabla 10, por lo cual, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las varianzas de los grupos son diferentes; es decir, existe una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos. Esto se debe a la alta variabilidad de los datos. Sin embargo, el incumplimiento de este supuesto no representa un problema grave, debido a que los tamaños de muestra son iguales para las observaciones de los factores con el mismo número de niveles.

4.3.2 Interacciones entre factores

En esta etapa, se construyó una tabla ANOVA para interacciones con el fin de definir qué interacciones entre los factores son estadísticamente significativas o relevantes. Como primera medida, se verifica si existe interacción estadísticamente significativa entre cada uno de los factores. Para esto, se realiza la siguiente prueba de hipótesis:

H₀: No hay factores que causen un efecto en la variable de respuesta

H₁: Por lo menos existe un factor causa un efecto en la variable

Si significancia (valor p) < 5%: Rechazo H₀
Si significancia (valor p) > 5%: No Rechazo H₀

Tabla 11. ANOVA para el diseño experimental completo.

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: CostoMin

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	50205622188,44 ^a	26	1930985468,786	3,152	,000
Intersección	12559294632149,980	1	12559294632149,980	20499,225	,000
Ngen	606148392,975	2	303074196,488	,495	,610
Pc	7208164498,370	2	3604082249,185	5,883	,003
Pm	3226252086,901	2	1613126043,451	2,633	,073
Ngen * Pc	1546739002,210	4	386684750,552	,631	,640
Ngen * Pm	20810429322,865	4	5202607330,716	8,492	,000
Pc * Pm	2107951403,914	4	526987850,978	,860	,488
Ngen * Pc * Pm	14699937481,210	8	1837492185,151	2,999	,003
Error	281216308025,556	459	612671695,045		
Total	12890716562364,000	486			
Total corregida	331421930214,000	485			

a. R cuadrado = ,151 (R cuadrado corregida = ,103)

En la tabla ANOVA anterior se observa que el nivel de significancia del modelo corregido es inferior al 0.05, por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula; es decir, hay por lo menos un factor que causa un efecto en la variable de respuesta. En especial, la tabla ANOVA muestra que el factor probabilidad de cruzamiento Pc produce un efecto, mientras que los factores: número de generaciones y probabilidad de mutación no producen efecto sobre la variable de respuesta.

Por otro lado, se observa que existen interacciones estadísticamente significativas entre los factores: 1) número de generaciones y probabilidad de mutación y 2) número de generaciones, probabilidad de cruzamiento y probabilidad de mutación. Como el objetivo de este es experimento es estudiar el efecto de varios factores sobre el costo total, en este caso, la variable de respuesta. Las interacciones que se tienen planeadas a demostrar y que son de mayor interés, son las que se presentan entre número de generaciones y probabilidad de cruzamiento y número de generaciones y probabilidad de mutación; estas se analizarán más en detalle por medio del uso de contrastes de Bonferroni, debido a que estos se tenían planeados antes de la ejecución del experimento y de la recolección de los datos.

4.3.3 Medias de cada factor

Al analizar las medias por factor se encuentra que no hay diferencia significativa para el costo mínimo entre las tres generaciones comparadas, es decir, no hay un efecto del factor Ngen sobre el costo mínimo. La variable de respuesta: costo total que ha sido minimizado, oscila entre 159285 y 161990 rupias, para el número de generaciones de 100 y 125, respectivamente, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 12. Medias de costo mínimo para Ngen
CostoMin

DHS de Tukey

Ngen	N	Subconjunto	
		1	
100	162	159284,66	
50	162	160990,77	
125	162	161989,57	
Sig.			0,588

En la tabla 13, se muestra que no hay diferencia significativa para el costo mínimo entre las probabilidades de cruzamiento de 0,8 y 0,9, pero la probabilidad de cruzamiento igual a 0,7 tiene un costo mínimo mayor equivalente a 165978 rupias, el cual es estadísticamente diferente al de las probabilidades de cruzamiento de 0,8 y 0,9, siendo de 156807 y 159480 rupias, respectivamente.

Tabla 13. Medias de costo mínimo para Pc
CostoMin

DHS de Tukey

Pc	N	Subconjunto	
		1	2
0,8	162	156807,05	
0,9	162	159479,72	
0,7	162		165978,23
Sig.		0,595	1

En cuanto al factor probabilidad de mutación Pm, este no tiene efecto sobre el costo total, ya que, no existe diferencia significativa de la variable de respuesta para las tres diferentes probabilidades de mutación. El costo total para la Pm de 0,05 es el más alto siendo igual a 164315 rupias, seguido por el costo de Pm de 0,10 igual a 159645 rupias y, por último, el costo más bajo lo presenta la Pm de 0,2 igual a 158304 rupias, como se observa en la tabla 14.

Tabla 14. Medias de costo total para Pm
CostoMin

DHS de Tukey

Pm	N	Subconjunto
		1
0,2	162	158304,24
0,1	162	159645,23
0,05	162	164315,52
Sig.		0,075

4.3.4 Contrastes de Bonferroni

A continuación, se presenta el análisis de aquellas interacciones que son de alto interés en el experimento con el fin de comprobar si son estadísticamente significativas.

Para efectuar estos contrastes, como se observa en la tabla ANOVA a continuación, se tienen en cuenta solamente dos interacciones a estudiar, en donde se observa que la interacción número de generaciones y probabilidad de mutación (Ngen* Pm) es estadísticamente significativa:

Tabla 15. ANOVA teniendo en cuenta solo interacciones Ngen*Pc y Ngen *PM

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: CostoMin

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	33397733303,321 ^a	14	2385552378,809	3,770	,000
Intersección	12559294632150,002	1	12559294632150,002	19848,817	,000
Ngen	606148392,975	2	303074196,488	,479	,620
Pc	7208164498,370	2	3604082249,185	5,696	,004
Pm	3226252086,901	2	1613126043,451	2,549	,079
Ngen * Pm	20810429322,865	4	5202607330,716	8,222	,000
Ngen * Pc	1546739002,210	4	386684750,552	,611	,655
Error	298024196910,679	471	632747764,142		
Total	12890716562364,000	486			
Total corregida	331421930214,000	485			

a. R cuadrado = ,101 (R cuadrado corregida = ,074)

En la siguiente figura, se muestra el resultado del efecto de la interacción de Ngen vs Pc sobre las medias de la variable de respuesta, donde se presenta un comportamiento creciente del costo total para la probabilidad de cruzamiento de 0,7 en las tres diferentes generaciones. Se presentan los menores valores del costo total, para Pc de 0,8 y Pc de 0,9 en 100 generaciones y, en general, la Pc

de 0,8 es la que logra mantener un menor valor del costo total. También se observa que existe una interacción entre Ngen y Pc, y por medio de un contraste no planeado se demuestra estadísticamente esta interacción.

Figura 23. Interacciones entre Ngen * Pc

Teniendo en cuenta el error y la media cuadrática presentados en la tabla ANOVA anterior, con las interacciones significativas a estudiar y las medias para cada combinación de número de generaciones y probabilidad de cruzamiento mostradas en la tabla a continuación, se calculan los resultados del contraste que se presenta en la tabla 17:

Tabla 16. Medias para la interacción Ngen*Pc

5. Ngen * Pc

Variable dependiente: CostoMin

Ngen	Pc	Media	Error tip.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
50	,70	163033,889	3423,091	156307,469	169760,308
	,80	157722,796	3423,091	150996,377	164449,216
	,90	162215,611	3423,091	155489,192	168942,031
100	,70	166499,407	3423,091	159772,988	173225,827
	,80	155650,481	3423,091	148924,062	162376,901
	,90	155704,093	3423,091	148977,673	162430,512
125	,70	168401,407	3423,091	161674,988	175127,827
	,80	157047,870	3423,091	150321,451	163774,290
	,90	160519,444	3423,091	153793,025	167245,864

Tabla 17. Resultados Contraste Bonferroni para la interacción Ngen*Pc

Contraste Bonferroni Ngen*Pc	
Contraste	(50 gen con Pc 0,7- 100 gen con Pc 0,7)- (50 gen con Pc 0,9-100 gen con Pc 0,9)
Contraste	(t11-t21)-(t13-t23)
Ciyi	-9977,036
n-v	471
alfa/2m	0,0125
t	2,284
MSE	632747764,142
MSE*sum Ci cuad/ri	15623401,584
varianza	3952,645
t*varianza	9027,175
Lim. superior	-949,861
Lim. inferior	-19004,211

Como el límite superior y el inferior son negativos, al 95% de confianza existe una diferencia estadística significativa con respecto al costo total entre 50 y 100 generaciones y para las probabilidades de cruzamiento equivalentes a 0,7 y 0,9. Es decir, que el costo total depende del número de generaciones y la probabilidad de cruzamiento.

Al mismo tiempo, se presenta la interacción entre Ngen vs Pm. En la figura 24, se evidencia el resultado del efecto de la interacción de Ngen vs Pm sobre las medias de la variable de respuesta y se observa que los menores valores de costo total están dados por la Pm de 0,10 en 125 generaciones y por la Pm de 0,2 en 100 generaciones. Para la Pm de 0,05 se observa el mayor costo total en 125 generaciones. También se infiere que existe una interacción entre Ngen y Pm, ya que el factor numero de generaciones, tiene un efecto positivo o negativo sobre el costo total, dependiendo del nivel del factor probabilidad de mutación y por medio de un contraste no planeado se demuestra estadísticamente esta interacción.

