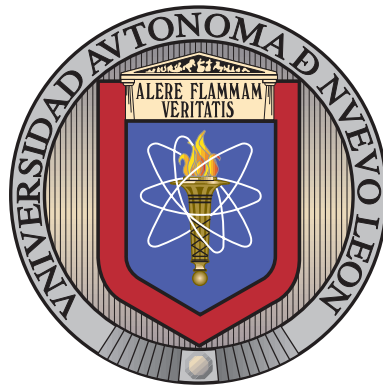


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO ESTOCÁSTICO POR ESCENARIOS PARA
UNA RED DE LOGÍSTICA INVERSA

POR

LEONARDO GABRIEL HERNÁNDEZ LANDA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO ESTOCÁSTICO POR ESCENARIOS PARA
UNA RED DE LOGÍSTICA INVERSA

POR

LEONARDO GABRIEL HERNÁNDEZ LANDA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2011

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Modelo estocástico por escenarios para una red de logística inversa», realizada por el alumno Leonardo Gabriel Hernández Landa, con número de matrícula 1506786, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Igor Litvinchev

Asesor

Dra. Ada M. Álvarez Socarrás

Revisor

Dra. Gabriela García Ayala

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mayo 2011

A mis padres por hacer el gran esfuerzo de formarme como una persona de bien.

A mi familia por darme la fortaleza y el apoyo para seguir preparándome.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Motivación	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivo	5
1.5. Hipotesis	6
1.6. Metodología de la tesis	6
2. Antecedentes	8
2.1. Cadena de suministro de ciclo cerrado	13
2.2. Optimización Estocástica	15
2.2.1. Optimización por escenarios	16
2.3. Literatura relacionada al problema	18

3. Planteamiento y Formulación del problema	23
3.1. Planteamiento	23
3.1.1. Suposiciones del modelo	25
3.2. Modelo matemático	26
3.2.1. Notación	26
3.2.2. Modelo Matemático	27
4. Metodología para la solución	30
4.1. Métodos de solución	30
4.1.1. Búsqueda de la Sección Aurea	31
4.1.2. Descomposición de Benders	33
5. Resultados Computacionales	37
5.1. Generación de instancias.	37
5.1.1. Tamaño de instancias	38
5.1.2. Valores de los parámetros	39
5.1.3. Experimentos para definir parámetros bajo incertidumbre.	40
5.2. Evaluación del desempeño para las metodologías de solución.	43
5.3. Desempeño del modelo estocástico contra el determinístico.	46
5.4. Variación de la precisión de la solución	50
5.5. Comportamiento de las probabilidades de los escenarios	51
5.6. Análisis de sensibilidad	60
5.6.1. Factores variables	60

5.6.2. Desarrollo del experimento	61
5.6.3. Comprobación de datos	65
6. Conclusiones	70
6.1. Conclusiones.	71
6.2. Áreas de oportunidad	73
A. Apéndice A	75
A.1. Gráficos de cajas	75

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Esquema de factores principales dentro de Logística inversa.	2
2.1. Flujos de logística inversa	12
2.2. Árbol de probabilidades para los escenarios	17
3.1. Diagrama básico del modelo	25
4.1. Diagrama de flujo del método de la sección dorada	32
5.1. Simulación de coordenadas para la localización de instalaciones	38
5.2. Gráfico de correlación de la demanda	41
5.3. Gráfico de correlación de la tasa de retorno	42
5.4. Gráfico de correlación del precio de adquisición del competidor	42
5.5. Ejemplo gráfico de instancia resuelta mediante la programación estocástica	43
5.6. Gráfico comparativo en la evolución en tiempo para los métodos propuestos	46
5.7. Diferencia para las soluciones obtenidas entre el modelo estocástico y el determinístico	48

5.8. Diferencia para la variable de decisión L entre el modelo estocástico y el determinístico	49
5.9. Diferencia para los tiempos obtenidos en la solución del modelo estocástico y el determinístico	50
5.10. Gráfica Q-Q para la observación del comportamiento de los residuales	55
5.11. Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 1	56
5.12. Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 2	56
5.13. Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 3	57
5.14. Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 4	57
5.15. Interacción de las tendencias para la variación de las probabilidades .	58
5.16. Histograma de frecuencia de los residuales para el costo total	65
5.17. Histograma de frecuencia de los residuales para el precio de adquisición	66
5.18. Histograma de frecuencia de los residuales para el tiempo de computo	67
A.1. Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 1 . .	76
A.2. Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 2 . .	76
A.3. Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 3 . .	77
A.4. Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 4 . .	77

ÍNDICE DE TABLAS

5.1. Tabla de instancias	39
5.2. Tabla de desempeño de métodos de solución.	44
5.3. Tabla de desempeño de métodos de solución con límite de tiempo. . .	45
5.4. Tabla de comparación en desempeño de modelo determinístico y estocástico con 4 escenarios	47
5.5. Tabla de rendimiento en reducción de precisión de la solución	51
5.6. Tabla de variación de las probabilidades para los escenarios	53
5.7. Variación de parámetros en el análisis	60
5.8. Variaciones para el análisis de sensibilidad	61

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores de tesis, la Dra. Deniz Ozdemir y el Dr. Igor Litvinchev, por todo su apoyo y guía durante el desarrollo de la tesis y la maestría, que con su experiencia y aportaciones me ayudaron a hacer posible esta tesis.

Al comité de tesis, la Dra. Ada M. Álvarez y la Dra. Gabriela Ayala, que fungieron como revisores de esta tesis y que hicieron una gran contribución con sus ideas y experiencia en este proceso.

En general al personal académico, administrativo y alumnos del Posgrado en Ingeniería de Sistemas, que demuestran constantemente que se puede contar con ellos en los problemas que puedan surgir.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante todo el periodo de la maestría, ya que sin este apoyo sería muy difícil de lograr esta meta.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo económico y las instalaciones de calidad durante la estancia de la maestría.

Especialmente agradezco a mi familia, mi esposa, mis niños, mi madre, mi padre y hermanos que son mi fortaleza y motivación para salir adelante y seguir preparándome, para ofrecerles lo mejor de mí.

RESUMEN

Leonardo Gabriel Hernández Landa.

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

MODELO ESTOCÁSTICO POR ESCENARIOS PARA UNA RED DE LOGÍSTICA INVERSA

Número de páginas: 83.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Se presenta un modelo de cadena de suministro de ciclo cerrado de tres niveles, donde el producto manufacturado, es enviado a centros de distribución y finalmente distribuidos en zonas de clientes, según la demanda y su inversa recuperando el producto desde los clientes hasta la remanufactura. Comúnmente en este tipo de casos aplicados en la vida real presentan cierta incertidumbre para algunos parámetros que lo alimentan por distintas causas, en este caso la demanda y la tasa de retorno del cliente son los parámetros mas fuertes por el hecho de que se contempla la existencia de un competidor que afectara directamente las decisiones de nuestros clientes y este factor lo debemos tomar en cuenta al momento del diseño de la red. Una mala decisión en el diseño generaría muchos

gastos no necesarios y corregirlo en un futuro sería muy caro. Por eso en este trabajo se propone un modelo mediante formulación estocástica para atacar esos parámetros bajo incertidumbre.

Se propone la formulación por escenarios para atacar la incertidumbre y así poder emplear métodos de solución exactos para este problema y para atacar la no linealidad que produce el estarnos comparando con el comportamiento del cliente utilizaremos un método de búsqueda unidimensional que nos permita parametrizar la variable y el problema tratarlo como un problema lineal.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: El estudio realizado demostró que el modelado del problema en general alcanza soluciones de calidad que permiten ayudar al tomador de decisiones establecer el diseño óptimo para la red de distribución sin arriesgar inversiones y/o gastos a futuro, las metodologías aplicadas funcionaron correctamente, tanto el método de descomposición de Benders y el método de ramificación y acotamiento alcanzaron las mismas soluciones, la diferencia aplicó al momento de evaluar la eficiencia en el tiempo de solución computacional. El método de ramificación y acotamiento demostró ser mucho más veloz para la obtención de soluciones dentro del planteamiento estocástico. El comportamiento de las soluciones finales siempre demostró gran dependencia de los siguientes factores: Demanda, Tasa de recuperación y tamaño de la instancia, comportamiento del competidor, lo que nos permite saber en que sectores enfocarnos para futuros planes de expansión, mercadeo y estrategias de venta. Entonces se puede concluir que el modelo se diseñó correctamente y sus resultados son confiables en términos de costos y planes a futuro.

Firma del asesor: _____

Dr. Igor Litvinchev

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La administración de la cadena de suministro (SCM, por sus siglas en inglés) es un tema que ha sido discutido y estudiado ampliamente. Sin embargo, la mayoría de las publicaciones relacionadas con SCM se enfocan sólo en la producción y venta de productos y no se toma en cuenta lo que sucede después de que dichos productos son vendidos.

Los problemas de redes de logística tradicional han sido abordados de varias décadas atrás, mismos que ahora cuentan con una extensa literatura y que han dado pie a otros tipos de problemas. En nuestro caso abordamos un problema de logística tradicional con su inversa en forma de recolección de producto usado para suministrar materia prima a fábricas de remanufactura con el objetivo de obtener productos nuevos y/o remanufacturados.

A este tipo de movimientos en la industria se le conoce como “Logística Inversa” o “Cadenas de suministro de ciclo cerrado” y es actualmente un tema aplicado con éxito en industrias y que va en ascenso conforme a la necesidad de reutilizar los deshechos. Este tipo de cadenas presentan un gran beneficio ecológico, dado que fomentan la participación social para el reciclado de productos usados y/o inservibles. Obsérvese en la figura 1.1 la idea básica de una red de logística inversa.



Figura 1.1: Esquema de factores principales dentro de Logística inversa.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La atención hacia la logística inversa se ha incrementado durante la última década, desde el impacto económico, hasta el impacto ambiental, por lo cual inclusive se han generado reformas que exigen usarla en algunos procesos, como la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos y otras descritas mas adelante.

Las aportaciones de la literatura e interés de las industrias beneficiadas han conllevado a desarrollar un modelo conceptual para la ubicación simultánea de instalaciones por un costo efectivo y una planeación eficiente de rutas que minimicen los costos de operación en la logística inversa. Se cubren parámetros como los costos, capacidades y demandas a través de un ámbito amplio. Nuestra propuesta del diseño de la red consiste en ubicación de almacenes, centros de recolección e instalaciones de reproceso, creados por los fabricantes en virtud de las diversas estrategias, la limitación de las plantas, así como operaciones y zonas de clientes.

La incertidumbre siempre se encuentra presente debido a la variedad de factores que se encuentren en el entorno de la industria, la economía y la sociedad. Por lo tanto la demanda no puede ser siempre homogénea y tampoco se puede calcular de manera exacta con la finalidad de saber cuánto y qué producir. Así que debemos tomar en cuenta la mejor decisión con toda la información, incluyendo. Esto evitará que el producto no pueda satisfacer la demanda, o que se instale exceso de capacidad en almacenes, lo cual aumentaría los gastos de mantenimiento. Este problema debe atacarse mediante metodologías estocásticas que encuentren esta solución deseada.

El problema es entonces, decidir donde localizar instalaciones estratégicamente que completen la cadena de suministro de ciclo cerrado, en conjunto con la planeación de las rutas y hacer la mejor oferta al cliente sobre el producto que deseamos recuperar en porcentaje de la demanda, bajo un marco de incertidumbre y de competencia con otras organizaciones.

1.2 MOTIVACIÓN

La recolección y reciclaje de productos usados o desechados está ganando interés en los negocios y en el mundo de la investigación. El nuevo concepto que se ha generado de políticas verdes dentro de la gestión de cadenas de suministro se ha venido realzando y tomando valor dada su finalidad de obtener valor al producto desechado.

La creciente preocupación y el avance de la gestión en cadenas de suministro completas que colaboren con el mantenimiento ambiental tanto en conceptos como en prácticas hacen que sea más relevante. Por lo tanto, una buena gestión de un plan de logística demuestra la preocupación de las industrias que lo apliquen en el sustento ambiental, además el beneficio económico por reutilizar de manera correcta

los desechos servibles es muy grande, que en comparación del uso exclusivo de materia prima resulta mas benéfico, Pokharel and Mutha [2009].

En tanto, con la aplicación de estas redes de logística se crea consciencia social sobre el buen uso de sus desechos y los hábitos de cuidar el medio ambiente crecen dentro de la sociedad.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las empresas que están en expansión siempre buscan minimizar los costos, pero a su vez satisfacer las demandas de sus clientes, es vital tomar buenas decisiones desde el principio anticipándose a las variantes que puedan afectar sus operaciones.

El buen diseño de una red de logística inversa atrae considerablemente un aumento en las ganancias si este es conveniente, dada la gran necesidad de las industrias de generar ingresos haciendo el daño mínimo posible al medio ambiente y sus recursos naturales.

La Unión Europea (UE) tiene actualmente dos legislaciones en vigor para hacer frente al rápido aumento de flujo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y complementos: La primera es el reciclado de dispositivos domésticos eléctricos y electrónicos(2002/96/EC WEEE). El segundo trata sobre la limitación de la utilización de algunos materiales peligrosos (2002/95/EC RoHS)). La Directiva WEEE incluye una amplia gama de productos como grandes electrodomésticos, pequeños electrodomésticos, equipos informáticos y de telecomunicaciones, equipos consumidores, equipo de iluminación, herramientas eléctricas, juguetes, equipos deportivos y de ocio, dispositivos médicos, controles y dispositivos de control, y dispositivos automatizados, Tombus [2009].

En México existen leyes que promueven los hábitos de reuso, reciclado y disposición de los residuos sólidos. Para este efecto se encuentra la ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente, de la unión [1998], que reglamenta la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente en el territorio nacional, que en su capítulo 4 se refiere a la contaminación del suelo, para la implementación de técnicas y procedimientos para reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficiente de los residuos. Para efectos más certeros en este tema existe la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos, una ley joven publicada recientemente en el diario oficial de la federación el 8 de Octubre del 2003, la cual se refiere a propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos. Esta ley propone establecer mecanismos de coordinación para el uso de los residuos y definir responsabilidades a los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades de diferentes niveles de gobierno, así como los prestadores de servicios en el manejo integral de los residuos.

1.4 OBJETIVO

Se nos presenta un problema de cadena de suministro de ciclo cerrado de tres niveles, donde el producto manufacturado, es enviado a centros de distribución y finalmente distribuidos en zonas de clientes según demandas ya determinadas, inversamente este problema representa la recuperación de zonas de clientes a centros de inspección y finalmente se desecha o se envía a remanufactura.

Se desea decidir los centros de distribución, centros de inspección y centros de remanufactura propuestos que serán abiertos o cerrados, para poder satisfacer los niveles de demanda y retorno del producto dentro de un entorno meramente estocástico variando los parámetros de operación, ajustándose lo más posible a una solución que minimice los costos de transportación entre nuestros distintos niveles.

1.5 HIPOTESIS

Al inicio de un proyecto de localización de instalaciones se debe determinar la ubicación dado un estudio de mercado, social, de competencia, etc. que ayudara a la toma de decisiones. Siendo la decisión final la más correcta posible tomada en base la distintas demandas y tasas de retorno, podemos con el modelo propuesto disminuir los costos de transportación sobre los distintos escenarios que se nos presenten, garantizando no tener que ampliar o cerrar instalaciones en un futuro cercano.

Se cree que el comportamiento de los valores finales no variará mucho con respecto al modelo determinístico, sin embargo la posibilidad de que el valor objetivo crezca dado que la red debe adecuarse a todos los escenarios posibles y esto trae consigo una alza en el costo dado que se considerarán en conjunto los escenarios, esto hará que a largo plazo los costos sean nivelados.

1.6 METODOLOGÍA DE LA TESIS

La metodología consiste en una parte teórica (revisión de la literatura y el desarrollo del modelo estocástico) y una parte aplicada de experimentación (minimización de los costos para los distintos escenarios en los entornos prácticos).

Nos centramos principalmente en la literatura original del modelo y formulación estocástica, CLSCM(closed loop supply chain management), el riesgo de la cadena de suministro, etc. para mantener las raíces teóricas y sus vínculos. Identificamos algunos problemas y deficiencias, así como los retos y oportunidades. Nuestro objetivo es revelar la importancia de la incertidumbre en este modelo y desarrollar un marco más formal para analizar el mismo diseño de la red. Para lograr esto, en base al modelo determinístico se amplió a un modelo de optimización estocástico de dos niveles, el uso de datos generados para las demandas y devoluciones de productos

y estimación de los costos y otros parámetros diferentes que permitan encontrar la solución óptima del problema.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

La administración de la cadena de suministro tiene actualmente un gran auge debido a la capacidad de ayuda en la resolución de problemas en la industria. El diseño de redes de logística es un asunto estratégico de importancia primaria para la viabilidad económica de las actividades de distribución, Listes and Dekker [2005].

La administración de la cadena de suministro (SCM) es un tema que ha sido discutido y estudiado ampliamente. Sin embargo, la mayoría de las publicaciones relacionadas con SCM se enfocan sólo en la producción y venta de productos y no se toma en cuenta lo que sucede después de que dichos productos son vendidos.

Tradicionalmente, los esfuerzos se concentran en mejorar las operaciones logísticas tradicionales (forward logistics en inglés) pero lo cierto es que una cadena de suministro completa, incluye también a la LI, Krumwiede and Sheu [2002].

Existe una gran variedad de definiciones para LI en la literatura. La primera definición que se conoció fue publicada por The Council of Logistics Management, Stock [1992] como “el término comúnmente utilizado para referirse a la actividad de logística en el reciclaje, desecho de basura, y manejo de materiales peligrosos. Una mayor perspectiva incluye todo lo relacionado con la logística necesaria para reducción de recursos, reciclaje, sustitución, reutilización de materiales y desechos”.

El Grupo de Trabajo Europeo en Logística Inversa define LI de la siguiente forma: “El proceso de planear, implementar y controlar los flujos de materiales, en procesos de inventario, y productos terminados de un fabricante, distribuidor o algún otro punto, a un punto de recuperación o algún punto designado para su desecho”. De acuerdo con Carter and Ellram [1998], LI es la distribución inversa que incluye reducción de recursos. Distribución inversa es el movimiento en contra de la cadena de un producto o material obtenido de la reutilización, reciclaje o desecho. Reducción de recursos es la minimización de desechos, lo cual resulta en procesos de distribución mucho más eficientes. La LI es diferente del manejo de desechos y de la Logística Verde, y puede verse como parte del desarrollo sustentable, Brito and Dekker [2002].

Fleischmann et al. [2000] enlistan las actividades presentes en la recuperación de productos de la siguiente forma:

- Recolección de productos usados (retornos).
- Determinación de la condición de los productos por inspección y/o separación.
- Remanufactura de los retornos para capturar su valor restante.
- Desecho de los productos que fueron considerados irrecuperables debido a razones tecnológicas y/o económicas.
- Redistribución de los productos remanufacturados.

Brito and Dekker [2002] analizaron el tema desde tres puntos de vista principales: ¿por qué?, ¿qué? y ¿cómo?.

¿Por qué las cosas son devueltas?: enlistaron las razones de devoluciones de acuerdo a la jerarquía usual de la cadena: manufactura, distribución y devoluciones de los clientes.

1. Manufactura:

- Exceso de materia prima.
- Devoluciones de control de calidad.
- Sobrantes de la producción.

2. Distribución:

- Recuperación de productos encontrados peligrosos o defectuosos.
- Devoluciones comerciales (saldos, productos dañados).
- Ajustes de inventario.

3. Clientes:

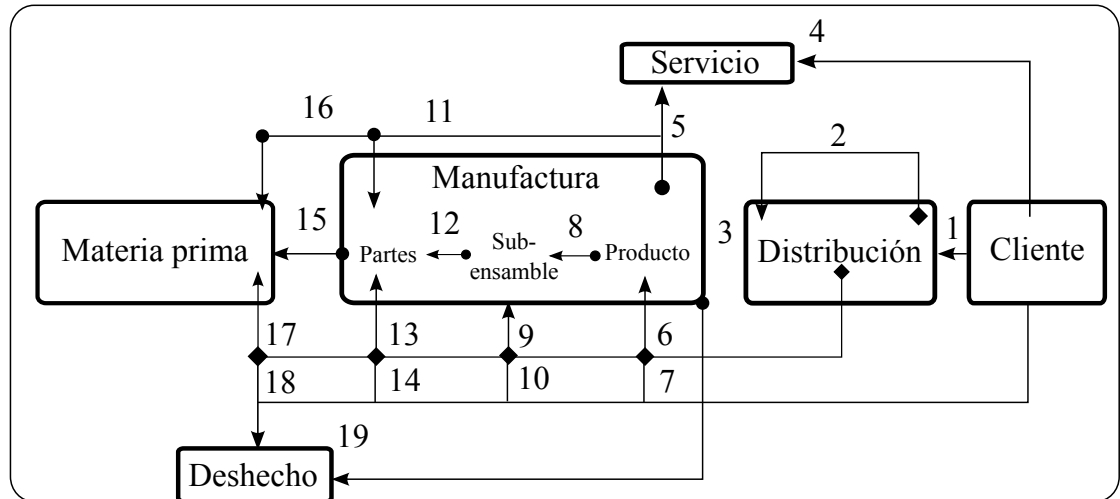
- Devoluciones por garantía.
- Devoluciones de servicio (reparaciones y reemplazo de piezas).
- Devoluciones por desuso (obsoleto).
- Devoluciones por fin de vida del producto.

¿Qué es lo que se devuelve?: describieron las características del producto (composición, patrón de uso y deterioración) lo cual vuelve al producto recuperado atractivo o repulsivo, y dieron algunos ejemplos basados en casos reales. La composición del producto es importante desde el punto de vista de facilidad de desensamblaje, homogeneidad de los elementos que lo constituyen, presencia de materiales peligrosos, y facilidad de transporte. El patrón de uso del producto muestra la ubicación y la intensidad de uso, así como la duración del uso.

¿Cómo la LI funciona en la práctica?: Enlistaron los actores y los procesos (cómo se recupera el valor de los productos). Los actores son los que devuelven, los que reciben y los que recolectan. Los tipos de recuperación son recuperación de producto, recuperación de componente, recuperación de material y recuperación de

energía. Existen cuatro tipos principales de procesos de LI: recolección, la combinación de inspección-selección-ordenamiento, re-procesamiento o recuperación directa, y finalmente la redistribución.

La figura 2.1 muestra los flujos de logística inversa en varios estados de la cadena de suministros (Salomon et al. [1995]). Lund [1984] y Jacobsson [2000] describieron tres diferentes tipos de compañías que realizan la remanufactura: Fabricantes Originales de Equipo (OEM), quienes remanufacturan sus propios productos. Remanufacturadores por Contrato, que son contratados para remanufacturar productos en representación de otras compañías. Algunas veces, estas compañías son remuneradas por el dueño final o el distribuidor para recoger los productos desechados Jacobsson [2000].



Retornos de manufactura $\blacklozenge \rightarrow$ Retornos de distribución $\bullet \rightarrow$
 Retornos del cliente \rightarrow

1. Reembolso, fin de uso(re-venta, re-uso)
2. Comercialización y reajuste de inventarios(Re-distribución)
3. Reajustes (re-proceso)
4. Garantía, Servicio(reparación)
5. Fallas de producto(Reparación)
6. Retornos comerciales, reajustes(Renovación)
7. Fin de uso, garantías(Re-renovación)
8. Fallas de producto(Remanufactura)
9. Retornos comerciales, reajustes(Remanufactura)
10. Fin de uso, fin de vida(Remanufactura)
11. Fallas de producto(Recuperación)
12. Ídem
13. Retornos comerciales, reajustes(Recuperación)
14. Fin de uso, fin de vida(Recuperación)
15. excedente de materia prima(Re-uso, re-venta)
16. Fallas de producto, sobrantes de producción(Reciclaje)
17. Retornos comerciales, reajustes(Reciclaje)
18. Fin de vida(Reciclaje)
19. Todos los tipos de flujo inverso(Incineración, vertido)

Figura 2.1: Flujos de logística inversa

Jackson and Geyer [2004] examinaron las siguientes restricciones para el reciclaje y la reutilización de los productos:

- Acceso limitado a los productos que han llegado al fin de su vida útil.
- Factibilidad limitada de reprocesamiento de productos en el fin de su vida útil.
- Demanda de mercado limitada para productos salidos del reprocesamiento.

2.1 CADENA DE SUMINISTRO DE CICLO CERRADO

La cadena de suministro de ciclo cerrado (CLSC, por sus siglas en inglés), también llamada logística inversa (Reverse Logistic) se puede definir de distintas maneras.

Una red de logística inversa establece la relación entre el mercado de productos usados y el mercado de productos nuevos, cuando estos dos mercados coinciden entonces es llamado una red de ciclo cerrado Salema et al. [2007].

La administración de la cadena de suministro ahora tiene que tomar en cuenta el ciclo de vida completo de los productos e integrar conceptos de logística inversa Dyckhoff et al. [2004]. La mayoría de las cadenas de ciclo cerrado incluyen procesos clave como: separación, disposición, recuperación y redistribución y ventas. Nos enfocaremos en los conceptos de logística inversa y recuperación de producto.

Múltiples casos de estudios sobre las redes de logística inversa proponen modelos determinísticos del tipo lineal entero mixto para ubicación de las instalaciones, con el fin de apoyar las decisiones de diseño de redes. Sin embargo Listes and Dekker [2005] señalan que un alto nivel de incertidumbre es una característica general del diseño de cadenas de suministro y productos recuperados, mientras que los casos

citados apoyan esta visión con respecto a cuestiones de diseño en estas redes en particular. Por ejemplo, la disponibilidad de los productos utilizados o la demanda de los productos en recuperación se identifican como principales factores de incertidumbre. En algunos casos, herramientas como el análisis de sensibilidad paramétrica o análisis de escenarios son utilizados para tratar la incertidumbre.

Una cadena de logística inversa se puede clasificar en dos grupos: los miembros de la logística tradicional de la cadena, que incluye los proveedores de materia prima, fabricantes, minoristas y los mercados de la demanda; y los miembros de la cadena de logística inversa, que incluye los mercados de demanda, centros de recuperación y los fabricantes. Los fabricantes y los mercados de la demanda podrían ser reconocidos como los nodos extremos de la red de la cadena tradicional y la red de cadena de suministro inversa para formar la red completa de la cadena de ciclo cerrado, Yang and Wang [2009].

La logística inversa será vital para las actividades de gestión de servicios y realizar copias de los productos tales como automóviles, refrigeradores y otros electrodomésticos, teléfonos móviles, baterías de plomo-ácido, televisores, computadoras personales (PC), etc. Una red bien gestionada de logística inversa no solo puede proporcionar importantes ahorros de costes en la contratación, la recuperación, eliminación, la conservación de inventario y de transporte, también ayudan en la retención de clientes. Dado que las operaciones de logística inversa y las cadenas de suministro que, son mucho más complejas que las tradicionales cadenas de suministro de fabricación, una organización que logra implementar un sistema de este tipo presenta una gran ventaja no fácilmente replicable por sus competidores Srivastava [2006]. Sin embargo, para fabricantes de equipos originales comprometer recursos financieros y de gestión para el logro de las cadenas de suministro de ciclo cerrado representa un riesgo, los beneficios de la recuperación de activos tiene que ser también económicamente demostrada, Lebreton [2007].

La recolección es el primer paso en el proceso de recuperación. Se seleccionan los productos recolectados y son transportados a las instalaciones para su reutilización. Los productos usados provienen de diferentes fuentes y deben ser llevado a un centro de recuperación de producto para iniciar el proceso de convergencia . La clasificación y reciclaje son también un mecanismo importante cuando se ordenan los productos reutilizables. El objetivo es ordenar los productos que pueden ser reutilizados para reducir los costos de hacer nuevos productos, Srivastava [2007].

2.2 OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA

En optimización determinista se supone que los parámetros del problema son conocidos con certeza, aunque sea a su valor medio. En optimización estocástica (stochastic optimization SP) se relaja esta condición. No se conocen sus valores, sólo sus distribuciones y habitualmente se supone que éstas son discretas con un número finito de estados posibles. La suposición de distribuciones discretas es habitual en los optimizadores de optimización estocástica. Actualmente no existen aplicaciones estándar o comerciales, potentes y fiables, para resolver problemas estocásticos.

Los tipos de modelos que aparecen en programación estocástica son motivados principalmente por problemas con decisiones previas bajo futuro incierto. Esto es, decisiones que deben tomarse basándose en información a priori, existente o supuesta, sobre situaciones futuras sin realizar observaciones adicionales.

Recurso es la capacidad de tomar una acción correctora después de que haya ocurrido un suceso aleatorio. Por ejemplo, se toman hoy un conjunto de decisiones x_1 con valores de los parámetros conocidos (es decir, deterministas), durante la noche se producen unos sucesos aleatorios y mañana se toman un conjunto de acciones

correctoras x_2^w que mitigan (corrigen) los efectos de los sucesos aleatorios w sobre las decisiones de hoy.

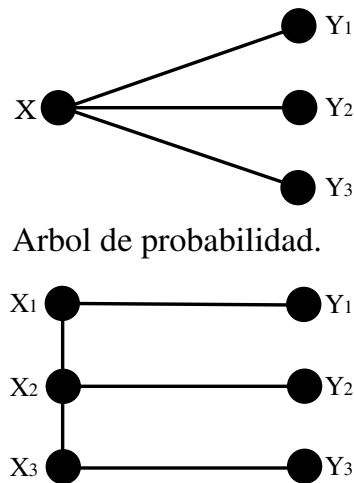
Las decisiones de la primera etapa no dependen del escenario que ocurra realmente en el futuro. Las decisiones de la segunda etapa x_2^w son los recursos. La función objetivo asociada a estas decisiones es la función de recursos, depende de las decisiones de la primera etapa x_1 y de los valores w de los parámetros aleatorios. Esta circunstancia incrementa exponencialmente el tamaño del problema. Este problema, denominado problema lineal estocástico bietapa PLE-2, determina el valor óptimo de x_1 y x_2^w . Las decisiones relevantes en optimización estocástica son exclusivamente las de la primera etapa x_1 , puesto que son éstas las que hay que tomar de manera inmediata.