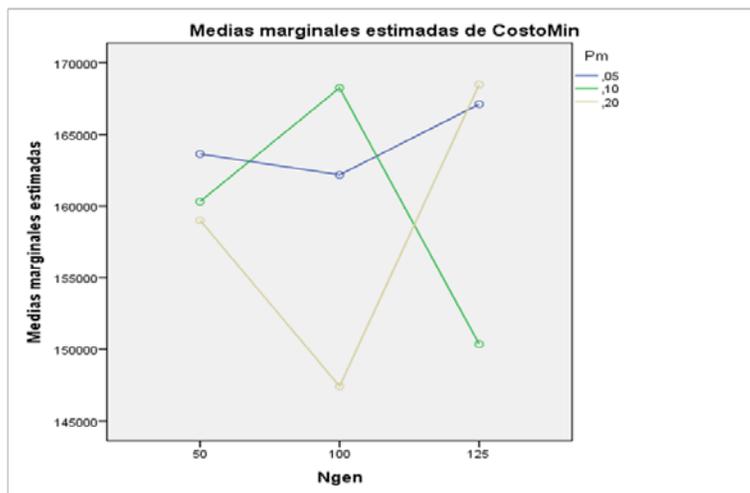


Figura 24. Interacciones entre Ngen y Pm

Teniendo en cuenta el error y la media cuadrática presentados en la tabla 15, con las interacciones significativas a estudiar y las medias para cada combinación de número de generaciones y probabilidad de mutación mostradas en la tabla a continuación, se calculan los resultados del contraste que se presenta en la tabla 19:

Tabla 18. Medias para la interacción Ngen*Pm

4. Ngen * Pm

Variable dependiente: CostoMin

Ngen	Pm	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
50	,05	163645,204	3423,091	156918,784	170371,623
	,10	160314,333	3423,091	153587,914	167040,753
	,20	159012,759	3423,091	152286,340	165739,179
100	,05	162183,759	3423,091	155457,340	168910,179
	,10	168259,741	3423,091	161533,321	174986,160
	,20	147410,481	3423,091	140684,062	154136,901
125	,05	167117,611	3423,091	160391,192	173844,031
	,10	150361,630	3423,091	143635,210	157088,049
	,20	168489,481	3423,091	161763,062	175215,901

Tabla 19. Resultados Contraste Bonferroni para la interacción Ngen*Pm

Contraste Bonferroni Ngen*Pm	
Contraste	(100 gen con Pm 0,05- 125 gen con Pm 0,05)- (100 gen con Pm 0,1-125 gen con Pm 0,1)
Contraste	(t21-t31)-(t22-t32)
Ciyi	-22831,963
n-v	471
alfa/2m	0,0125
t	2,284
MSE	632747764,142
MSE*sum Ci cuad/ri	15623401,584
varianza	3952,645
t*varianza	9027,175
Lim. superior	-13804,788
Lim. inferior	-31859,138

Como el límite superior y el inferior son negativos, al 95% de confianza existe una diferencia estadística significativa con respecto al costo total entre 100 y 125 generaciones y para las

probabilidades de mutación equivalentes a 0,05 y 0,1. Es decir, que el costo total depende del número de generaciones y la probabilidad de mutación.

4.4 Comportamiento del algoritmo

En las siguientes figuras se muestra el desempeño del algoritmo en términos de la función objetivo evaluada, con el fin de encontrar la convergencia del costo mínimo total con respecto al número de generaciones. En este caso, las soluciones seleccionadas para mostrar el desempeño del algoritmo son las correspondientes a las filas 39, 107 y 153 de la tabla 21, ver anexo3, que representan la probabilidad de cruzamiento de 0,7 con las tres diferentes probabilidades de mutación.

Las soluciones generadas al ser sometidas a los operadores del algoritmo genético no muestran un efecto de convergencia como se muestra en la figura 25. Al tomar $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,2$, se observa que la solución mejora a medida que se somete a los operadores del algoritmo genético, pero se presenta el caso contrario en $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,1$, donde la solución inicial desmejora con el paso de las generaciones. El valor del costo mínimo al oscila entre 132467 y 177456 rupias, para $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,05$ y $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,1$, respectivamente.

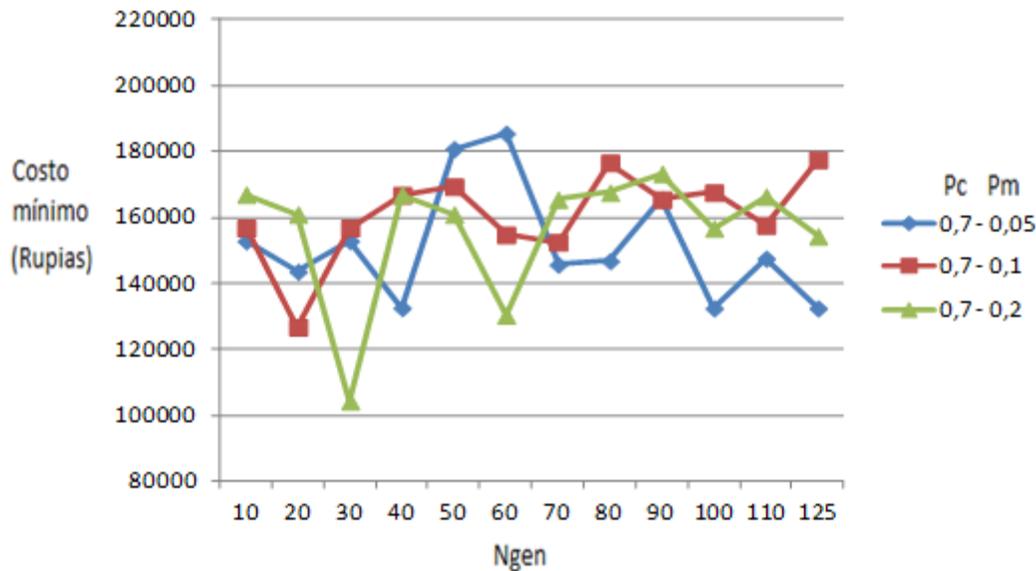


Figura 25. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para $P_c= 0,7$

Para la probabilidad de cruzamiento de 0,8 con las tres diferentes probabilidades de mutación, se seleccionaron las soluciones correspondientes a las filas 363,416 y 472 de la tabla 21, ver anexo 3. Las soluciones generadas al ser sometidas a los operadores del algoritmo genético muestran un efecto de convergencia a partir de 80 generaciones como se observa en la figura 26. En el caso de $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,05$, se observa que la solución mejora a medida que se somete a los operadores del algoritmo genético, pero se presenta el caso opuesto en $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,2$, donde la solución inicial desmejora con el paso de las generaciones. El valor del costo mínimo, al converger varía entre 131389 y 166099 rupias, para $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,05$ y $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,1$, respectivamente.

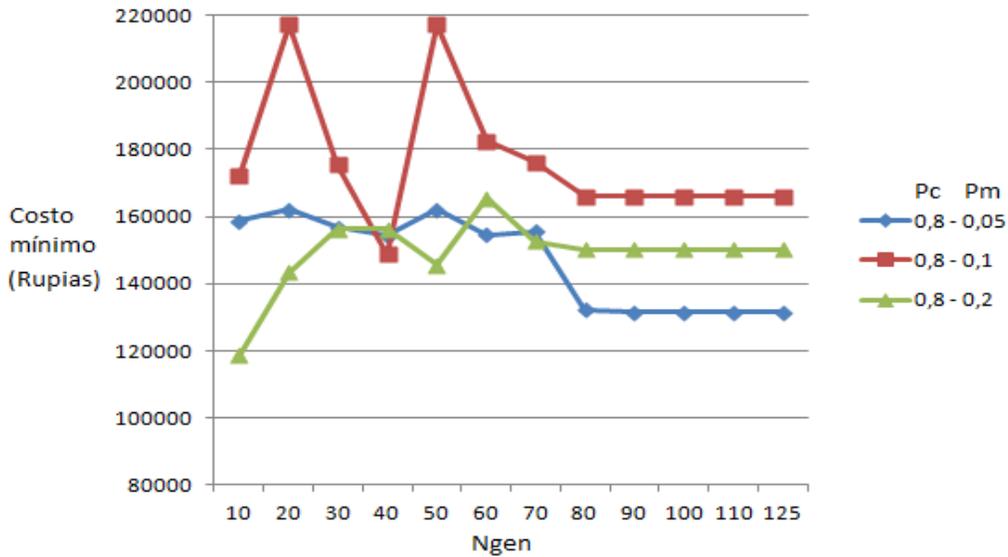


Figura 26. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para $P_c = 0,8$

Por último, las soluciones seleccionadas para mostrar el desempeño del algoritmo con la probabilidad de cruzamiento de 0,9 y las tres diferentes probabilidades de mutación, son las correspondientes a las filas 209,267 y 310 de la tabla 21, ver anexo 3.