Existen otros tipos de problemas de optimización estocástica, que no se tratan aquí, denominados con restricciones probabilistas (chance constraints o probabilistic constraints) que incluyen restricciones lineales con parámetros aleatorios y se modela la condición de cumplirlas restricciones con una cierta probabilidad. En el caso de distribuciones discretas se necesita una variable binaria por cada suceso, definido como combinación de los valores discretos de los parámetros, Ramos and Cerisola [2008].

2.2.1 OPTIMIZACIÓN POR ESCENARIOS

La optimización estocástica permite incorporar actitudes adversas al riesgo, por ejemplo, mediante la penalización de los peores escenarios. La generalización del concepto de protección frente al riesgo se hace mediante optimización robusta. Se dice que una solución es robusta si es casi óptima para todos los escenarios. Se dice que un modelo es robusto si es casi factible en todos los escenarios. La optimización robusta trata de encontrar un equilibrio simultáneo entre ambos objetivos de op-

timalidad y factibilidad. Los diferentes estados que pueden tomar los parámetros aleatorios a lo largo del tiempo se representan mediante un árbol de probabilidad o de escenarios, figura 2.2



Arbol de probabilidad para agregacion de escenarios.

Figura 2.2: Árbol de probabilidades para los escenarios

Se define un escenario como cualquier camino (trayectoria) que va desde la raíz del árbol hasta las hojas de manera que los escenarios que comparten una misma información hasta una cierta etapa también comparten esa parte del árbol. El árbol de probabilidad es la forma natural y explícita de representar la no anticipatividad de las decisiones estocásticas discretas.

En el caso de la figura 2.2, el árbol es simplemente una raíz y tres hojas. Las decisiones de la primera etapa se comparten (son las mismas para cualquiera de los escenarios) y por eso la raíz es única. Las decisiones de la segunda etapa son múltiples (dependen de cada escenario) y por eso tiene tres hojas. La determinación del árbol de probabilidad debe considerar las dependencias temporales y/o espaciales que pudieran existir entre los parámetros aleatorios. Si el proceso aleatorio es Markoviano la dependencia temporal sólo alcanzará un periodo. En un caso general se puede

extender más allá Ramos and Cerisola [2008].

2.3 LITERATURA RELACIONADA AL PROBLEMA

Fleischmann et al. [2000] hacen una revisión del diseño de redes de recuperación de producto. La mayoría de los trabajos incluyen sólo los flujos bidireccionales y clasifica estos estudios basados en casos reales en tres grupos, como las redes de reciclaje a granel, redes de productos de remanufactura y redes de producto reutilizable. En el primer grupo de redes de reciclaje a granel, Barros et al. [1998] estudió un problema multi-nivel para ubicación de instalaciones con capacidad como un problema lineal entero mixto (MILP) cuando el volumen y la localización de la demanda no se conoce previamente. Ellos determinan el número óptimo, la capacidad y la ubicación de los almacenes e instalaciones de limpieza para el reciclaje de la arena de residuos de la construcción. Louwers et al. [1999] determina los lugares adecuados y capacidades de los centros regionales de recuperación mediante la inversión, el tratamiento y los costos de transporte para los residuos de la alfombra. Los costos dependen del volumen y desarrollan un modelo no lineal continuo y es resuelto mediante el uso de software estándar. Realff [2004] utiliza un modelo multi-nivel para ubicación de instalaciones capacitadas de nuevo para el reciclaje de alfombras y decidir sobre el número y ubicación de los sitios de recolección y plantas de procesamiento y la cantidad de alfombras conseguidas cuando los sitios de entrega de los materiales recuperados se conocen. Realff et al. [1999] muestra que el volumen es muy importante para el diseño de la red utilizando este modelo. Ellos deciden en que procesos de reciclado instalar centros de recuperación para los distintos niveles.

En el segundo grupo de redes de productos de remanufactura, Salomon et al. [1995] desarrolla un modelo de programación lineal con capacidad, en el cual las instalaciones se fijan mediante la combinación del avance y retroceso los flujos de redes para determinar los caudales óptimos para la recuperación de máquinas copadoras.

Berger and Debaillie [1997] determinan la ubicación de los centros de desmontaje para su reutilización al extender una red de distribución existente. Se proponen distintos modelos MILP con capacidad para las diferentes versiones del problema para determinar la ubicación de los centros de desmontaje y de inspección y reparación separados. Jayaraman [1999] presenta un modelo de multi-producto capacitado donde la ubicación de almacenes, el número óptimo de instalaciones y la ubicación de las instalaciones de remanufactura y el número de productos recolectados se determinan teniendo en cuenta la inversión, transporte, tratamiento y gastos de almacenamiento en una empresa de remanufactura de equipo electrónico en los EE.UU.. Krikke et al. [1999], aplica un modelo tipo MILP par el problema de en un fabricante de fotocopiadoras en los Países Bajos, este hace el diseño de varios escalones de distribución para implementar red de logística inversa. Los lugares y los flujos de mercancías para los procesos de recuperación se han optimizado y se hace una selección entre dos lugares potenciales.

El tercer grupo sobre redes de producto reutilizable incluye el trabajo de Kroon and Vrijens [1995] que se centran en un sistema de depósito rentable basado en contenedores de plástico. Es un modelo de ubicación de almacenes no capacitados tratado como MILP.

El diseño de las redes de RL requiere la consideración de muchos temas diferentes en una perspectiva multidimensional. Ammons et al. [1999] caracteriza como tradicional los flujos desde la producción y distribución de las partes hasta los clientes, e inversa cuando los flujos son de reutilización, reciclado y eliminación de los productos. Desarrollan un modelo MILP para apoyar la toma de decisiones para el diseño y operación efectiva del sistema de logística inversa y responde a las preguntas siguientes:

- ¿se deben separar los productos electrónicos en centralizados o descentraliza-

dos?

- ¿En cual caso se debe establecer centros de reciclaje de simples o múltiples?
- ¿Qué tecnología se debe emplear para llevar a cabo las tareas de reciclaje?
- ¿Cuál debería ser su plan de expansión para el crecimiento de la red?
- ¿Cuáles son los productos finales más favorables y cómo las ubicaciones de sus centros de reciclaje afectan la rentabilidad de la red?
- ¿Qué volumen de material es necesario para justificar las tareas de reciclaje?
- ¿se debe almacenar material para su posterior procesamiento, si es que se excede la capacidad existente?

Krikke et al. [2003] desarrolló modelos cuantitativos para apoyar la toma de decisiones relativas tanto a la estructura del diseño de un producto, la modularidad, es decir, las reparaciones y el reciclado, y la estructura del diseño de la red logística. Los impactos ambientales se miden por el nivel de uso de energía y las funciones de los residuos. Los costes fijos son modelados como funciones lineales de los volúmenes para las instalaciones. A continuación, se aplica este modelo a un problema de suministro de ciclo cerrado para el diseño de la cadena de frigoríficos. El modelo se ejecuta por diferentes escenarios con diferentes ajustes de parámetros tales como el procesamiento centralizado contra el descentralizado, diseños alternativos de productos, calidad variable de retorno y cantidad, y la legislación ambiental potencial basado en la responsabilidad del productor.

Otra cuestión que se tiene en cuenta al diseñar las redes de RL es el valor de tiempo de devolución de productos comerciales Guide et al. [2006]. El tiempo (temporada), la categoría de producto y los mercados globales afectan a las tasas de retorno. estructura centralizada (rentable) vs estructura descentralizada (sensibles), la decisión también depende del costo de los retrasos y sus efectos en la recuperación

de activos. Por consiguiente, el nivel óptimo de la capacidad de manejo para retorno en la tienda y el centro de inspección, la elección de los modos de transporte con diferentes niveles de capacidad de respuesta y la elección del fin de su vida útil o de las estrategias de recolección de retorno debe ser decidido. Las dos estrategias principales para diseño de una red en la vida real son para suministrar y recolectar. En Wojanowski et al. [2007] se centran en el uso de un requisito de devolución de depósitos por el gobierno, cuando las tasas de recolección voluntaria son consideradas insuficientes. Ellos usan un marco de modelado continuo para diseñar una red de instalaciones para dejar y para determinar el precio de venta para maximizar las ganancias de la empresa en un depósito dar-reembolsar. Un modelo de elección discreta con los servicios públicos estocástico se utiliza y un análisis paramétrico se lleva a cabo para determinar el valor neto que puede ser recuperado de un producto devuelto a la empresa que participa voluntariamente en la recolección.

Los autores concluyen que la exigencia de devolución de productos no logra altas tasas de recolección de productos y señaló dos instrumentos de política de cortesía que pueden ser utilizados por el gobierno. Señalan que la eficacia en la recolección depende de la voluntad del consumidor para devolver un producto utilizado en el momento de la eliminación y la accesibilidad de las instalaciones de recolección. Por supuesto, la rebaja en el momento de la devolución (incentivos) aumentará la disponibilidad y las políticas de recolección son (de enrutamiento de los vehículos de colección) también muy importantes.

Wojanowski et al. [2003] Estudio estrategias basadas en incentivos de recolección del producto mediante un modelo continuo y el modelo estocástico es de utilidad. Comparan suministrar y recolección a las políticas con respecto a la adquisición de los productos utilizados. También examinan los efectos de la variable de parámetros de la colección de costos y la cantidad de productos utilizados en la elección de la estrategia de recolección.

Observaremos y plantearemos el comportamiento de los costos de remanufactura para que este siga siendo factible incluso en la más adversa situación presente para la demanda y la tasa de retorno. Entonces nos guía a la búsqueda de un modelo lo bastante robusto que mantenga buena posición ante el competidor y aumente nuestras ganancias en el diseño de la red.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

3.1 PLANTEAMIENTO

A partir del análisis de un modelo determinístico de tipo no linear entero mixto se modificó y extendió para su aplicación estocástica. Esto lo hacemos por medio de la evaluación de distintos escenarios que a través de su probabilidad de que sucedan podamos obtener un valor esperado para nuestro modelo estocástico para determinar una buena solución.

Este modelo determinará la localización de Centros de Inspección y/o recolección (CI), centros de distribución(CD) y plantas para remanufactura de productos(PR) en sistemas de producción que minimicen el costo total. Un CD distribuye el producto que llega de las plantas de manufactura y de remanufactura(PR) hacia las zonas de clientes(ZC) con el objetivo de satisfacer la demanda total. Un CI recolecta el material devuelto por las ZC destinado para remanufactura cumpliendo con la función de inspeccionar el material y determinar que porcentaje de lo recolectado sera enviado para remanufactura y cual sera deshechado. Una planta de remanufactura es la extensión de una planta de manufactura ya existente para poder ampliar la capacidad de remanufactura y así poder aprovechar el producto que proviene de los CI para remanufactura y ser devuelto al mercado como un producto

de consumo.

Se considera solamente un producto para el problema y este será elaborado por las plantas de Manufactura (PM) y PR de acuerdo a su capacidad de producción de cada una. La decisión de abrir PR, CD y CI viene acompañada de un costo fijo de apertura que afecta el costo total. La decisión consiste en localizar estas instalaciones en los mejores lugares dentro de los propuestos. Cabe señalar que los CD y CI no tienen una capacidad establecida.

Toda la demanda debe de ser satisfecha ya sea por producción normal o con ayuda de la remanufactura. Para cada zona de clientes k una fracción de su demanda debe ser retornada para los CI como tasa de retorno para la remanufactura dentro del proceso de logística inversa. El monto de lo recolectado es proporcional al precio de adquisición que ofrezcamos e inversamente proporcional al precio de adquisición del competidor. Solo existe un competidor. El monto de lo recuperado depende también del valor de recuperación b en el retorno del producto, este podría ser definido como la ganancia de remanufacturar el producto a producirlo desde la materia prima. El costo de una unidad manufacturada no varia al de una remanufacturada, así que tenemos el mismo precio para ambos. Solo un porcentaje del producto retornado de la zona de clientes k será ser utilizado para remanufactura, el resto será deshecho.

Usaremos los índices i para PR y PM, j para CD y CI, k para las zonas de clientes y s como la identidad de cada escenario. Los flujos se definen por medio de la siguiente gráfica 3.1

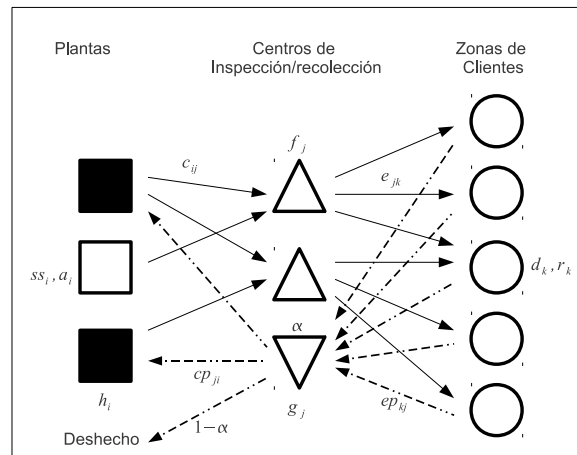


Figura 3.1: Diagrama básico del modelo

3.1.1 SUPOSICIONES DEL MODELO

1. Las zonas de clientes son conocidas, cada una con demanda no conocida.
2. Las zonas potenciales de ubicación para centros de almacenaje y de inspección son conocidas.
3. Los parámetros de costos (Abrir almacenes, plantas de remanufactura, centros de inspección transporte, etc.) son conocidos.
4. El precio de adquisición depende del precio de adquisición del competidor.
5. La tasa de retorno es estocástica y depende de la demanda.
6. La capacidad de manufactura es mayor a la capacidad de remanufactura $\sum_i V_{ji} \leq \sum_i a_i$
7. Existen dos tipos de flujo el primal que va de PM y PR a ZC y el inverso que va de ZC a PR.
8. Cuando solo existe el flujo primal únicamente se toma la decisión de abrir CD.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

3.2.1 NOTACIÓN

Indices.

- i Índice de plantas y RF.
 j Índice de almacenes y centros de insp.
 k Índice de zona de clientes.
 s Índice para escenarios.

VARIABLES BINARIAS.

- H_i Indica si una PR es abierta o cerrada en la zona i .
 Y_j Indica si un CD es abierto o cerrado en la zona j .
 T_j Indica si un CI es abierto o cerrado en la zona j .

VARIABLES CONTINUAS.

Log. tradicional.

- U_{ijs} Monto enviado de planta i al CD j en el escenario s .
 X_{jks} Monto enviado de DC j a ZC k en el escenario s .

Log. Inversa.

- W_{kjs} Monto enviado de ZC k a CI j en el escenario s .
 V_{jis} Monto enviado de CI j a PR i en el escenario s .

- R_{ks} Total recuperado de ZC k en el escenario s .
 L Precio de compra.

PARAMETROS.

- d_{ks} Demanda del cliente k en el escenario s .
 c_{ij} Costo de enviar una unidad de la planta i a CD j .
 e_{jk} Costo de enviar una unidad de CD j a ZC k .

- ep_{kj} Costo de enviar una unidad de ZC k a CI j .
- cp_{ji} Costo de enviar una unidad de CI j a PR i .
- f_j Costo fijo de abrir un CD en la zona j .
- g_j Costo fijo de abrir un CI en la zona j .
- h_i Costo fijo de abrir un PR en la zona i .
- ss_i Capacidad de manufactura de la planta i .
- a_i Capacidad de re-manufactura de la planta i .
- α Porcentaje de producto servible.
- τ_s Porcentaje de producto recuperado.
- p_s Probabilidad de escenario s .
- b Costo unitario de salvamento.
- l Precio de compra del competidor.

3.2.2 MODELO MATEMÁTICO

Función objetivo.

$$z = \min \sum_j f_j Y_j + \sum_j g_j T_j + \sum_i h_i H_i + \sum_s p_s \left(\sum_i \sum_j c_{ij} U_{ijs} \right) + \sum_j \sum_k e_{jk} X_{jks} + \sum_j \sum_i cp_{ji} V_{jis} + \sum_k \sum_j ep_{kj} W_{kjs} + \sum_k (L - b) R_{ks}$$

Restricciones

$$\sum_j X_{jks} = d_{ks} \quad \forall k, s. \quad (3.1)$$

$$\sum_j W_{kjs} = R_{ks} \quad \forall k, s. \quad (3.2)$$

$$\sum_k X_{jks} = \sum_i U_{ijs} \quad \forall j, s. \quad (3.3)$$

$$\alpha \sum_k W_{kjs} = \sum_i V_{jis} \quad \forall j, s. \quad (3.4)$$

$$\sum_j U_{ijs} - \sum_j V_{jis} \leq ss_i \quad \forall i, s. \quad (3.5)$$

$$\sum_j V_{jis} \leq U_{ijs} \quad \forall i, s. \quad (3.6)$$

$$\sum_j V_{jis} \leq a_i H_i \quad \forall i, s. \quad (3.7)$$

$$X_{jks} \leq d_{ks} Y_j \quad \forall j, k, s. \quad (3.8)$$

$$W_{jks} \leq \tau_s d_{ks} T_j \quad \forall j, k, s. \quad (3.9)$$

$$R_{ks} = \tau_s d_{ks} \frac{L}{L+l} \quad \forall j, s. \quad (3.10)$$

$$X_{jks}, W_{kjs}, U_{ijs}, V_{jis}, L, R_{ks} \geq 0 \quad \forall i, j, k, s. \quad (3.11)$$

$$Y_j, T_j, H_i \in (0, 1) \quad i, j. \quad (3.12)$$

Para el modelo la función objetivo describe para la primera etapa la suma de los costos fijos de acuerdo al número de instalaciones que se deseen abrir y posteriormente se obtiene el valor esperado de la integración de los escenarios que se estén considerando en cuanto a la demanda y el flujo logístico.

La ecuación 3.1 exige que toda la demanda de los clientes debe de ser abastecida para cualquier escenario que se presente. Cabe señalar que el cliente puede ser abastecido de uno o mas centros de distribución. En 3.2 garantizamos que todo lo que se retorna estará siendo enviado a los centros de inspección para todo escenario. Para 3.3 estamos asegurando el flujo que pasa por los centros de distribución sea enviado, lo mismo para 3.4 pero con la característica que es el proceso inverso. Podemos ver que en esta ecuación multiplicamos por el porcentaje de la tasa de retorno para que solo llegue el material devuelto con respecto a la demanda. La ecuación 3.5 asegura que el producto manufactura sea acorde a la capacidad de manufactura de las plantas. La restricción 3.6 fuerza a que todo producto que entre para remanufactura sea procesado y enviado nuevamente a venta a clientes para todo escenario.

3.7 asegura que la capacidad de remanufactura no sea superada. Las restricciones 3.8 y 3.9 aseguran que el flujo pase solamente si se ha decidido abrir el CD y CI respectivamente. 3.10 describe el material recolectado y enviado a los CI como una función del precio de adquisición del competidor. Las restricciones 3.11 y 3.12 son las restricciones de no negatividad y de integralidad respectivamente.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN

Como hemos observado en el capítulo anterior la ecuación 3.10 de nuestro modelo hace el problema del tipo no lineal entero mixto debido a la restricción donde involucra el precio de adquisición que se ofrece al cliente. Hemos intentado resolverlo íntegramente con la ayuda de solucionadores de este tipo de problemas, sin embargo estos no han demostrado eficacia, así que se ha propuesto atacar la variable que hace nuestro problema no lineal mediante una búsqueda unidimensional con el objetivo de encontrar el mejor valor para esta variable del precio de adquisición L y así poder minimizar la función objetivo principal.

4.1 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Con la parametrización de la variable L el problema se puede manejar como lineal entero mixto. Se han probado dos distintos métodos de solución, el primero utilizando el método de ramificación y acotamiento anidado al método de la sección dorada mediante el uso de CPLEX, el cual ha demostrado una potente capacidad de resolver estos problemas. También se propone aplicar la técnica de descomposición de Benders que ha demostrado mejor rendimiento para este modelo en tanto a resultado del costo total y eficiencia en el tiempo de solución.

4.1.1 BÚSQUEDA DE LA SECCIÓN AUREA

Para encontrar el mejor valor del precio de adquisición L utilizaremos la búsqueda de la sección dorada, fijando esta variable como parámetro y evaluando el modelo por medio de otros métodos hasta conseguir el mejor valor. La ventaja de aplicar este método de búsqueda unidimensional es que nuestro problema se convierte en el tipo lineal entero mixto, que es más fácil de resolver. El algoritmo 1 de la sección dorada propuesto para el problema y su diagrama de flujo es la figura 4.1.

Algoritmo 1 Método de la Sección dorada

Entrada: $L_i \leftarrow 0 \vee L_u \leftarrow l \vee D > 0$

Salida: L_b

- 1: Calcula número dorado mediante $R = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$
 - 2: **ciclo condicional** $D > \epsilon$ **hacer**
 - 3: $L_1 \leftarrow L_i + D$
 - 4: $L_2 \leftarrow L_u - D$
 - 5: Evalúa $F(L_1)$ mediante el método propuesto.
 - 6: Evalúa $F(L_2)$ mediante el método propuesto.
 - 7: **si** $F(L_1) < F(L_2)$ **entonces**
 - 8: $L_i \leftarrow L_2$
 - 9: **en otro caso**
 - 10: $L_u \leftarrow L_1$
 - 11: **fin si**
 - 12: $D = R * (L_u - L_i)$
 - 13: **fin ciclo condicional**
 - 14: $L_i \leftarrow L_b$
 - 15: **devolver** L_b
-

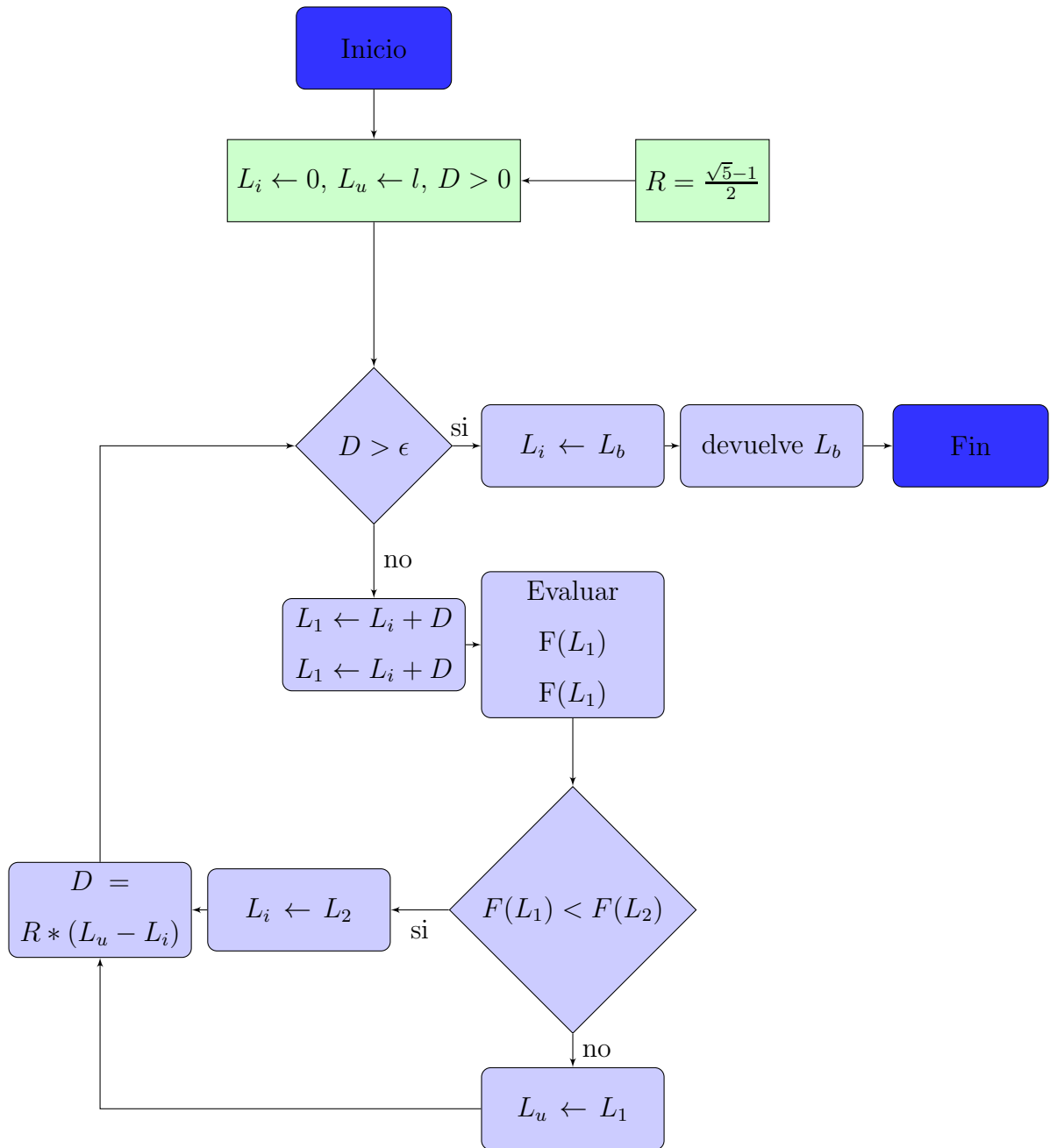


Figura 4.1: Diagrama de flujo del método de la sección dorada

Para resolver el problema completamente se debe aplicar iterativamente en conjunto con la técnica seleccionada para resolver el problema lineal (ramificación y acotamiento o descomposición de Benders) acotando la solución del problema hasta encontrar la solución óptima.

4.1.2 DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS

El método de descomposición de benders ha sido aplicado exitosamente en la resolución de problemas enteros mixtos en la literatura. Este procedimiento se basa en el principio de que cada problema entero mixto puede ser separado en dos partes, el subproblema de Benders que maneja las variables continuas y el problema maestro con las variables enteras o complicadas y una variable adicional continua. resolviendo estos problemas sucesivamente retroalimentandolos mutuamente se acerca a la solución óptima del problema.

SUBPROBLEMA DE BENDERS

Fijamos las variables binarias que interpretan las decisiones de localización de las instalaciones Y_j, T_j y H_i , a valores factibles $\overline{Y}_j, \overline{T}_j, \overline{H}_i$ y la variable L fijada anteriormente como \overline{L} produce el siguiente subproblema de Benders SP_B .

$$SP_B = \min \sum_s p_s \left(\sum_i \sum_j c_{ij} U_{ijs} + \sum_j \sum_k e_{jk} X_{jks} + \sum_j \sum_i cp_{ji} V_{jis} + \sum_k \sum_j ep_{kj} W_{kjs} \right)$$

$$\sum_j X_{jks} = d_{ks} \quad \forall k, s. \quad (4.1)$$

$$\sum_j W_{kjs} = R_{ks} \quad \forall k, s. \quad (4.2)$$

$$\sum_k X_{jks} = \sum_i U_{ijs} \quad \forall j, s. \quad (4.3)$$

$$\alpha \sum_k W_{kjs} = \sum_i V_{jis} \quad \forall j, s. \quad (4.4)$$

$$\sum_j U_{ijs} - \sum_j V_{jis} \leq ss_i \quad \forall i, s. \quad (4.5)$$

$$\sum_j V_{jis} \leq U_{ijs} \quad \forall i, s. \quad (4.6)$$

$$\sum_j V_{jis} \leq a_i \bar{H}_i \quad \forall i, s. \quad (4.7)$$

$$X_{jks} \leq d_{ks} \bar{Y}_j \quad \forall j, k, s. \quad (4.8)$$

$$W_{jks} \leq \tau_s d_{ks} T_j \quad \forall j, k, s. \quad (4.9)$$

$$R_{ks} = \tau_s d_{ks} \frac{\bar{L}}{\bar{L} + l} \bar{T}_j \quad \forall j, s. \quad (4.10)$$

$$X_{jks}, W_{kjs}, U_{ijs}, V_{jis} \geq 0 \quad \forall i, j, k, s. \quad (4.11)$$

Implementando nuevas variables duales $\lambda_{ks}, \beta_{ks}, \gamma_{js}, \theta_{js}, \mu_{is}, \omega_{is}, \epsilon_{is}, \sigma_{jks}$, y ψ_{jks} correspondiente a cada una de las restricciones del subproblema podemos construir el subproblema dual SPD_B de SP_B y se escribe de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} DSP_B : \max Z_{dsp} = & \sum_k d_{ks} \lambda_{ks} - \sum_i \mu_{is} s_{is} - \sum_i \epsilon_{is} a_{is} \bar{H}_i - \sum_j \sum_k \sigma_{jks} d_{ks} \bar{Y}_{js} \\ & - \sum_j \sum_k \psi_{jks} \tau_s d_{ks} \bar{T}_j + \sum_k \tau_s \beta_{ks} d_{ks} \frac{\bar{L}}{\bar{L} + l} \end{aligned}$$

s.t.

$$-\gamma_{js} - \mu_{is} + \omega_{is} \leq c_{ijs} \quad \forall i, j, s$$

$$\lambda_{ks} + \gamma_{js} - \sigma_{jks} \leq e_{jks} \quad \forall j, k, s$$

$$-\theta_{js} + \mu_{is} - \omega_{is} - \epsilon_{is} \leq cp_{jis} \quad \forall i, j, s$$

$$\beta_{ks} + \alpha \theta_{js} - \psi_{jks} \leq ep_{kjs} \quad \forall j, k, s$$

$$\mu_{is}, \omega_{is}, \epsilon_{is}, \sigma_{jks}, \psi_{jks} \geq 0, \quad \forall i, j, s$$

$$\lambda_{ks}, \beta_{ks}, \gamma_{js}, \theta_{js} \quad \text{no restringidas}$$

El subproblema de Benders (SPD) puede resolverse mediante el método de ramificación y acotamiento dado que se torna fácil de resolver computacionalmente hablando

La solución de SPD_B es usada para generar los cortes que se irán agregando al problema maestro:

$$\min Z_0$$

s.t

$$Z_0 \geq \sum_j f_j \bar{Y}_j + \sum_j g_j \bar{T}_j + \sum_i h_i \bar{H}_i + \sum_{ks} (\bar{L} - b) \tau_s d_{ks} \frac{\bar{L}}{\bar{L}+l} + Z_{SPD}$$