Las soluciones generadas al ser sometidas a los operadores del algoritmo genético se estabilizan a partir de 80 generaciones como se observa en la figura 27. En el caso de $P_c = 0,9$ con $P_m = 0,1$ se observa que la solución tiende a mejorar a medida que se somete a los operadores del algoritmo genético, pero se presenta el caso contrario en $P_c = 0,9$ con $P_m = 0,05$, donde la solución inicial desmejora con el paso de las generaciones. El valor del costo mínimo al converger oscila entre 134500 y 152435 rupias, para $P_c = 0,9$ con $P_m = 0,1$ y $P_c = 0,9$ con $P_m = 0,05$, respectivamente.

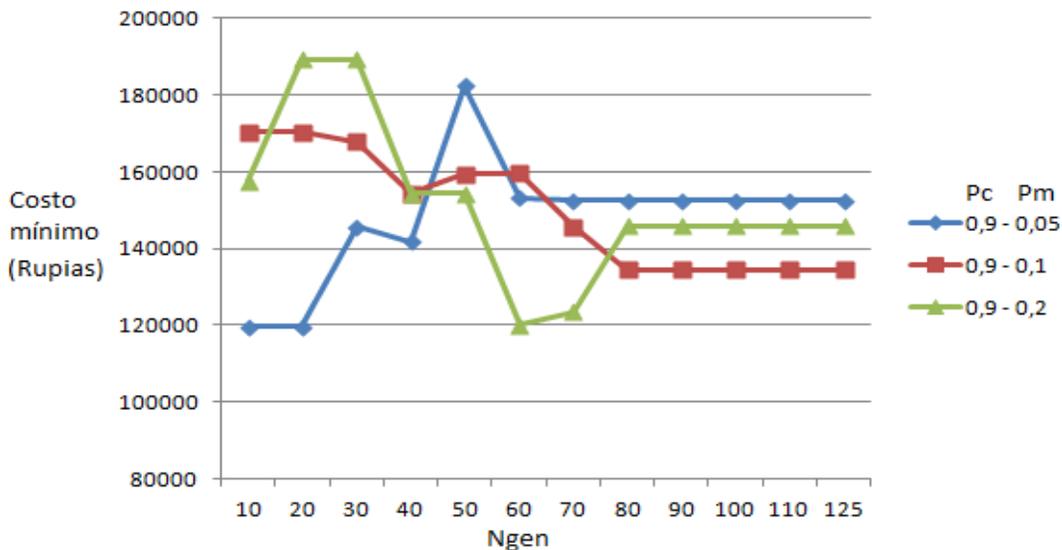


Figura 27. Desempeño del algoritmo en términos de costo mínimo para $P_c = 0,9$

4.5 Porcentaje de variación de resultados

Como se observa en la tabla 20, los resultados obtenidos en la presente investigación tienen una alta variabilidad con respecto al valor del mínimo costo obtenido en cada tratamiento evaluado (combinaciones de factores y sus niveles).

El cálculo del porcentaje de variación sigue la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \left[\left(\frac{\text{Costo total de la réplica } i}{\text{Mínimo Costo total del tratamiento}} \right) - 1 \right] \times 100$$

Donde:

r = Número de réplicas

Mínimo costo total del tratamiento = $\text{Min } r(\text{Costo total de las réplicas})$

Entonces primero se toma cada costo total de cada réplica y se divide cada uno por el mínimo costo encontrado en éste tratamiento para calcular un coeficiente de variación con respecto al mínimo costo obtenido y, a éste coeficiente se le calcula el porcentaje de variación.

Posteriormente se calcula el promedio de los porcentajes de variación por cada tratamiento, en este caso, se obtienen 27 datos como se presentan en la tabla 20.

Al analizar los resultados, el menor porcentaje de variación con un valor de 8,58% por encima del mínimo costo total se presenta para 50 generaciones con probabilidad de cruzamiento de 0,7 y probabilidad de mutación de 0,05, seguido por 9,28% con probabilidad de cruzamiento de 0,9 y probabilidad de mutación de 0,05. Para 100 generaciones se tiene el porcentaje de variación más bajo con 9,22% con probabilidad de cruzamiento de 0,9 y probabilidad de mutación de 0,05 y para 125 generaciones se tienen porcentajes de variación más altos con respecto al valor del mínimo costo de cada tratamiento, el más bajo porcentaje de variación se presenta con un valor de 24,36% por encima del valor mínimo con probabilidad de cruzamiento de 0,9 y probabilidad de mutación de 0,05. Se puede inferir que a mayor probabilidad de cruzamiento y menor probabilidad de mutación se obtienen los menores porcentajes de variación por encima del valor del mínimo costo. También, se evidencia que la más alta variabilidad de los datos en cuanto a porcentajes de variación se presenta en 125 generaciones.

Tabla 20. Porcentaje de variación de los resultados

Promedio Porcentaje variación Número generaciones/Pmutación	Probabilidad de cruzamiento			
	0,7	0,8	0,9	Total
50	27,55%	39,36%	28,86%	31,92%
0,05	8,58%	16,78%	9,28%	11,54%
0,1	37,57%	53,41%	12,76%	34,58%
0,2	36,49%	47,88%	64,54%	49,64%
100	33,21%	54,71%	29,85%	39,26%
0,05	22,49%	51,01%	9,22%	27,57%
0,1	28,62%	61,97%	44,45%	45,01%

Promedio Porcentaje variación Número generaciones/Pmutación	Probabilidad de cruzamiento			
	0,7	0,8	0,9	Total
0,2	48,52%	51,15%	35,89%	45,19%
125	51,70%	52,41%	51,83%	51,98%
0,05	56,31%	63,99%	24,36%	48,22%
0,1	60,87%	43,28%	62,12%	55,42%
0,2	37,91%	49,96%	69,01%	52,29%
Total	37,48%	48,83%	36,85%	41,05%

4.6 Conclusiones del capítulo

Según el análisis ANOVA aplicado, el factor probabilidad de cruzamiento P_c produce un efecto, mientras que los factores: número de generaciones y probabilidad de mutación no producen efecto sobre la variable de respuesta.

Por otro lado, mediante los contrastes de Bonferroni se observa que existen interacciones estadísticamente significativas entre los factores: 1) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de cruzamiento: P_c y 2) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de mutación: P_m .

El efecto de la interacción de N_{gen} vs P_c sobre las medias de la variable de respuesta, muestra un comportamiento creciente del costo total para la probabilidad de cruzamiento de 0.7 en las tres diferentes generaciones. Se presentan los menores valores del costo total, para P_c de 0,8 y P_c de 0,9 en 100 generaciones y, en general, la P_c de 0,8 es la que logra mantener un menor valor del costo total. Al 95% de confianza existe una diferencia estadística significativa con respecto al costo total entre 50 y 100 generaciones y para las probabilidades de cruzamiento equivalentes a 0,7 y 0,9. Es decir, que el costo total depende del número de generaciones y la probabilidad de cruzamiento.

Se comprueba la interacción entre N_{gen} y P_m , ya que el factor número de generaciones, tiene un efecto positivo o negativo sobre el costo total, el cual varía dependiendo del nivel del factor probabilidad de mutación. Además, el efecto de la interacción de N_{gen} vs P_m sobre las medias de la variable de respuesta muestra que los menores valores de costo total están dados por la P_m de 0,10 en 125 generaciones y por la P_m de 0,2 en 100 generaciones. Para la P_m de 0,05 se observa el mayor costo total en 125 generaciones. También se infiere que al 95% de confianza existe una diferencia estadística significativa con respecto al costo total entre 100 y 125 generaciones y para las probabilidades de mutación equivalentes a 0,05 y 0,1. Es decir, que el costo total depende del número de generaciones y la probabilidad de mutación.

En cuanto a la eficiencia del algoritmo en términos de la función objetivo evaluada, se muestra el mínimo costo total para cada generación en tres casos específicos; para las probabilidades de cruzamiento correspondientes a 0,7, 0,8 y 0,9 con las tres diferentes probabilidades de mutación y se encuentra que en dos de los tres casos presentados (ver figuras 27 y 28), las soluciones generadas al ser sometidas a los operadores del algoritmo genético muestran un efecto de convergencia a partir de 80 generaciones.

No se observa una tendencia definida, en los casos presentados, a que las soluciones mejoren o empeoren, ya que en ciertos casos el algoritmo parte de soluciones más satisfactorias que las que se obtienen después de someterlas a los operadores del algoritmo genético, como por ejemplo, en la

figura 25 al aplicar $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,1$, en la figura 26 al aplicar $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,2$ y en la figura 27 al aplicar $P_c= 0,9$ con $P_m= 0,05$. Por el contrario, están los casos de las soluciones que tienden a mejorar a medida que se somete a los operadores del algoritmo genético, como por ejemplo, en la figura 25 al tomar $P_c= 0,7$ con $P_m= 0,2$, en la figura 26 al tomar $P_c= 0,8$ con $P_m= 0,05$ y en la figura 27 al tomar $P_c= 0,9$ con $P_m= 0,1$.