Si la solución del SPD es no acotada, un vector de dirección es agregado al problema maestro relajado, el cual se encuentra resolviendo el siguiente problema: *max dummy*

$$\begin{aligned} \sum_k d_{ks} \lambda_{ks} - \sum_i \mu_{is} s s_{is} - \sum_i \epsilon_{is} a_{is} \bar{H}_i - \sum_j \sum_k \sigma_{jks} d_{ks} \bar{Y}_{js} \\ - \sum_j \sum_k \psi_{jks} \tau_s d_{ks} \bar{T}_j + \sum_k \tau_s \beta_{ks} d_{ks} \frac{\bar{L}}{\bar{L}+l} = 1 \\ -\gamma_{js} - \mu_{is} + \omega_{is} \leq 0 \quad \forall i, j, s \\ \lambda_{ks} + \gamma_{js} - \sigma_{jks} \leq 0 \quad \forall j, k, s \\ -\theta_{js} + \mu_{is} - \omega_{is} - \epsilon_{is} \leq 0 \quad \forall i, j, s \\ \beta_{ks} + \alpha \theta_{js} - \psi_{jks} \leq 0 \quad \forall j, k, s \end{aligned}$$

El algoritmo de la descomposición de Benders es el siguiente:

Algoritmo 2 Algoritmo del método de descomposición de Benders

- 1: Inicializa
 - 2: Fija las variables binarias en valores factibles.
 - 3: Define $LB := -\infty$
 - 4: Define $UB := \infty$
 - 5: **ciclo condicional** $UB - LB > \epsilon$ **hacer**
 - 6: Resuelve el SPD_B
 - 7: **si** No acotado **entonces**
 - 8: Obtén un corte de factibilidad.
 - 9: Agrega el corte al problema maestro.
 - 10: **en otro caso**
 - 11: Obtén un corte de optimalidad.
 - 12: Agrega un corte al problema maestro
 - 13: Resuelve y actualiza UB si el valor de la solución de SPD_B es mejor.
 - 14: **fin si**
 - 15: resuelve el problema maestro
 - 16: $\text{mín}_{Y,T,H}\{z|\text{cortes}\}$
 - 17: Actualiza LB como \bar{z}
 - 18: **fin ciclo condicional**
-

CAPÍTULO 5

RESULTADOS COMPUTACIONALES

Para la experimentación computacional, se evaluó el problema mediante las dos alternativas anteriormente propuestas, la primera es mediante la introducción del método de ramificación y acotamiento y la segunda mediante la programación del método iterativo, en este caso Descomposición de Benders.

Entonces, los resultado se obtuvieron mediante el empleo de un código desarrollado para este problema escrito en el lenguaje GAMS, en una terminal con Procesador Sun Fire V440, conectado a 4 Procesadores de 1602 Hhz, Ultra SPARC III con 1 MB DE CACHE y Memoria de 8 GB.

Se generaron instancias y se evaluaron primeramente para el problema determinístico, Tombus [2009] ,con la finalidad de obtener valores de demanda alta y baja así como para la tasa de retorno alta y baja para evitar infactibilidad, dado que evaluaremos el problema estocástico mediante escenarios y estos valores son necesarios para obtener soluciones para el problema en general.

5.1 GENERACIÓN DE INSTANCIAS.

Las instancias que se utilizaron fueron generadas mediante la generación de números aleatorios entre 0 y 1 con una distribución normal, y son usados para la

simulación de las coordenadas de las zonas potenciales de localización de PM, CD, CI y ZC, véase la figura 5.1. Además números aleatorios entre 0 y 100 para la generación de las demandas de cada una de las zonas de clientes. Estos datos fueron codificados en archivos tipo GDX para su inclusión en el código desarrollado en lenguaje GAMS.

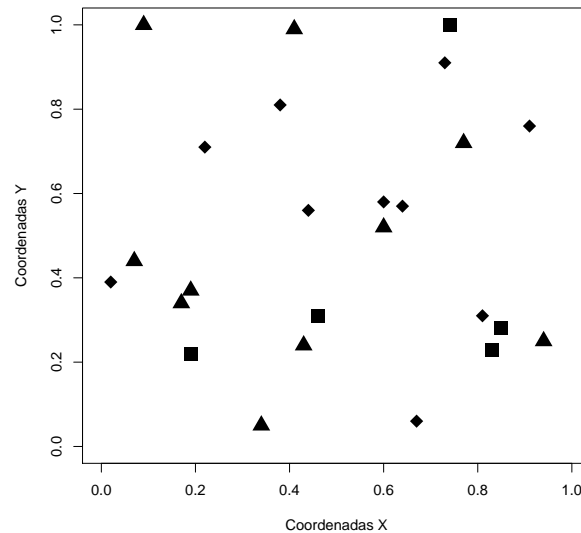


Figura 5.1: Simulación de coordenadas para la localización de instalaciones

5.1.1 TAMAÑO DE INSTANCIAS

Los tamaños de instancias fueron fijados para las comparaciones entre las alternativas de solución y estandarizar la experimentación para el problema. Para esto debemos tener claro el formato que se presenta en los resultados, este es construido en base a:

1. Número de plantas: Número de plantas existentes y activas para satisfacer la demanda, estas también son centros potenciales para remanufactura.
2. Número de centros de distribución y/o inspección: Es el número de zonas potenciales donde puede ubicarse un centro de distribución, así mismo representa

la zonas potenciales para la instalación de de centros de recolección de producto proveniente del cliente que enviará remanufactura a las plantas si se presenta el caso.

3. Número de zonas de clientes: Este es el número de zonas de clientes ya existentes de donde proviene la demanda y la tasa de retorno para nuestro modelo, estas zonas son fijas y distribuidas aleatoriamente.

Entonces el formato de tamaño de instancia estará compuesto por *Número de plantas-Numero de centros de distribución-Numero de zonas de clientes*(PM-CI-ZC). Partiendo de esta idea, los tamaños de instancia que manejamos se muestran en la siguiente tabla 5.1 .

Instancia	Tamaño	Consideración
1	5-10-15	Pequeña
2	5-10-20	Pequeña
3	5-10-30	Pequeña
4	8-15-50	Mediana
5	5-20-100	Mediana
6	10-20-50	Mediana
7	10-30-100	Mediana
8	20-50-150	Mediana
9	30-60-100	Grande
10	20-50-150	Grande
11	30-100-200	Grande

Tabla 5.1: Tabla de instancias

5.1.2 VALORES DE LOS PARÁMETROS

Los parámetros de entrada de los precios fijos para PR, CD y CI fueron del 5000, 7500 y 10000 unidades respectivamente, así mismo se fijo un precio de adquisi-

ción del competidor l en 10 unidades y un costo de salvamento b en 20, para las capacidades de las plantas y plantas de remanufactura se utilizó la siguiente fórmula que nos asegura factibilidad en el problema:

$$a_i = \left[\frac{\alpha \tau_s \sum_{ks} d_{ks}}{n} \right] \quad (5.1)$$

$$ss_i = \left[\frac{\sum_{ks} d_{ks}}{n} \right] \quad (5.2)$$

5.1.3 EXPERIMENTOS PARA DEFINIR PARÁMETROS BAJO INCERTIDUMBRE.

Se desarrollaron diversos experimentos estadísticos, en base a la solución del modelo con instancias pequeñas, con la finalidad de determinar los valores que estos adquirirán para presentar una solución robusta dentro de nuestro modelo estocástico.

Para determinar sobre qué factores evaluaremos la incertidumbre se experimento con la variación en los valores de los parámetros controlados para observar su tendencia y establecer de la misma manera su relevancia en la afectación del valor objetivo.

Entonces se realiza una prueba de correlación a tres factores del problema con respecto al valor objetivo. Elegiremos aquellos que tengan una fuerte correlación y una tendencia lineal mas clara, con el fin de que nos permita trabajar con la confianza de que el problema aun será robusto y no entren complicaciones de carácter de imprecisión.

Se evalúa la prueba sobre la demanda que aunque ya sabemos que presenta una gran influencia en la función objetivo verificamos que siga una tendencia clara que nos permita trabajar el modelo con confianza. Se aplica la prueba de correlación y el

resultado marca una tendencia negativa, con una precisión casi exacta, el coeficiente de correlación es: -0.99815 y en la gráfica 5.2 claramente se muestra su comportamiento, que nos dice que si la demanda aumenta nuestro valor objetivo disminuye en gran manera.

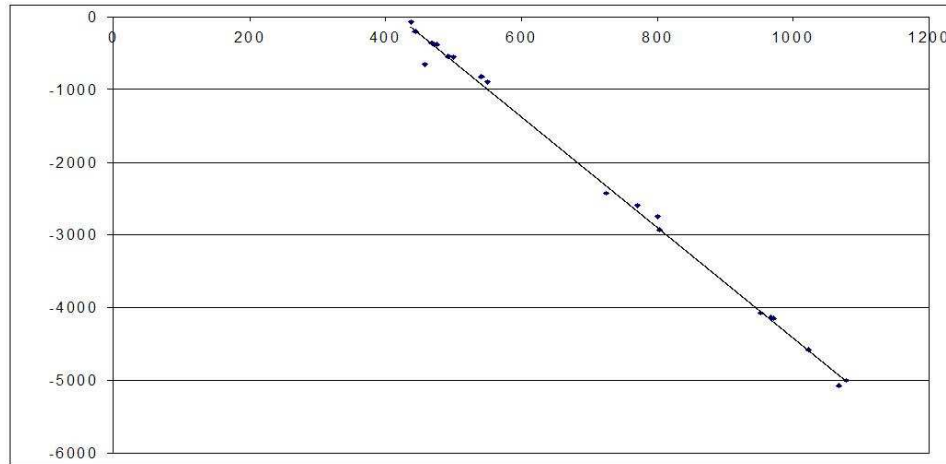


Figura 5.2: Gráfico de correlación de la demanda

De manera simultánea se obtuvo el valor del coeficiente de correlación de la tasa de retorno con un valor de -0.99673 , que al igual que la demanda también tiene un alto grado de correlación con el valor objetivo y su tendencia es negativa, lo que significa que entre más retorno tengamos más pequeña será nuestra función objetivo, figura 5.3.

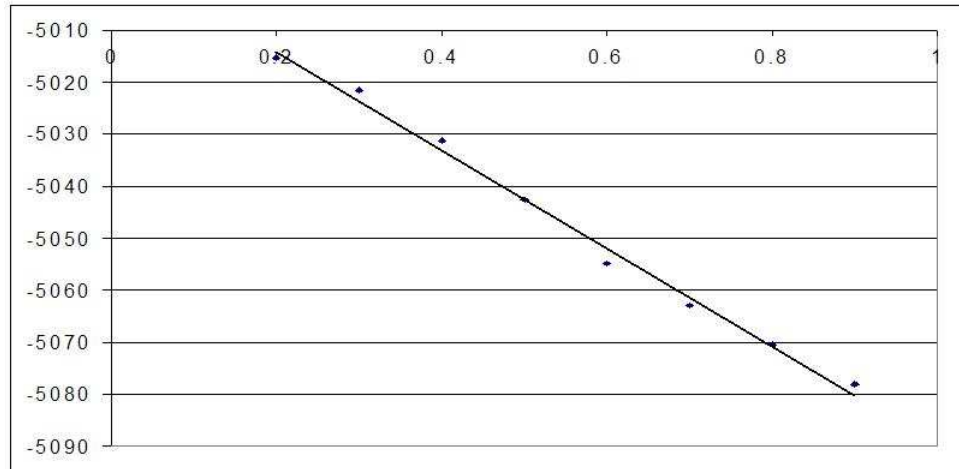


Figura 5.3: Gráfico de correlación de la tasa de retorno

Finalmente también se analizó el valor del precio de adquisición del competidor que si bien también obtuvo un valor de correlación alto de 0.92643 este marca una tendencia positiva pero no se observa un claro ajuste lineal, mas bien tiene un comportamiento de otro tipo como se observa en la gráfica 5.4 .

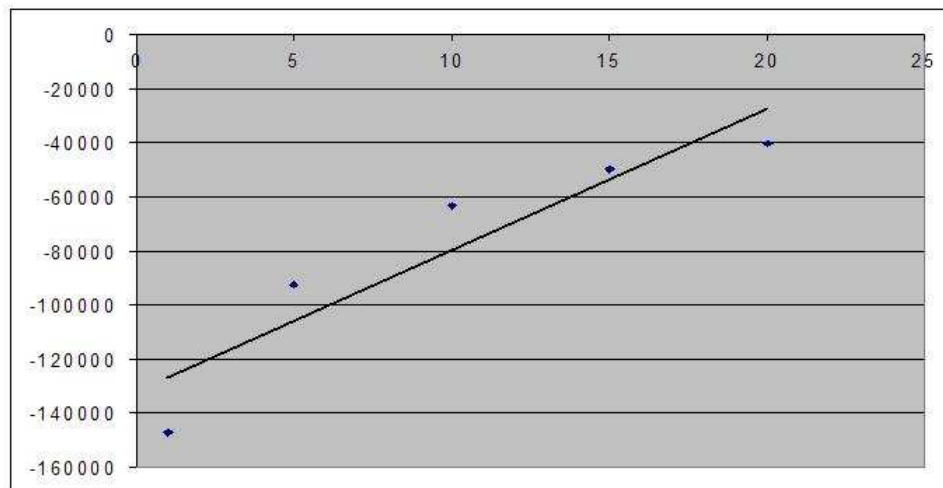


Figura 5.4: Gráfico de correlación del precio de adquisición del competidor

Por lo tanto, dentro de los factores evaluados se toma la determinación de que para la construcción de los escenarios se usen la interacción de la demanda y la tasa de retorno de producto proveniente directamente del cliente.

5.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO PARA LAS METODOLOGÍAS DE SOLUCIÓN.

Se evaluó el modelo primeramente en instancias pequeñas para observar su comportamiento, un ejemplo gráfico de la solución para el modelado estocástico se observa en la figura 5.5.

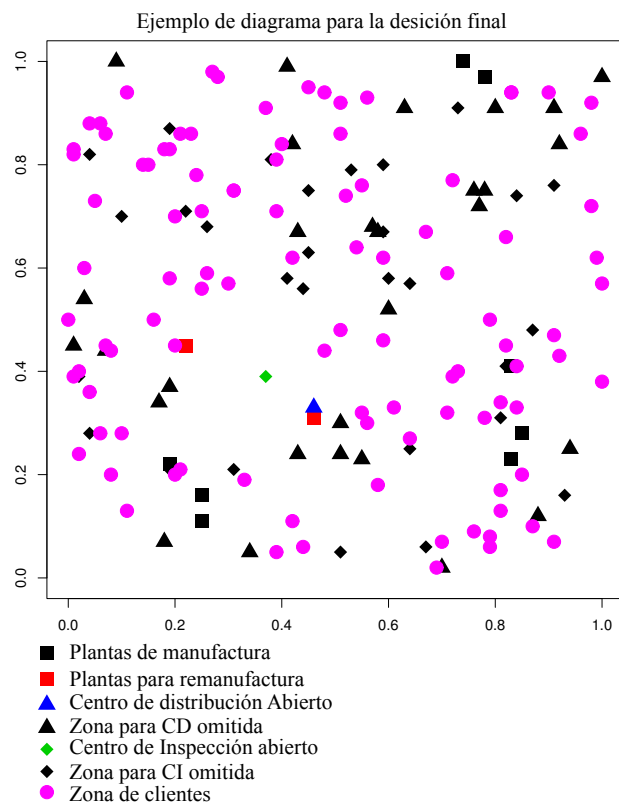


Figura 5.5: Ejemplo gráfico de instancia resuelta mediante la programación estocástica

Se muestran en la tabla 5.2 las alternativas propuestas para sus tiempos de solución y calidad de la solución, tanto para la forma extensiva en el método de ramificación y acotamiento como para el método de descomposición de Benders,

usando para ambos el método de la sección dorada para la parametrización de la variable L .