Se observa alta variabilidad de los resultados en cuanto a los porcentajes de variación calculados partiendo del mínimo costo total de cada tratamiento. Se puede inferir que a mayor probabilidad de cruzamiento y menor probabilidad de mutación se obtienen los menores porcentajes de variación por encima del valor del mínimo costo.

Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas

5.1 Conclusiones

Se consideran aspectos ambientales en el diseño y gestión de la cadena de suministro por medio del análisis de un modelo matemático para una cadena de suministro inversa de distribución multi-eslabón e inventario, con el fin de minimizar el costo total mediante el uso de algoritmos genéticos. En donde, solamente la operación de reciclaje es considerada en la logística inversa.

Se implementa un algoritmo genético programado con la herramienta de programación Visual Basic® (VB), donde se tienen en cuenta los parámetros de entrada del problema, la definición del cromosoma, la generación de la población, el cálculo de la función objetivo, el operador de selección, el operador de cruzamiento y el operador de mutación, esto incluye la definición de la probabilidad de cruzamiento y de la probabilidad de mutación y también del número de generaciones permitidas. Las probabilidades de cruzamiento evaluadas son tres: 0,7, 0,8 y 0,9 con tres probabilidades de mutación: 0,05, 0,1 y 0,2 para tres diferentes generaciones: 50, 100 y 125.

Según el análisis de varianza ANOVA, el factor probabilidad de cruzamiento P_c produce un efecto, mientras que los factores: número de generaciones N_{gen} y probabilidad de mutación P_m no producen efecto sobre la variable de respuesta, por sí solos. Mediante los contrastes de Bonferroni se demuestran interacciones estadísticamente significativas entre los factores: 1) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de cruzamiento: P_c y 2) número de generaciones: N_{gen} y probabilidad de mutación: P_m .

El efecto de la interacción de N_{gen} vs P_c sobre las medias de la variable de respuesta, muestra un comportamiento creciente del costo mínimo para la probabilidad de cruzamiento de 0,7 en las tres diferentes generaciones. Se presentan los menores valores del costo mínimo, para P_c de 0,8 y P_c de 0,9 en 100 generaciones y, en general, la P_c de 0,8 es la que logra mantener un menor valor del costo mínimo. Lo que indica que a mayor probabilidad de cruzamiento se logran menores valores en el costo mínimo. También se infiere que el costo mínimo es afectado por el número de generaciones y la probabilidad de cruzamiento.

Se comprueba la interacción entre N_{gen} y P_m , ya que el factor número de generaciones, tiene un efecto positivo o negativo sobre el costo mínimo, el cual varía dependiendo del nivel del factor probabilidad de mutación. En el caso presentado, se observa que los menores valores de costo mínimo están dados por la P_m de 0,10 en 125 generaciones y por la P_m de 0,2 en 100 generaciones. Para la P_m de 0,05 se observa el mayor costo mínimo en 125 generaciones. Lo que indica que una menor probabilidad de mutación logra mayores valores en el costo mínimo. En este caso se muestra igualmente que el costo mínimo depende del número de generaciones y la probabilidad de mutación.

En cuanto a la eficiencia del algoritmo en términos de la función objetivo evaluada, se muestra el costo mínimo total para cada generación en tres casos específicos; para las probabilidades de cruzamiento correspondientes a 0,7, 0,8 y 0,9 con las tres diferentes probabilidades de mutación y se encuentra que en dos de los tres casos presentados (ver figuras 27 y 28), las soluciones generadas al ser sometidas a los operadores del algoritmo genético muestran un efecto de convergencia a partir de 80 generaciones. Antes de 80 generaciones en todos los casos, se observa que los resultados no tienen una tendencia definida, a que las soluciones mejoren o empeoren, ya que en ciertos casos el

algoritmo parte de soluciones menos satisfactorias que las que se obtienen después de someterlas a los operadores del algoritmo genético y viceversa.

5.2 Perspectivas de investigación

El uso de los algoritmos genéticos en cadenas de suministro de ciclo cerrado ofrece muchas posibilidades de trabajo por la diversidad de variaciones y diversos campos de acción que se pueden tomar. Por ejemplo, para aumentar la complejidad del problema no sólo se debe seleccionar el reciclaje como operación de logística de reversa, también se pueden considerar casos de estudios que contemplen la viabilidad económica en cuanto al:

- Control, clasificación y disposición para determinar la condición del producto y la opción de re-uso, económicamente más atractiva.
- Rehabilitación para permitir la opción más atractiva económicamente: la reutilización directa, reparación, reconstrucción, reciclaje o disposición.

Al mismo tiempo, se puede introducir complejidad al modelo mediante el uso de demandas probabilísticas que harían el problema más cercano a la realidad y la variación del tamaño de las poblaciones generadas.

En el caso del problema de optimización estudiado una posible variación al algoritmo genético consiste en seleccionar otra forma de medir la adaptación de los individuos (fitness), ya que este factor define las soluciones que pasarán a la siguiente generación. Como se garantiza que los mejores individuos tengan una mayor posibilidad de ser padres (reproducirse) frente a los individuos no tan buenos; también, deberían tener una oportunidad de reproducción, los individuos menos buenos. Éstos pueden incluir material genético útil en el proceso de reproducción. Por lo cual, debe buscarse otra función de adaptación o de selección que logre este cometido.

Por otro lado, como el problema presentado es de naturaleza NP-duro es recomendable el uso de otras estrategias metaheurísticas para obtener soluciones razonablemente buenas sin explorar todo el espacio de soluciones y tener un punto de comparación en cuanto a la eficiencia de los métodos de solución. Sería útil proponer un nuevo método de solución como, por ejemplo, la metaheurística de GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) que construye soluciones usando una aleatoriedad controlada mediante una función voraz, además incluye una búsqueda local que se usa para mejorar las soluciones generadas con el método ávido- aleatorio. De esta forma, se pueden comparar los tiempos de cálculo entre algoritmos genéticos y GRASP para saber qué método de solución es más eficiente y aportar con un nuevo método de aproximación para dar solución al problema presentado en este trabajo de grado.

Referencias

- Barbosa-Póvoa, A.P. (2009). Sustainable Supply Chains: Key Challenges, 10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A, 27, 127-132.
- Beamon, B.M., Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning and Control* 15 (3), 270-281.
- Bloemhof-Ruwaard, J.M., Van Beek, P., Hordijk, L., Van Wassenhove, L.N. (1995). Interactions between operational research and environmental management. *European Journal of Operational Research* 85 (2), 229-243.
- Christmann, P. (2000). Effects of “best practices” of environmental management on cost advantage: the role of complimentary assets. *Academy of Management Journal* 43(4), 663-680.
- Desai, P., Riddlestone, S. (2002). “Bioregional Solutions for Living on one Planet”, Schumacher Briefing No.8, Green Books Ltd, Totnes.
- Dowlatshahi, S. (2000). Developing a theory of reverse logistics. *Interfaces* 30(3), 143-155.
- Dyckhoff, H., Lackes, R., Reese, J. (2004). *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds. H. Dyckhoff et al., Springer-Verlag, Berlin, 1-139.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J, Van Wassenhove, L.N. (1997). Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review. *European Journal of Operational Research* 103, 1-17.
- Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P. (2000). A Characterisation of Logistics Network for Product Recovery. *Omega* 28 (6), 653-666.
- Fleischmann, M. (2001). *Quantitative Models for Reverse Logistics*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 501, Springer-Verlag, Berlin.
- Fleischmann, M., Minner, S. (2003). “Inventory Management in Closed-Loop Supply Chains”, in *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds. H. Dyckhoff et al., Springer-Verlag, Berlin, 115-138.
- García, R., Servente, M., Pasquini, D. (2003). *Sistemas Inteligentes*. Editorial Nueva Librería, 149-280. ISBN No 987-1104-05-7.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, 412 .
- Guide, V.D.R, Harrison, T.P. (2003a). The Challenge of Closed-Loop supply chains. *Interfaces* 33(6), 3-6.
- Guide, V.D.R, Jayaraman, V. and Jonathan, D. (2003b). Linton Building contingency planning for closed loop supply chain with product recovery. *Journal of Operations Management*, 21, 259-279.
- Gutierrez, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mc Graw Hill, México.
- Halabi, A.X, Montoya-Torres, J.R, Pirachicán, C, Mejía, D. (2011). A modelling framework of reverse logistics practices in the Colombian plastic sector. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. Accepted January 2011.
- Haq, A.N. and Kannan, G. (2006). Design of integration of supplier selection and multi echelon distribution inventory model in a built-to-order supply chain environment. *International Journal of Production Research*, 44, 1963-1985.
- Hicks, C., Heidrich, O., McGovern, T. and Donnelly, T. (2004). A functional model of supply chains and waste. *International Journal of Production Economics*, 89, 165-174.
- Inderfurth, K. (2004). “Product Recovery Behavior in a Closed-Loop Supply Chain”, in *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds. H. Dyckhoff et al., Springer-Verlag, Berlin, 91-138.
- Kannan, G., Noorul Haq, A., Devika, M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. *International Journal of Production Research*, 47 (5), 1175-1200.
- Kannan, G., Sasikumar, P., Devika, K. (2010). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling* 34 (3), 655-670.
- McGuija, F.J. (1996). *Psicología experimental*. 6 Edición. Ed Prentice Hall. Hispanoamérica, México.

- Melián, B., Moreno, J. y Moreno, M. (2003). Metaheurísticas: una visión global. *Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, No.19, 7-28.
- Melnyk,S.A., Sroufe, R.P.,Calantone,R. (2003). Assessing the impact of environmental management systems on corporate and environmental performance. *Journal of Operations Management* 21(3),329-353.
- Minner, S. (2001). Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains. *International Journal of Production Economics*, 71, 417–428.
- Mitchell,M. (1998). *An introduction to Genetic Algorithms*.The MIT Press. ISBN 0-262-63185-7.
- Montgomery D.C. (2008). *Design and analysis of experiments*. Wiley Editors.
- Napalkova,L.,Merkuryeva, G.(2008). Theoretical Framework of Multi-objective simulation- based Genetic Algorithm for supply chain cyclic planning and optimization. Tenth International Conference on computer modeling and simulation, 467-474. ISBN No 0-7695-3114-8.
- Oliver,R., Webber.M. (1982). *Supply chain management: logistics catches up with the strategy*, eds. Christopher,M., *Logistics: The Strategic Issues*, Chapman & Hall, London, 63-75.
- Pacheco, A., Cruz, M.C. (2006). *Metodología crítica de La investigación. Lógica, procedimientos y técnicas*. CECSA.
- Papageorgiou,L. (2009). Supply chain optimization for the process industries: Advances and opportunities. In: *Computers & Chemical Engineering* 33(12), 1931-1938.
- Pirachican, C, Montoya-Torres, J.R, Halabi, A.X, Gutiérrez-Blanco, E, Aldaz, J. J. (2009). On the Analysis of Strategic and Operational Issues of Reverse Logistics Practices in Colombia: Presentation of Some Case Studies. *Proceedings of the 39th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, I. Kacem (ed.), Troyes, France, 981-984.
- Richter, K., Dobos, I. (2004). “Production-inventory control in an EOQ-type reverse logistics system”, in *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds.H. Dyckhoff et al., Springer-Verlag, Berlin, 139–160.
- Rogers,D. and Tibben-Lembke. (2007). RLEC: Reverse Logistics Executive Council. What is Reverse Logistics?, <http://www.rlec.org/glossary.html>, 01/29/2011.
- Russo,M.V.,Fouts,P.A. (1997). A resource-based perspective on corporate environmental performance and profitability. *Academy of Management Journal* 40(3), 534-559.
- Sbihi, A., Eglese, R. (2007). Combinatorial optimization and Green Logistics. *4OR A Quarterly Journal of Operational Research* 5(2), 99-116.
- Schultmann, F, MoZumkeller, M, Rentz,O. (2004). “Integrating spent product’s material into supply chains: The recycling of end-of-life vehicles as an example”, in *Supply Chain Management and Reverse Logistics*, eds.H. Dyckhoff et al., Springer-Verlag, Berlin, 35-59.
- Seuring, S, Sarkis, J, Müller, M, Rao, Purba. (2008). Sustainability and supply chain management – An introduction to the special issue. *Journal of Cleaner Production* 16 (15), 1545-1551.
- Solano-Charris, E. L. (2008). Tesis: Programación de Talleres de Producción Seriales Híbridos (Flexibles) con múltiples objetivos mediante el uso de Metaheurísticas: Colonias de Hormigas. Universidad del Norte, Barranquilla. Maestría en Ingeniería Industrial.
- Srivastava, S.K.(2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews* .9(1), 53–80.
- Sundarakani, B., De Souza, R., Goh, M., Wagner, S., Manikandan, S. (2010). Modeling carbon footprints across the supply chain. *International Journal of Production Economics* 128 (1), 43-50.
- Thierry, M.C. (1997). “An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies”, Ph.D. thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- Toktay, L.B., Wein, L.M. and Zenios, S.A. (2000). Inventory management of remanufacturable products. *Management Science*, 46, 1412–1426.
- Torre, P.L.G., Adenso-Díaz, B. and Artiba, H. (2004). Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of Production Economics*, 88, 95–104.

- Van Der Laan, E., Dekker, R., Salomon, M. and Ridder, A. (1996). An (s, Q) inventory model with remanufacturing and disposal. *International Journal of Production Economics*, 46-47,339–350.
- Wang, H.F., Hsu, H.W. (2010). A closed-loop logistic model with a spanning-tree based genetic algorithm. *Computers & Operations Research* 37 (2), 376-389.
- Wells,P.,Seitz,M. (2005). “Business models and closed-loop supply chains: a typology”. *Supply Chain Management: An international Journal* 10(4), 249-251.
- Wu, Z., Pagell,M. (2010). Balancing priorities: Decision-making in sustainable supply chain management. *Journal of Operations Management*. Forthcoming.
- Yolis, E. (2003). Algoritmos genéticos aplicados a la categorización automática de documentos. Tesis de grado en Ingeniería Informática. Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
- Zhu, Q., Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management* 22 (3), 265–289.

Anexo 1. Parámetros de entrada del algoritmo

Tabla 21. Capacidad de procesamiento (min)

Capacidad de Procesamiento (mins)	
Planta 1	35000
Planta 2	26000

Tabla 22. Tiempo de procesamiento/unidad (min)

Tiempo procesamiento/unidad (mins)		
Planta	Producto	
	A	B
Planta 1	10	12
Planta 2	12	12

Tabla 23. Capacidad de almacenamiento unidades/periodo

Capacidad de almacenamiento (Unidades/perio do)	Planta 1	Planta 2	CD1	CD2
	9000	8000	8000	7000
	Mayorista 1	Mayorista 2	Minorista 1	Minorista 2
	7000	6000	350	400

Tabla 24. Demanda del minorista unidades/periodo/producto

Minorista	1		2	
	A	B	A	B
1	200	150	210	160
2	190	240	100	250

Tabla 25. Cantidades devueltas de producto al centro de recolección

Cantidades devueltas de productos al CR		
Producto/ Periodo	A	B
1	300	200
2	200	250

Tabla 26. Costos de procesamiento por producto/ unidad

Costos de procesamiento (rupias) /unidad		
Producto/Planta	A	B
Planta 1	12	12
Planta 2	14	14

Tabla 27. Costos de transporte (rupias)

Costos de transporte (rupias) desde cada planta a cada CD	Costos de transporte (rupias) desde cada CD a cada Mayorista		Costos de transporte (rupias) desde cada CD a cada Mayorista		Costos de transporte (rupias) desde cada CD a cada Mayorista			
	CD1	CD2	May1	May2	Min1	Min2		
Planta 1	3	4	CD 1	2	1	May 1	2	1
Planta 2	5	3	CD 2	4	2	May 2	4	3

Tabla 28. Costos de recolección, compra y transporte desde CR a cada planta (rupias)

Costos de recolección (rupias)			Costo de compra MP (rupias)			Costos de transporte desde CR a cada planta (rupias)		
Producto/Periodo	A	B	Producto/Periodo	A	B	Periodo	1	2
1	30	30	1	50	50	Planta 1	3	3
2	30	30	2	50	50	Planta 2	2	2

Tabla 29. Costos de mantener inventarios en rupias

Costo de mantener inventarios		
Costo inventarios (rupias) / unidad		
Periodo	1	2
Planta 1	1	3
Planta 2	2	3
CD1	1	4
CD2	2	4
Mayorista1	1	5
Mayorista2	2	5
Minorista1	1	2
Minorista2	2	2
CR	1	2

Anexo 2. Datos Prueba Piloto

Tabla 30. Resultados Prueba Piloto

ID	Costo total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
1	180764	50	0,7	0,05	0,13
2	180764	50	0,7	0,05	0,13
3	175678	50	0,7	0,05	-0,12
4	175320	50	0,7	0,05	-0,14
5	223587	100	0,7	0,05	0,52
6	194570	100	0,7	0,05	-0,87
7	212678	100	0,7	0,05	0
8	220193	100	0,7	0,05	0,36
9	170594	125	0,7	0,05	1,21
10	166281	125	0,7	0,05	1
11	132467	125	0,7	0,05	-0,62
12	112334	125	0,7	0,05	-1,59
13	162135	50	0,7	0,1	-0,38
14	175280	50	0,7	0,1	0,25
15	161360	50	0,7	0,1	-0,42
16	181321	50	0,7	0,1	0,54
17	182473	100	0,7	0,1	0,92
18	174171	100	0,7	0,1	0,52
19	145670	100	0,7	0,1	-0,85
20	151300	100	0,7	0,1	-0,58
21	93110	125	0,7	0,1	-1,58
22	120099	125	0,7	0,1	-0,28
23	150488	125	0,7	0,1	1,18
24	140308	125	0,7	0,1	0,69
25	166945	50	0,7	0,2	0,45
26	142395	50	0,7	0,2	-0,73
27	172295	50	0,7	0,2	0,71
28	148320	50	0,7	0,2	-0,44
29	160961	100	0,7	0,2	0,32
30	160961	100	0,7	0,2	0,32
31	140350	100	0,7	0,2	-0,67
32	154700	100	0,7	0,2	0,02
33	219236	125	0,7	0,2	2,11
34	219236	125	0,7	0,2	2,11
35	130389	125	0,7	0,2	-2,16
36	132456	125	0,7	0,2	-2,06