Instancia	Ramificación y acotamiento			Benders		
	Costo	L	Tiempo(seg)	Costo	L	Tiempo(seg)
2-3-6	612.36	6.22	9.93	612.36	6.22	290.09
3-10-20	1181.69	6.28	241.29	1181.69	6.28	3115.55
5-10-25	1167.07	5.01	399.69	1167.07	5.01	5709.51
10-30-100	24930.01	2.50	58289.96	-	-	360000+

Tabla 5.2: Tabla de desempeño de métodos de solución.

Como se puede observar en la tabla anterior el método de descomposición de Benders no ha tenido buen desempeño comparado con el uso del método de ramificación y acotamiento. De hecho se puede observar diferencia mayor a medida que crece de la instancia. Tombus [2009] señala que el método de descomposición de Benders es mejor en instancias grandes, en base a esto se evaluaron instancias medianas y grandes en un tiempo límite de 3 horas, para observar el comportamiento de cada uno con estas instancias, los resultados son presentados en la tabla 5.3.

Instancia	Ramificación y acotamient				Benders			
	L	Mejor valor	Optimo	Tiempo	L	Mejor Valor	Optimo	Tiempo
5-10-20	6.71	30122.44	Si	178.45	6.71	30122.44	Si	2173.31
5-20-100	6.67	20522.43	Si	9947.01	6.4	20589.94	No	12080.44
5-25-100	6.66	20524.43	No	10927.38	6.18	20666.62	No	11441.52
5-30-10	6.53	20455.78	No	11539.44	6.18	20570.04	No	13563.9
10-20-50	5.41	22143.06	Si	10826.61	6.11	22453.16	No	12401.53
10-20-100	5.21	13656.07	No	11713.8	6.54	13665.28	No	12799.36
10-25-50	5.48	22143.27	Si	9486.32	5.55	22448.5	No	14379.59
10-25-100	6.1	19989.32	No	10882.71	6.1	19989.32	No	12932.53
10-30-100	5.81	13526.48	No	12004.07	6.84	19865.82	No	11480.66
20-50-100	3.82	63267.08	No	34264.09	-	-	No	40000+
20-50-150	3.82	58275.36	No	58105.93	-	-	no	60000+

Tabla 5.3: Tabla de desempeño de métodos de solución con límite de tiempo.

En el tiempo límite establecido del método de ramificación y acotamiento, obtuvo en instancias medianas el óptimo en más ocasiones que el método de descomposición de Benders. Entonces, esto demuestra que el método de descomposición de Benders no mejora el desempeño para instancias grandes, inclusive se empeora su búsqueda a tal punto de no devolver solución alguna sobrepasando los límites de tiempo establecidos.

Finalmente presentamos el gráfico 5.6 donde observamos la evolución del tiempo de ambos métodos. Podemos observar que el incremento es exponencial en el tiempo para el método de Benders.

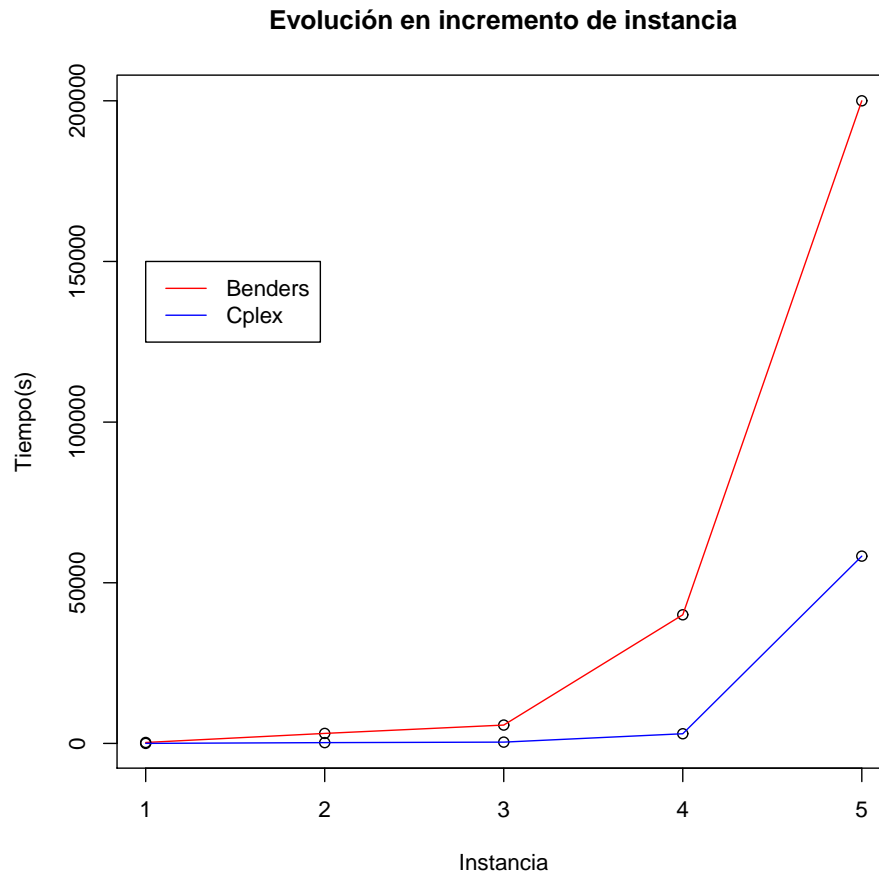


Figura 5.6: Gráfico comparativo en la evolución en tiempo para los métodos propuestos

5.3 DESEMPEÑO DEL MODELO ESTOCÁSTICO CONTRA EL DETERMINÍSTICO.

Una vez determinada la ventaja del uso del método de ramificación y acotamiento sobre el método de descomposición de Benders para el modelo estocástico, se realiza la comparativa de desempeño del modelo estocástico propuesto con el modelo determinístico.

En teoría al ampliar el número de escenarios a evaluar este debiera aumentar su tiempo de solución proporcional a los escenarios, por lo tanto, evaluamos ambos modelos(determinístico y estocástico) con los mismos datos para coordenadas pero en variación de la demanda con una distribución normal, tasa de retorno y del número de escenarios con la finalidad de obtener medidas de comparación.

La tabla 5.4 Presenta la comparativa para el caso del modelo determinístico contra el estocástico de 4 escenarios.

Instancia	Estocástico			Determinístico			Variación		
	Mínimo	L	Tiempo(s)	Mínimo	L	Tiempo(s)	+ % Costo	%L	+Tiempo
5-10-20	30122.81	6.68	200.07	27531.55	6.66	5.5	9.41	0.30	30.04
5-10-30	28654.17	6.65	362.2	25538.57	6.64	7.05	12.20	0.15	54.55
5-20-60	25306.67	6.66	3367.16	17374.09	6.64	36.16	45.66	0.30	507.10
5-20-100	20524.43	6.66	10672.82	17275.05	6.66	89.21	18.81	0.00	1602.53
8-15-50	28298.29	3.32	3157.15	24435.89	3.32	19.81	15.81	0.00	950.95
8-20-50	24678.25	3.36	4256.86	24542.35	3.32	29.85	0.55	1.19	1282.19
10-20-50	29242.59	2.48	7925.93	25350.37	2.48	28.41	15.35	0.00	3195.94
10-20-60	28671.1	2.48	11012.39	25315.79	2.48	42.51	13.25	0.00	4440.48
10-30-50	29113.41	2.48	29113.41	25350.37	2.48	51.94	14.84	0.00	11739.28
10-30-100	-	-	-	18413.27	2.48	292.72	-	-	-

Tabla 5.4: Tabla de comparación en desempeño de modelo determinístico y estocástico con 4 escenarios

Gráficamente se observa la tendencia que sigue esta comparativa con respecto de las variables de salida. Se presenta la gráfica 5.7 donde observamos la diferencia en la solución del modelo determinístico y el estocástico. Visualmente podemos concluir que se incrementa para toda instancia el valor final de nuestra solución para el modelo estocástico, esto es debido a que el modelo ahora considera los factores de riesgo para los malos escenarios, es decir, aquellos que presenten baja demanda y bajo retorno.

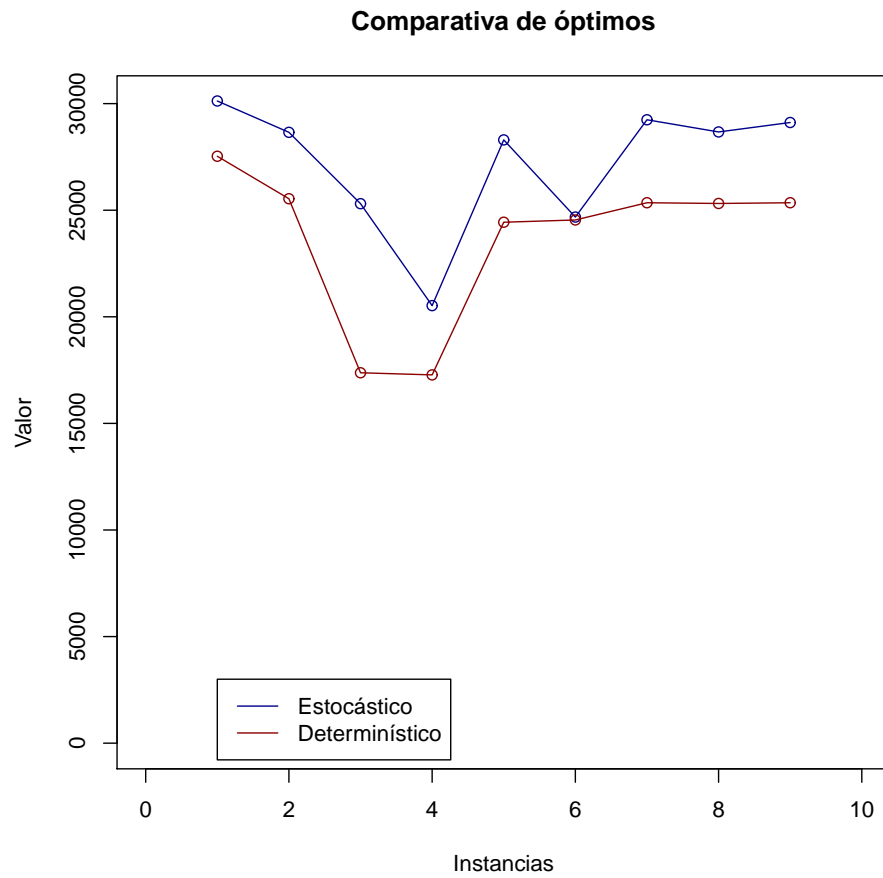


Figura 5.7: Diferencia para las soluciones obtenidas entre el modelo estocástico y el determinístico

La gráfica 5.8 presenta la diferencia entre el valor del precio de adquisición L , se puede ver que el valor no varía mucho para las dos formulaciones de hecho casi no es notoria la diferencia de manera visual.

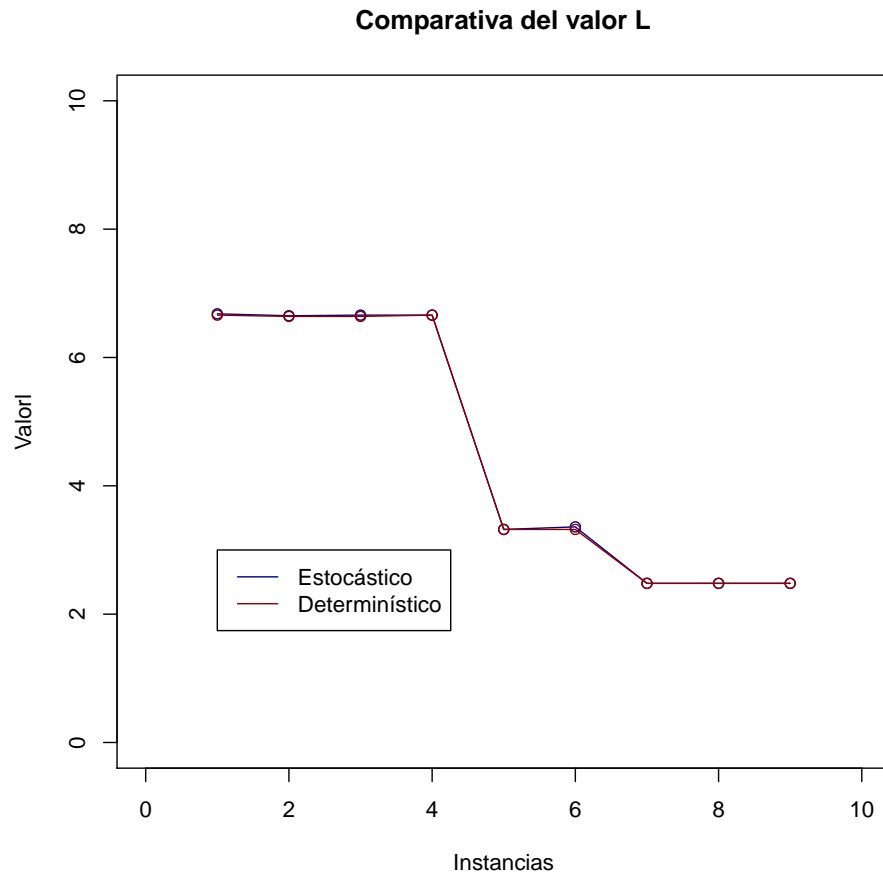


Figura 5.8: Diferencia para la variable de decisión L entre el modelo estocástico y el determinístico

En relación al tiempo de ejecución, el modelo estocástico mostró una gran desventaja con respecto del modelo determinístico. Se planteaba la teoría de que este aumentara proporcionalmente con respecto a los escenarios pero en la comparación para el modelo con cuatro escenarios este tiende a crecer exponencialmente como consecuencia de que la búsqueda se vuelve extenuante debido a la multiplicación de restricciones integradas conforme al número de escenarios. Observemos en la gráfica 5.9 que entre más crece nuestro tamaño de instancia el tiempo se dispara.

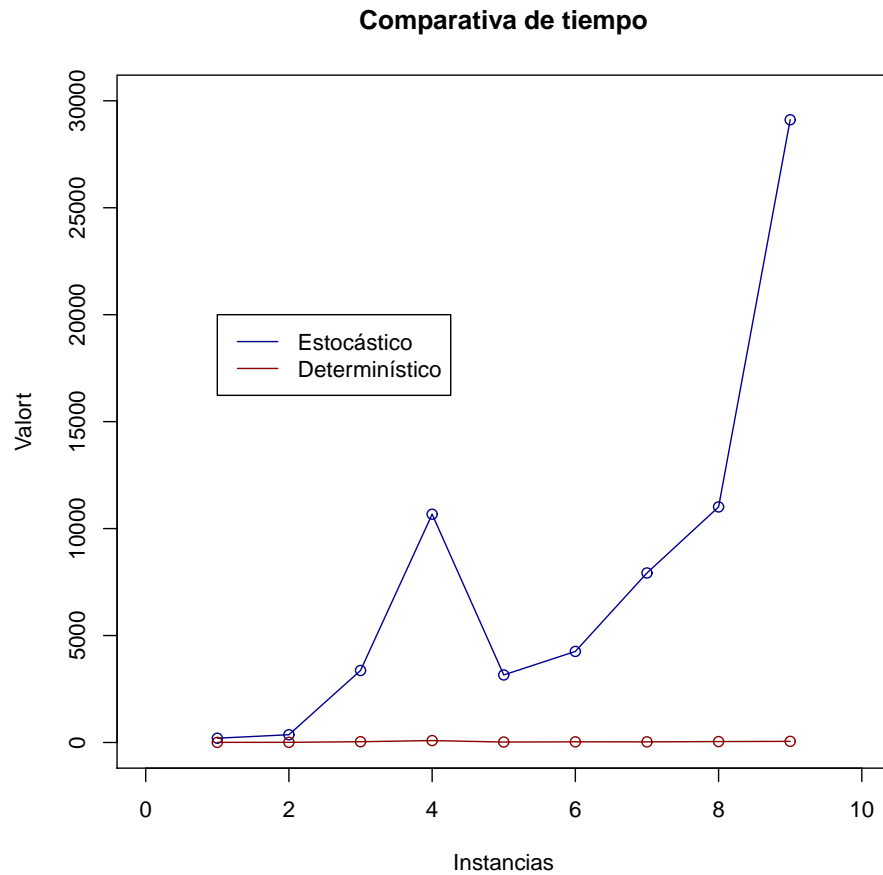


Figura 5.9: Diferencia para los tiempos obtenidos en la solución del modelo estocástico y el determinístico

5.4 VARIACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se observa claramente que el tiempo de resolución para nuestro modelo sigue siendo un punto que tenemos que atacar. Para mejorar el desempeño computacional, se propone **reducir la precisión** en la obtención de la solución gradualmente y ver hasta qué grado afecta nuestra solución final.

La tabla 5.5 muestra la diferencia de soluciones para la variación de la precisión tanto para el método de la sección dorada como para la precisión del método de

ramificación y acotamiento y la combinación de ambas para un tamaño de instancia mediano(5-10-30).

Instancia	GAP en B& B (%)	gap GS (%)	Objetivo	Valor L	Tiempo	%Total	%Lvalue	%tiempo
5-10-30	0	0	28988.14	6.66	397.57	1.000	1.000	1.000
5-10-30	15	0	29316.55	6.66	122.21	0.989	1.000	3.253
5-10-30	30	0	29316.55	6.66	88.33	0.989	1.000	4.501
5-10-30	40	0	29316.55	6.66	109.85	0.989	1.000	3.619
5-10-30	0	10	29029.47	6.18	140.22	0.999	1.078	2.835
5-10-30	10	10	29220.5	5.28	85.43	0.992	1.261	4.654
5-10-30	20	10	29357.4	6.18	66.35	0.987	1.078	5.992
5-10-30	30	10	29357.4	6.18	9.83	0.987	1.078	40.445
5-10-30	40	10	29357.4	6.18	15.82	0.987	1.078	25.131
5-10-30	0	20	29029.47	6.18	92.04	0.999	1.078	4.320
5-10-30	10	20	29220.5	5.28	30.98	0.992	1.261	12.833
5-10-30	20	20	29357.4	6.18	38.72	0.987	1.078	10.268
5-10-30	30	20	29357.4	6.18	9.75	0.987	1.078	40.776
5-10-30	40	20	29357.4	6.18	13.34	0.987	1.078	29.803

Tabla 5.5: Tabla de rendimiento en reducción de precisión de la solución

Se observa que el tiempo mejora conforme reducimos la precisión y es destacable que las soluciones se mantienen en un nivel aceptable, es decir, la diferencia entre la solución óptima y sus similares relajados muestra muy poca variación, en tanto sigue manteniendo una configuración factible para el diseño de la red.

5.5 COMPORTAMIENTO DE LAS PROBABILIDADES DE LOS ESCENARIOS

Dentro de la formulación estocástica por escenarios, el manejo de la probabilidad de que ocurran los diversos escenarios puede influir en gran manera a incrementar o decrementar el valor de nuestra función objetivo. Hasta el momento hemos trabajado nuestros escenarios con una distribución uniforme para la probabilidad de cada uno de ellos ahora se crea una tabla 5.6 de variaciones en las probabilidades de los

escenarios y se evalúa el comportamiento de cada uno de ellos en interacción con los demás, para así observar su tendencia, influencia, dependencia e interacción con la función objetivo.

Enumeramos los escenarios que se plantean para este modelo para su facilidad de interpretación de la siguiente manera:

1. Demanda Alta, Retorno Bajo
2. Demanda Baja, Retorno Bajo
3. Demanda Alta, Retorno Alto
4. Demanda Baja, Retorno Bajo

Se muestra un ejemplo de la tabla para la variación de las probabilidades cuando el escenario 1 tiene probabilidad 0 y los demás varían.

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
0	0	0	1
0	0	0.2	0.8
0	0	0.4	0.6
0	0	0.6	0.4
0	0	0.8	0.2
0	0	1	0
0	0.2	0	0.8
0	0.2	0.2	0.6
0	0.2	0.4	0.4
0	0.2	0.6	0.2
0	0.2	0.8	0
0	0.4	0	0.6
0	0.4	0.2	0.4
0	0.4	0.4	0.2
0	0.4	0.6	0
0	0.6	0	0.4
0	0.6	0.2	0.2
0	0.6	0.4	0
0	0.8	0	0.2
0	0.8	0.2	0
0	1	0	0

Tabla 5.6: Tabla de variación de las probabilidades para los escenarios

Con los resultados obtenidos de esta instancia se puede hacer el análisis para obtener información sobre el comportamiento tanto grupal como individual de cada escenario de variación.

Queremos entender el comportamiento individual de cada situación o escenario que pudiera presentarse, entonces se propone realizar un análisis de la varianza de estos cuatro escenarios donde nos muestre la influencia individual en la función objetivo, para lo cual se propone el uso de la siguiente fórmula.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$

Donde β_0 es el comportamiento del escenario 1, β_1 es el comportamiento del escenario 2, β_2 es el comportamiento del escenario 3 y β_3 es el comportamiento del escenario 4.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Sce1	1	11982957	11982957	3.3738	0.07196 .
Sce2	1	97070228	97070228	27.3297	3.089e-06 ***
Sce3	1	9496913	9496913	2.6738	0.10805
Residuals	52	184694506	3551817		

Signif. codes: 0 '***', 0.001 '**', 0.01 '*', 0.05 '.', 0.1 ' ' 1					

En este análisis se muestra mediante los códigos de significancia que variación de las probabilidades para el escenario 2 es sumamente influyente en el resultado final, el escenario 1 tiene influencia en una medida importante y los escenarios 3 y 4 poca influencia.

Dado el resultado debemos verificar la confiabilidad de nuestro análisis mediante una gráfica Q-Q 5.10 de los valores residuales.

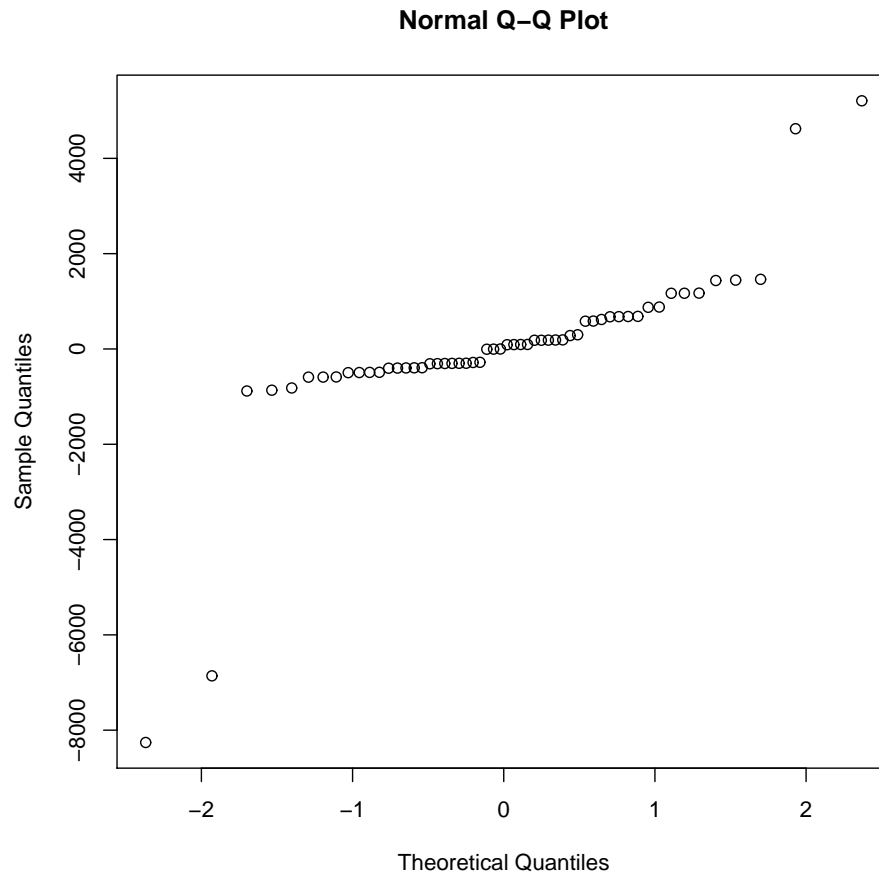


Figura 5.10: Gráfica Q-Q para la observación del comportamiento de los residuales

Se muestra que hay valores que se salen de rango lo que hace que nuestro análisis pierda confiabilidad, entonces, ¿Cómo podemos checar el comportamiento de nuestros escenarios?, se planea imprimir los puntos en una gráfica y se ajusta una línea de tendencia para observar su influencia en el valor objetivo. Se presentan las gráficas para cada escenario y su línea ajustada las series de datos.