ID	Costo total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
37	162155	50	0,9	0,05	0,1
38	161400	50	0,9	0,05	0,06
39	160260	50	0,9	0,05	0,01
40	156789	50	0,9	0,05	-0,16
41	173653	100	0,9	0,05	0,02
42	164271	100	0,9	0,05	-0,43
43	173653	100	0,9	0,05	0,02
44	181300	100	0,9	0,05	0,39
45	205136	125	0,9	0,05	2,49
46	145678	125	0,9	0,05	-0,37
47	130389	125	0,9	0,05	-1,11
48	132456	125	0,9	0,05	-1,01
49	152235	50	0,9	0,1	-0,66
50	170380	50	0,9	0,1	0,22
51	160460	50	0,9	0,1	-0,26
52	180421	50	0,9	0,1	0,7
53	184574	100	0,9	0,1	0,87
54	166171	100	0,9	0,1	-0,01
55	155770	100	0,9	0,1	-0,51
56	159290	100	0,9	0,1	-0,34
57	172585	125	0,9	0,1	0,4
58	173451	125	0,9	0,1	0,44
59	167467	125	0,9	0,1	0,15
60	143734	125	0,9	0,1	-0,99
61	162135	50	0,9	0,2	-0,08
62	157480	50	0,9	0,2	-0,3
63	154360	50	0,9	0,2	-0,45
64	181321	50	0,9	0,2	0,84
65	185974	100	0,9	0,2	0,91
66	156871	100	0,9	0,2	-0,49
67	165770	100	0,9	0,2	-0,06
68	159690	100	0,9	0,2	-0,36
69	189236	125	0,9	0,2	1,06
70	189236	125	0,9	0,2	1,06
71	144389	125	0,9	0,2	-1,1
72	145856	125	0,9	0,2	-1,03
73	162155	50	0,8	0,05	0,18
74	152300	50	0,8	0,05	-0,29
75	162155	50	0,8	0,05	0,18
76	156789	50	0,8	0,05	-0,08

ID	Costo total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
77	183653	100	0,8	0,05	0,23
78	163471	100	0,8	0,05	-0,74
79	183653	100	0,8	0,05	0,23
80	184350	100	0,8	0,05	0,27
81	215036	125	0,8	0,05	2,64
82	155678	125	0,8	0,05	-0,21
83	131389	125	0,8	0,05	-1,38
84	138256	125	0,8	0,05	-1,05
85	217200	50	0,8	0,1	1,02
86	217200	50	0,8	0,1	1,02
87	171380	50	0,8	0,1	-1,18
88	178321	50	0,8	0,1	-0,85
89	182503	100	0,8	0,1	0,47
90	174171	100	0,8	0,1	0,07
91	164670	100	0,8	0,1	-0,38
92	169300	100	0,8	0,1	-0,16
93	103110	125	0,8	0,1	-2,25
94	166089	125	0,8	0,1	0,78
95	166098	125	0,8	0,1	0,78
96	164308	125	0,8	0,1	0,69
97	156345	50	0,8	0,2	0,14
98	146395	50	0,8	0,2	-0,34
99	152095	50	0,8	0,2	-0,06
100	158920	50	0,8	0,2	0,26
101	178961	100	0,8	0,2	0,46
102	178961	100	0,8	0,2	0,46
103	159350	100	0,8	0,2	-0,49
104	160700	100	0,8	0,2	-0,42
105	172836	125	0,8	0,2	0,07
106	207636	125	0,8	0,2	1,74
107	154989	125	0,8	0,2	-0,79
108	150245	125	0,8	0,2	-1,02

Anexo 3. Datos del Diseño de experimentos con tamaño de muestra completo

Tabla 31. Resultados del diseño experimental con tamaño de muestra completo

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
1	180764	50	0,7	0,05	0,18
2	180764	50	0,7	0,05	0,18
3	175678	50	0,7	0,05	-0,03
4	175320	50	0,7	0,05	-0,04
5	162374	50	0,7	0,05	-0,56
6	180764	50	0,7	0,05	0,18
7	180764	50	0,7	0,05	0,18
8	171340	50	0,7	0,05	-0,2
9	181737	50	0,7	0,05	0,22
10	181737	50	0,7	0,05	0,22
11	180393	50	0,7	0,05	0,17
12	168790	50	0,7	0,05	-0,3
13	172765	50	0,7	0,05	-0,14
14	181737	50	0,7	0,05	0,22
15	181737	50	0,7	0,05	0,22
16	172345	50	0,7	0,05	-0,16
17	173265	50	0,7	0,05	-0,12
18	171209	50	0,7	0,05	-0,21
19	223587	100	0,7	0,05	2,31
20	194570	100	0,7	0,05	1,14
21	212678	100	0,7	0,05	1,87
22	220193	100	0,7	0,05	2,18
23	220193	100	0,7	0,05	2,18
24	157890	100	0,7	0,05	-0,34
25	162345	100	0,7	0,05	-0,16
26	142987	100	0,7	0,05	-0,94
27	147314	100	0,7	0,05	-0,77
28	147314	100	0,7	0,05	-0,77
29	139658	100	0,7	0,05	-1,08
30	147314	100	0,7	0,05	-0,77
31	147314	100	0,7	0,05	-0,77
32	163218	100	0,7	0,05	-0,13
33	147314	100	0,7	0,05	-0,77
34	136789	100	0,7	0,05	-1,19

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
35	147314	100	0,7	0,05	-0,77
36	135784	100	0,7	0,05	-1,23
37	170594	125	0,7	0,05	-0,2
38	166281	125	0,7	0,05	-0,38
39	132467	125	0,7	0,05	-1,74
40	112334	125	0,7	0,05	-2,56
41	123450	125	0,7	0,05	-2,11
42	207982	125	0,7	0,05	1,31
43	208670	125	0,7	0,05	1,34
44	207387	125	0,7	0,05	1,28
45	163096	125	0,7	0,05	-0,5
46	160010	125	0,7	0,05	-0,63
47	207387	125	0,7	0,05	1,28
48	187650	125	0,7	0,05	0,49
49	164780	125	0,7	0,05	-0,44
50	207302	125	0,7	0,05	1,28
51	164320	125	0,7	0,05	-0,46
52	162340	125	0,7	0,05	-0,54
53	207302	125	0,7	0,05	1,28
54	207345	125	0,7	0,05	1,28
55	162135	50	0,7	0,1	0,26
56	175280	50	0,7	0,1	0,79
57	161360	50	0,7	0,1	0,23
58	181321	50	0,7	0,1	1,04
59	159431	50	0,7	0,1	0,15
60	159431	50	0,7	0,1	0,15
61	113140	50	0,7	0,1	-1,72
62	128217	50	0,7	0,1	-1,11
63	154327	50	0,7	0,1	-0,05
64	164326	50	0,7	0,1	0,35
65	164326	50	0,7	0,1	0,35
66	168345	50	0,7	0,1	0,51
67	164326	50	0,7	0,1	0,35
68	154320	50	0,7	0,1	-0,05
69	152965	50	0,7	0,1	-0,11
70	138351	50	0,7	0,1	-0,7
71	135643	50	0,7	0,1	-0,81
72	164326	50	0,7	0,1	0,35
73	182473	100	0,7	0,1	0,17
74	174171	100	0,7	0,1	-0,16

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
75	145670	100	0,7	0,1	-1,31
76	151300	100	0,7	0,1	-1,09
77	167890	100	0,7	0,1	-0,42
78	210510	100	0,7	0,1	1,31
79	138552	100	0,7	0,1	-1,6
80	162132	100	0,7	0,1	-0,65
81	192179	100	0,7	0,1	0,56
82	210510	100	0,7	0,1	1,31
83	210510	100	0,7	0,1	1,31
84	193456	100	0,7	0,1	0,62
85	187456	100	0,7	0,1	0,37
86	194235	100	0,7	0,1	0,65
87	210510	100	0,7	0,1	1,31
88	156789	100	0,7	0,1	-0,86
89	157890	100	0,7	0,1	-0,82
90	161345	100	0,7	0,1	-0,68
91	93110	125	0,7	0,1	-2,29
92	120099	125	0,7	0,1	-1,2
93	150488	125	0,7	0,1	0,03
94	140308	125	0,7	0,1	-0,38
95	148082	125	0,7	0,1	-0,07
96	190341	125	0,7	0,1	1,64
97	132719	125	0,7	0,1	-0,69
98	118999	125	0,7	0,1	-1,24
99	193500	125	0,7	0,1	1,77
100	150488	125	0,7	0,1	0,03
101	197865	125	0,7	0,1	1,94
102	144321	125	0,7	0,1	-0,22
103	135678	125	0,7	0,1	-0,57
104	134256	125	0,7	0,1	-0,63
105	150488	125	0,7	0,1	0,03
106	150488	125	0,7	0,1	0,03
107	177456	125	0,7	0,1	1,12
108	167543	125	0,7	0,1	0,72
109	166945	50	0,7	0,2	0,4
110	142395	50	0,7	0,2	-0,6
111	172295	50	0,7	0,2	0,61
112	148320	50	0,7	0,2	-0,36
113	152135	50	0,7	0,2	-0,2
114	166945	50	0,7	0,2	0,4

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
115	161360	50	0,7	0,2	0,17
116	171821	50	0,7	0,2	0,59
117	166945	50	0,7	0,2	0,4
118	166945	50	0,7	0,2	0,4
119	115140	50	0,7	0,2	-1,7
120	118017	50	0,7	0,2	-1,58
121	154967	50	0,7	0,2	-0,09
122	166945	50	0,7	0,2	0,4
123	166945	50	0,7	0,2	0,4
124	173214	50	0,7	0,2	0,65
125	172123	50	0,7	0,2	0,6
126	145320	50	0,7	0,2	-0,48
127	160961	100	0,7	0,2	0,24
128	160961	100	0,7	0,2	0,24
129	104350	100	0,7	0,2	-2,05
130	154700	100	0,7	0,2	-0,01
131	160961	100	0,7	0,2	0,24
132	174421	100	0,7	0,2	0,79
133	155870	100	0,7	0,2	0,04
134	157800	100	0,7	0,2	0,11
135	160961	100	0,7	0,2	0,24
136	160961	100	0,7	0,2	0,24
137	138642	100	0,7	0,2	-0,66
138	143267	100	0,7	0,2	-0,47
139	192969	100	0,7	0,2	1,53
140	160961	100	0,7	0,2	0,24
141	160961	100	0,7	0,2	0,24
142	183956	100	0,7	0,2	1,17
143	145678	100	0,7	0,2	-0,38
144	111234	100	0,7	0,2	-1,77
145	219236	125	0,7	0,2	1,59
146	219236	125	0,7	0,2	1,59
147	130389	125	0,7	0,2	-2
148	132456	125	0,7	0,2	-1,91
149	219236	125	0,7	0,2	1,59
150	156789	125	0,7	0,2	-0,93
151	143567	125	0,7	0,2	-1,46
152	176435	125	0,7	0,2	-0,14
153	154321	125	0,7	0,2	-1,03
154	143211	125	0,7	0,2	-1,48

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
155	219236	125	0,7	0,2	1,59
156	157654	125	0,7	0,2	-0,9
157	176421	125	0,7	0,2	-0,14
158	178090	125	0,7	0,2	-0,07
159	219236	125	0,7	0,2	1,59
160	201789	125	0,7	0,2	0,89
161	187659	125	0,7	0,2	0,32
162	201789	125	0,7	0,2	0,89
163	162155	50	0,9	0,05	0,29
164	161400	50	0,9	0,05	0,26
165	160260	50	0,9	0,05	0,21
166	156789	50	0,9	0,05	0,07
167	162155	50	0,9	0,05	0,29
168	154325	50	0,9	0,05	-0,03
169	163260	50	0,9	0,05	0,34
170	146789	50	0,9	0,05	-0,33
171	143267	50	0,9	0,05	-0,47
172	162155	50	0,9	0,05	0,29
173	164320	50	0,9	0,05	0,38
174	142567	50	0,9	0,05	-0,5
175	162155	50	0,9	0,05	0,29
176	154321	50	0,9	0,05	-0,03
177	143455	50	0,9	0,05	-0,46
178	162155	50	0,9	0,05	0,29
179	145672	50	0,9	0,05	-0,37
180	141789	50	0,9	0,05	-0,53
181	173653	100	0,9	0,05	0,25
182	164271	100	0,9	0,05	-0,12
183	173653	100	0,9	0,05	0,25
184	181300	100	0,9	0,05	0,56
185	173653	100	0,9	0,05	0,25
186	167891	100	0,9	0,05	0,02
187	170023	100	0,9	0,05	0,11
188	154670	100	0,9	0,05	-0,51
189	153240	100	0,9	0,05	-0,57
190	173653	100	0,9	0,05	0,25
191	178456	100	0,9	0,05	0,45
192	173653	100	0,9	0,05	0,25
193	165420	100	0,9	0,05	-0,08
194	160329	100	0,9	0,05	-0,28

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
195	155346	100	0,9	0,05	-0,49
196	172456	100	0,9	0,05	0,21
197	165439	100	0,9	0,05	-0,08
198	155404	100	0,9	0,05	-0,48
199	205136	125	0,9	0,05	1,74
200	145678	125	0,9	0,05	-0,67
201	130389	125	0,9	0,05	-1,28
202	132456	125	0,9	0,05	-1,2
203	205136	125	0,9	0,05	1,74
204	154329	125	0,9	0,05	-0,32
205	146389	125	0,9	0,05	-0,64
206	145656	125	0,9	0,05	-0,67
207	142567	125	0,9	0,05	-0,79
208	205136	125	0,9	0,05	1,74
209	152435	125	0,9	0,05	-0,39
210	178765	125	0,9	0,05	0,67
211	164320	125	0,9	0,05	0,09
212	154765	125	0,9	0,05	-0,3
213	149876	125	0,9	0,05	-0,5
214	205136	125	0,9	0,05	1,74
215	160380	125	0,9	0,05	-0,07
216	140143	125	0,9	0,05	-0,89
217	152235	50	0,9	0,1	-0,37
218	170380	50	0,9	0,1	0,36
219	160460	50	0,9	0,1	-0,04
220	180421	50	0,9	0,1	0,77
221	170380	50	0,9	0,1	0,36
222	170380	50	0,9	0,1	0,36
223	160460	50	0,9	0,1	-0,04
224	156785	50	0,9	0,1	-0,19
225	155100	50	0,9	0,1	-0,26
226	143200	50	0,9	0,1	-0,74
227	184565	50	0,9	0,1	0,93
228	156700	50	0,9	0,1	-0,19
229	154620	50	0,9	0,1	-0,28
230	158974	50	0,9	0,1	-0,1
231	170380	50	0,9	0,1	0,36
232	160460	50	0,9	0,1	-0,04
233	154302	50	0,9	0,1	-0,29
234	146789	50	0,9	0,1	-0,59

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
235	184574	100	0,9	0,1	0,77
236	166171	100	0,9	0,1	0,03
237	155770	100	0,9	0,1	-0,39
238	159290	100	0,9	0,1	-0,25
239	184574	100	0,9	0,1	0,77
240	170290	100	0,9	0,1	0,19
241	175470	100	0,9	0,1	0,4
242	159290	100	0,9	0,1	-0,25
243	152340	100	0,9	0,1	-0,53
244	187659	100	0,9	0,1	0,89
245	167804	100	0,9	0,1	0,09
246	156007	100	0,9	0,1	-0,38
247	184574	100	0,9	0,1	0,77
248	167854	100	0,9	0,1	0,09
249	154367	100	0,9	0,1	-0,45
250	154320	100	0,9	0,1	-0,45
251	114589	100	0,9	0,1	-2,06
252	184574	100	0,9	0,1	0,77
253	172585	125	0,9	0,1	0,66
254	173451	125	0,9	0,1	0,7
255	167467	125	0,9	0,1	0,45
256	143734	125	0,9	0,1	-0,51
257	104567	125	0,9	0,1	-2,09
258	173451	125	0,9	0,1	0,7
259	164467	125	0,9	0,1	0,33
260	163797	125	0,9	0,1	0,31
261	173451	125	0,9	0,1	0,7
262	179456	125	0,9	0,1	0,94
263	185678	125	0,9	0,1	1,19
264	173451	125	0,9	0,1	0,7
265	145339	125	0,9	0,1	-0,44
266	141389	125	0,9	0,1	-0,6
267	134500	125	0,9	0,1	-0,88
268	96374	125	0,9	0,1	-2,42
269	145673	125	0,9	0,1	-0,43
270	173451	125	0,9	0,1	0,7
271	162135	50	0,9	0,2	-0,33
272	157480	50	0,9	0,2	-0,51
273	154360	50	0,9	0,2	-0,64
274	181321	50	0,9	0,2	0,45

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
275	218490	50	0,9	0,2	1,95
276	189026	50	0,9	0,2	0,76
277	188227	50	0,9	0,2	0,73
278	157670	50	0,9	0,2	-0,51
279	103456	50	0,9	0,2	-2,7
280	181321	50	0,9	0,2	0,45
281	203456	50	0,9	0,2	1,34
282	213456	50	0,9	0,2	1,75
283	181321	50	0,9	0,2	0,45
284	178412	50	0,9	0,2	0,33
285	165689	50	0,9	0,2	-0,18
286	160578	50	0,9	0,2	-0,39
287	105320	50	0,9	0,2	-2,62
288	162345	50	0,9	0,2	-0,32
289	185974	100	0,9	0,2	2,09
290	156871	100	0,9	0,2	0,92
291	165770	100	0,9	0,2	1,27
292	166690	100	0,9	0,2	1,31
293	125215	100	0,9	0,2	-0,36
294	125215	100	0,9	0,2	-0,36
295	126930	100	0,9	0,2	-0,29
296	120223	100	0,9	0,2	-0,57
297	151376	100	0,9	0,2	0,69
298	152267	100	0,9	0,2	0,73
299	125215	100	0,9	0,2	-0,36
300	126745	100	0,9	0,2	-0,3
301	123456	100	0,9	0,2	-0,43
302	120345	100	0,9	0,2	-0,56
303	98769	100	0,9	0,2	-1,43
304	120124	100	0,9	0,2	-0,57
305	123567	100	0,9	0,2	-0,43
306	101242	100	0,9	0,2	-1,33
307	189236	125	0,9	0,2	1,05
308	189236	125	0,9	0,2	1,05
309	144389	125	0,9	0,2	-0,76
310	145856	125	0,9	0,2	-0,7
311	189236	125	0,9	0,2	1,05
312	164300	125	0,9	0,2	0,05
313	144389	125	0,9	0,2	-0,76
314	135456	125	0,9	0,2	-1,12

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
315	154320	125	0,9	0,2	-0,36
316	164325	125	0,9	0,2	0,05
317	176543	125	0,9	0,2	0,54
318	163200	125	0,9	0,2	0
319	152456	125	0,9	0,2	-0,43
320	96546	125	0,9	0,2	-2,69
321	189236	125	0,9	0,2	1,05
322	192632	125	0,9	0,2	1,19
323	181400	125	0,9	0,2	0,74
324	164321	125	0,9	0,2	0,05
325	162155	50	0,8	0,05	0,1
326	152300	50	0,8	0,05	-0,3
327	162155	50	0,8	0,05	0,1
328	156789	50	0,8	0,05	-0,12
329	154320	50	0,8	0,05	-0,22
330	162155	50	0,8	0,05	0,1
331	169053	50	0,8	0,05	0,38
332	162155	50	0,8	0,05	0,1
333	150230	50	0,8	0,05	-0,38
334	158584	50	0,8	0,05	-0,04
335	162155	50	0,8	0,05	0,1
336	187644	50	0,8	0,05	1,13
337	173208	50	0,8	0,05	0,55
338	164230	50	0,8	0,05	0,18
339	160235	50	0,8	0,05	0,02
340	154567	50	0,8	0,05	-0,21
341	143200	50	0,8	0,05	-0,67
342	139234	50	0,8	0,05	-0,83
343	183653	100	0,8	0,05	1,24
344	163471	100	0,8	0,05	0,43
345	183653	100	0,8	0,05	1,24
346	184350	100	0,8	0,05	1,27
347	179650	100	0,8	0,05	1,08
348	163430	100	0,8	0,05	0,43
349	183653	100	0,8	0,05	1,24
350	164530	100	0,8	0,05	0,47
351	156789	100	0,8	0,05	0,16
352	102346	100	0,8	0,05	-2,04
353	164780	100	0,8	0,05	0,48
354	175430	100	0,8	0,05	0,91

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
355	154300	100	0,8	0,05	0,06
356	101234	100	0,8	0,05	-2,09
357	123425	100	0,8	0,05	-1,19
358	145367	100	0,8	0,05	-0,3
359	113256	100	0,8	0,05	-1,6
360	108320	100	0,8	0,05	-1,8
361	215036	125	0,8	0,05	2,08
362	155678	125	0,8	0,05	-0,32
363	131389	125	0,8	0,05	-1,3
364	138256	125	0,8	0,05	-1,02
365	202336	125	0,8	0,05	1,56
366	215678	125	0,8	0,05	2,1
367	175432	125	0,8	0,05	0,48
368	103456	125	0,8	0,05	-2,43
369	154320	125	0,8	0,05	-0,38
370	160112	125	0,8	0,05	-0,14
371	155234	125	0,8	0,05	-0,34
372	99765	125	0,8	0,05	-2,58
373	215036	125	0,8	0,05	2,08
374	175329	125	0,8	0,05	0,47
375	170240	125	0,8	0,05	0,27
376	154320	125	0,8	0,05	-0,38
377	164389	125	0,8	0,05	0,03
378	158956	125	0,8	0,05	-0,19
379	217200	50	0,8	0,1	2,16
380	217200	50	0,8	0,1	2,16
381	171380	50	0,8	0,1	0,31
382	178321	50	0,8	0,1	0,59
383	192632	50	0,8	0,1	1,16
384	180450	50	0,8	0,1	0,67
385	172134	50	0,8	0,1	0,34
386	113456	50	0,8	0,1	-2,03
387	173456	50	0,8	0,1	0,39
388	106789	50	0,8	0,1	-2,3
389	150567	50	0,8	0,1	-0,54
390	145324	50	0,8	0,1	-0,75
391	217200	50	0,8	0,1	2,16
392	175430	50	0,8	0,1	0,47
393	148765	50	0,8	0,1	-0,61
394	125478	50	0,8	0,1	-1,55

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
395	132564	50	0,8	0,1	-1,26
396	130467	50	0,8	0,1	-1,35
397	182503	100	0,8	0,1	0,87
398	174171	100	0,8	0,1	0,53
399	164670	100	0,8	0,1	0,15
400	169300	100	0,8	0,1	0,33
401	182503	100	0,8	0,1	0,87
402	182503	100	0,8	0,1	0,87
403	134560	100	0,8	0,1	-1,07
404	109456	100	0,8	0,1	-2,08
405	178560	100	0,8	0,1	0,71
406	183450	100	0,8	0,1	0,9
407	182503	100	0,8	0,1	0,87
408	170236	100	0,8	0,1	0,37
409	165098	100	0,8	0,1	0,16
410	152341	100	0,8	0,1	-0,35
411	173245	100	0,8	0,1	0,49
412	148765	100	0,8	0,1	-0,5
413	99435	100	0,8	0,1	-2,49
414	145632	100	0,8	0,1	-0,62
415	103110	125	0,8	0,1	-1,69
416	166089	125	0,8	0,1	0,85
417	166098	125	0,8	0,1	0,85
418	164308	125	0,8	0,1	0,78
419	101242	125	0,8	0,1	-1,77
420	166089	125	0,8	0,1	0,85
421	150267	125	0,8	0,1	0,21
422	142100	125	0,8	0,1	-0,12
423	111145	125	0,8	0,1	-1,37
424	166089	125	0,8	0,1	0,85
425	166098	125	0,8	0,1	0,85
426	135678	125	0,8	0,1	-0,38
427	128765	125	0,8	0,1	-0,66
428	166089	125	0,8	0,1	0,85
429	149789	125	0,8	0,1	0,19
430	136572	125	0,8	0,1	-0,34
431	151256	125	0,8	0,1	0,25
432	140234	125	0,8	0,1	-0,19
433	156345	50	0,8	0,2	0,27
434	146395	50	0,8	0,2	-0,13

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
435	152095	50	0,8	0,2	0,1
436	158920	50	0,8	0,2	0,37
437	143290	50	0,8	0,2	-0,26
438	156345	50	0,8	0,2	0,27
439	156345	50	0,8	0,2	0,27
440	175432	50	0,8	0,2	1,04
441	179345	50	0,8	0,2	1,2
442	118640	50	0,8	0,2	-1,25
443	101200	50	0,8	0,2	-1,96
444	156345	50	0,8	0,2	0,27
445	145629	50	0,8	0,2	-0,16
446	156345	50	0,8	0,2	0,27
447	148230	50	0,8	0,2	-0,06
448	133289	50	0,8	0,2	-0,66
449	167890	50	0,8	0,2	0,74
450	141769	50	0,8	0,2	-0,32
451	178961	100	0,8	0,2	1,05
452	178961	100	0,8	0,2	1,05
453	159350	100	0,8	0,2	0,26
454	160700	100	0,8	0,2	0,31
455	184574	100	0,8	0,2	1,27
456	167171	100	0,8	0,2	0,57
457	145770	100	0,8	0,2	-0,29
458	104567	100	0,8	0,2	-1,96
459	101456	100	0,8	0,2	-2,08
460	175221	100	0,8	0,2	0,9
461	178961	100	0,8	0,2	1,05
462	130200	100	0,8	0,2	-0,92
463	109789	100	0,8	0,2	-1,75
464	178961	100	0,8	0,2	1,05
465	101242	100	0,8	0,2	-2,09
466	172345	100	0,8	0,2	0,78
467	167421	100	0,8	0,2	0,58
468	158908	100	0,8	0,2	0,24
469	172836	125	0,8	0,2	0,42
470	207636	125	0,8	0,2	1,82
471	154989	125	0,8	0,2	-0,3
472	150245	125	0,8	0,2	-0,49
473	112334	125	0,8	0,2	-2,03
474	123450	125	0,8	0,2	-1,58

ID	Costo Total	Ngen	Pc	Pm	ZRE_1
475	207636	125	0,8	0,2	1,82
476	207636	125	0,8	0,2	1,82
477	185400	125	0,8	0,2	0,93
478	188650	125	0,8	0,2	1,06
479	199560	125	0,8	0,2	1,5
480	165600	125	0,8	0,2	0,13
481	154973	125	0,8	0,2	-0,3
482	123078	125	0,8	0,2	-1,59
483	108345	125	0,8	0,2	-2,19
484	140245	125	0,8	0,2	-0,9
485	207636	125	0,8	0,2	1,82
486	114356	125	0,8	0,2	-1,94