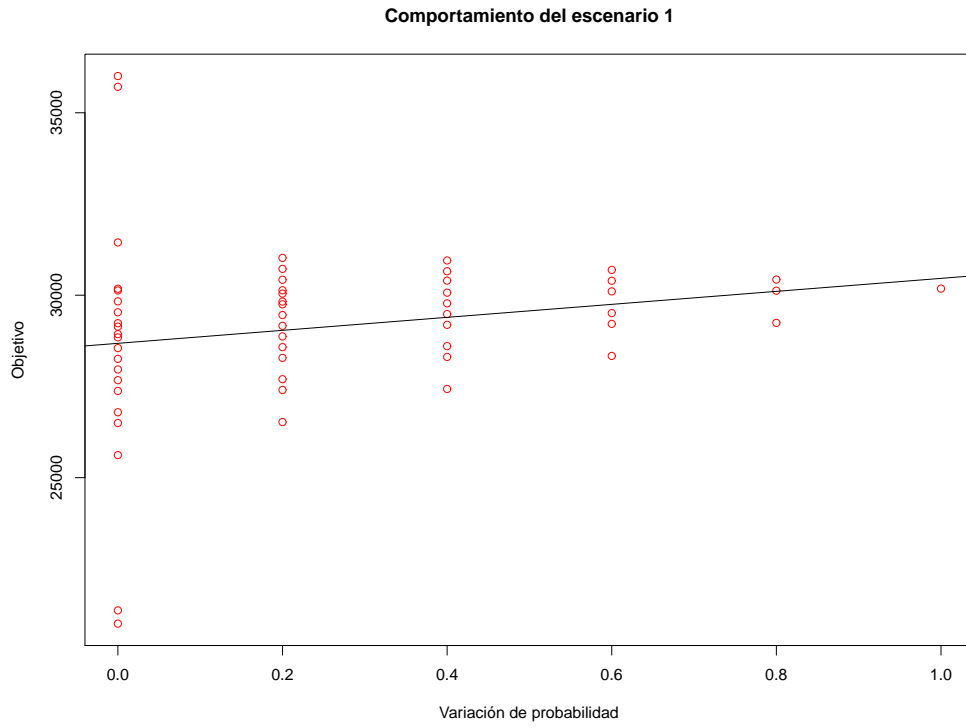


Figura 5.11: Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 1

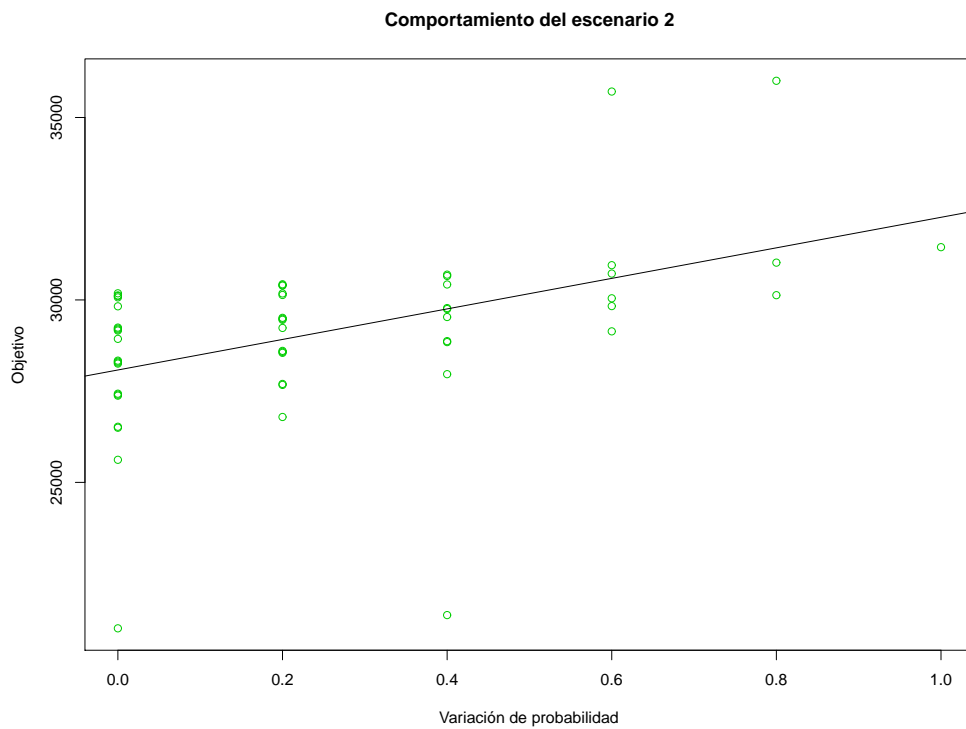


Figura 5.12: Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 2

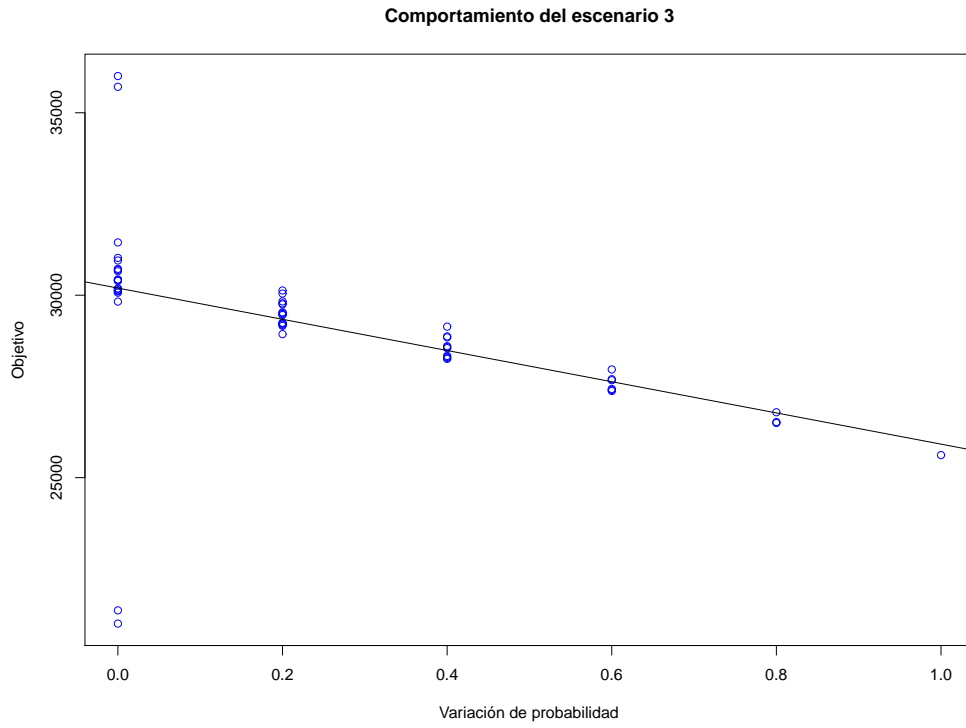


Figura 5.13: Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 3

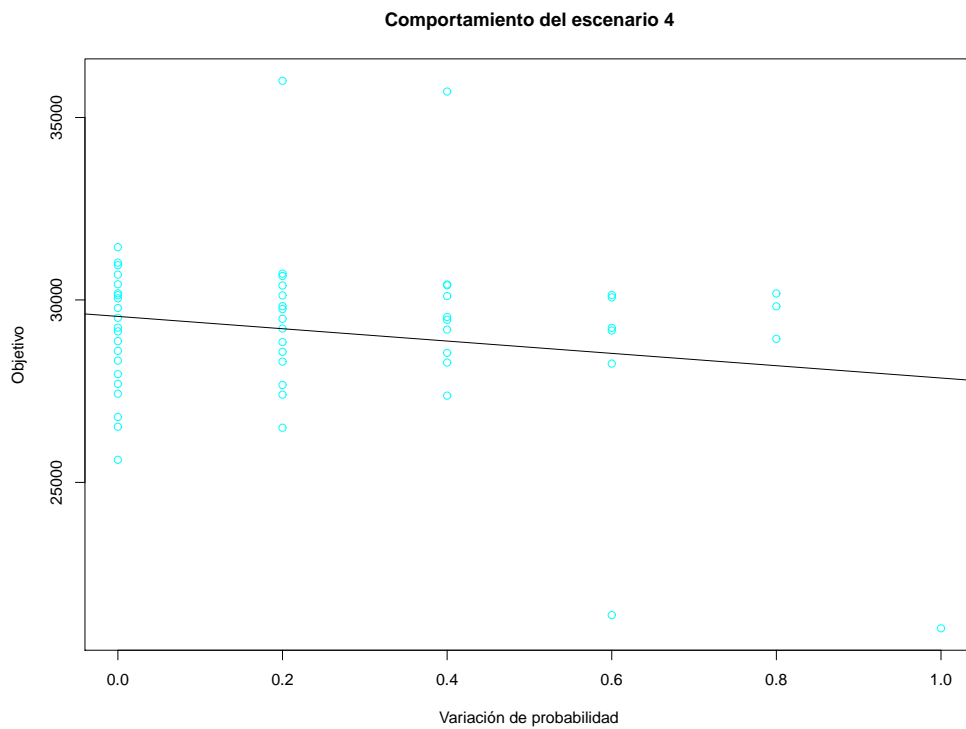


Figura 5.14: Tendencia en la variación de probabilidad del escenario 4

La inclusión de estos gráficos nos dan un panorama más claro sobre la tendencia en la variación de las probabilidades de la función objetivo, podemos observar mejor estas tendencias mediante el gráfico 5.15 de interacción de las 4 líneas ajustadas de los escenarios.

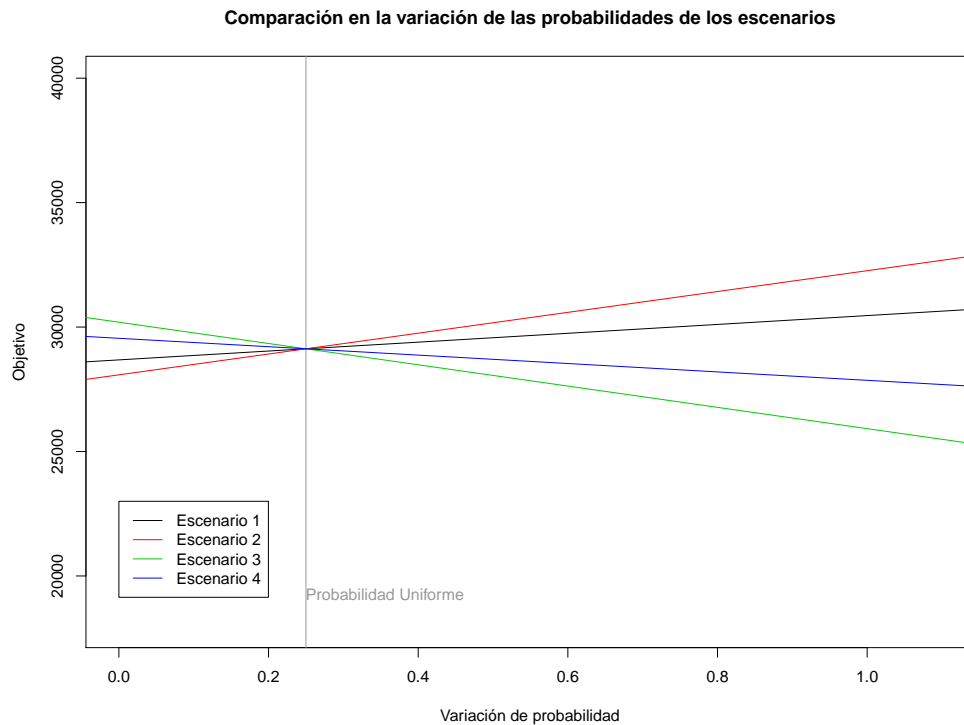


Figura 5.15: Interacción de las tendencias para la variación de las probabilidades

Podemos decir que la variación en las probabilidades tiene grandes afectaciones en el valor de la función objetivo, para el escenario 1 según el gráfico 5.11 el aumentar la probabilidad de que este suceda nos dice que los costos aumentarían conforme a la función de probabilidad, esto quiere decir que si tengo una demanda alta y un retorno demasiado bajo, mis costos aumentarían debido a que no obtenemos beneficio por reutilizar el material.

Para el escenario 2 de acuerdo a la figura 5.12, pasa algo similar que el escenario 1 pero en una escala más marcada dado que tendremos una baja demanda y un retorno bajo y en este lo que afecta a los costos de decisión son los costos fijos de

instalación ya que se tiene que construir teniendo o no demanda. Este escenario se podría decir que es el mas critico y que se debiera evitar en la aplicación.

Lo que pasa con los escenarios siguientes se contrapone a lo que hemos visto de los anteriores, en el gráfico 5.13 del escenario 3 los costos tienden a disminuir conforme aumentamos la probabilidad de que este suceda, obsérvese la disminución es muy marcada, esto se debe a que el tercer escenario comprende de una demanda alta y una tasa de retorno alta, este es el mejor escenario posible y se diferencia del beneficio que proporciona con respecto de los demás.

Para el ultimo escenario que pretende de una demanda baja y una tasa de retorno alto, podemos observar una tendencia similar al tercer escenario, sus costos disminuyen conforme aumentamos la probabilidad de que este suceda y entonces podemos concluir que el factor mas determinante en los costos es la tasa de retorno para nuestro modelo estocástico ya que presenta un dominio claro en la diferenciación de las probabilidades de los escenarios.

Finalmente como dato adicional observemos que las cuatro líneas de tendencia observada en el gráfico 5.15, cruzan en el momento que se presenta una distribución uniforme, es decir, cuando nuestros cuatro escenarios tienen la misma probabilidad de que sucedan(0.25) y de ahí se deriva su comportamiento al aumentar las probabilidades individuales. Complementamos este estudio mediante un análisis de gráficos de caja(Apéndice A)

5.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una vez examinado las capacidades computacionales del modelo nos podemos enfocar a examinar su comportamiento general con respecto a los parámetros que influyen en el diseño de la red, tales como los parámetros de precio de oferta al cliente y el costo unitario de salvamento.

Entonces se desarrolló un diseño factorial en el cual se busca conocer como los factores (precio de adquisición del competidor y costo unitario de salvamento) afectan a las variables de respuesta establecidas (costo total, precio de compra y tiempo en que resolvió la instancia).

5.6.1 FACTORES VARIABLES

Dependiendo del factor se sabrá cómo afecta a cada una de las variables de respuesta (costo total, precio de compra y tiempo en que resolvió la instancia), se observa en al tabla 5.7.

Factor	Unidades
Precio de adquisición del competidor	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30.
Costo unitario de salvamento	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100.

Tabla 5.7: Variación de parametros en el análisis

Se establecen para estos análisis el número de plantas, centros de distribución y zonas de clientes y la variación de los costos fijos en la tabla 5.8.

Número de plantas	5
Número de centros de distribución centros de inspección	10
Número de zona de clientes	30
Costo fijo de abrir un centro de distribución	5,000.00, 10,000.00
Costo fijo de abrir un centro de inspección	7,500.00, 15,000.00
Costo fijo de abrir una planta de remanufactura	10,000.00, 20,000.00
Porcentaje de producto recuperado	70.00

Tabla 5.8: Variaciones para el análisis de sensibilidad

5.6.2 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

El experimento puede aplicar un diseño factorial, dado la estructura de nuestro estudio, siendo este identificado como un ejemplo típico de ANOVA de 2 factores (Precio de adquisición del competidor y costo unitario de salvamento).

Donde el factor de precio de adquisición del competidor tiene 15 tratamientos o niveles, y el factor de costo unitario de salvamento tiene 9 niveles.

Es un experimento con factores de niveles fijos, ya que los tratamientos se escogieron y se fijaron en cada factor.

En base a los resultados obtenidos en cada experimento, se realizaron las siguientes pruebas para comprobar que los factores y sus interacciones influyen en las tres variables de respuesta (Costo total, precio de compra y tiempo en que resolvió la instancia).

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL COSTO TOTAL

Se ingresaron los resultados de las tres variables de respuesta utilizando el software estadístico R, con el fin de obtener el ANOVA de cada modelo.

COSTO TOTAL

Datos (5000, 7500, 10000)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
apcom	1	23075856	23075856	1.5797	0.2110
costosalva	1	9023728185	9023728185	617.7488	< 2.2e-16 ***
apcom:costosalva	1	1256590440	1256590440	86.0240	4.771e-16 ***
Residuals	131	1913574704	14607440		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

SIGNIFICANCIA DEL MODELO

FACTORES INDIVIDUALES: Precio de adquisición del competidor.- El precio de adquisición del competidor no es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es mayor al 5%, es decir, cada nivel del precio de adquisición del competidor tiene el mismo efecto en el costo total del modelo.

Costo unitario de salvamento.- El costo unitario de salvamento es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es menor al 5%, es decir, cada nivel del costo unitario de salvamento tiene un efecto diferente en el costo total del modelo.

FACTORES DOBLES: Precio de adquisición del competidor * Costo unitario de salvamento.- Esta interacción es significativa, ya que el valor P del análisis de varianza es menor al 5%, es decir, que las diferentes interacciones del precio de adquisición

del competidor y el costo unitario de salvamento producen un efecto diferente en el costo total del modelo.

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL PRECIO DE COMPRA

Datos (5000, 7500, 10000)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
apcom	1	1380.04	1380.04	107.424	< 2.2e-16 ***
costosalva	1	2800.60	2800.60	218.001	< 2.2e-16 ***
apcom:costosalva	1	228.64	228.64	17.798	4.554e-05 ***
Residuals	131	1682.92	12.85		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

SIGNIFICANCIA DEL MODELO

FACTORES INDIVIDUALES: Precio de adquisición del competidor.- El precio de adquisición del competidor es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es menor al 5 %, es decir, cada nivel del precio de adquisición del competidor tiene un efecto diferente en el precio de compra del producto usado. Costo unitario de salvamento.- El costo unitario de salvamento es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es menor al 5 %, es decir, cada nivel del costo unitario de salvamento tiene un efecto diferente en el precio de compra del producto usado.

FACTORES DOBLES: Precio de adquisición del competidor * Costo unitario de salvamento.- Esta interacción es significativa, ya que el valor P del análisis de varianza es menor al 5 %, es decir, que las diferentes interacciones del precio de adquisición del competidor y el costo unitario de salvamento producen un efecto diferente en el precio de compra del producto usado.

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL TIEMPO EN QUE RESOLVIÓ LA INSTANCIA

Datos (5000, 7500, 10000)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
apcom	1	17134	17134	2.2495	0.1361
costosalva	1	11	11	0.0014	0.9698
apcom:costosalva	1	766	766	0.1005	0.7517
Residuals	131	997808	7617		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

SIGNIFICANCIA DEL MODELO

FACTORES INDIVIDUALES: Precio de adquisición del competidor.- El precio de adquisición del competidor no es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es mayor al 5 %, es decir, cada nivel del precio de adquisición del competidor tiene el mismo efecto en el tiempo en que se resolvió cada instancia.

Costo unitario de salvamento.- El costo unitario de salvamento no es significativo, ya que el valor P del análisis de varianza es mayor al 5 %, es decir, cada nivel del costo unitario de salvamento tiene el mismo efecto en el tiempo en que se resolvió cada instancia.

FACTORES DOBLES: Precio de adquisición del competidor * Costo unitario de salvamento.- Esta interacción no es significativa, ya que el valor P del análisis de varianza es mayor al 5 %, es decir, que las diferentes interacciones del precio de adquisición del competidor y el costo unitario de salvamento producen el mismo efecto en el tiempo en que se resolvió cada instancia.

5.6.3 COMPROBACIÓN DE DATOS

Para determinar la confianza del resultado de los análisis aplicamos pruebas de confianza

HISTOGRAMAS

COSTO TOTAL En la gráfica 5.16 se muestra que los residuales siguen una curva normal, ya que el histograma tiene la forma de una campana, siendo similar a la curva normal, y están centrados en cero.

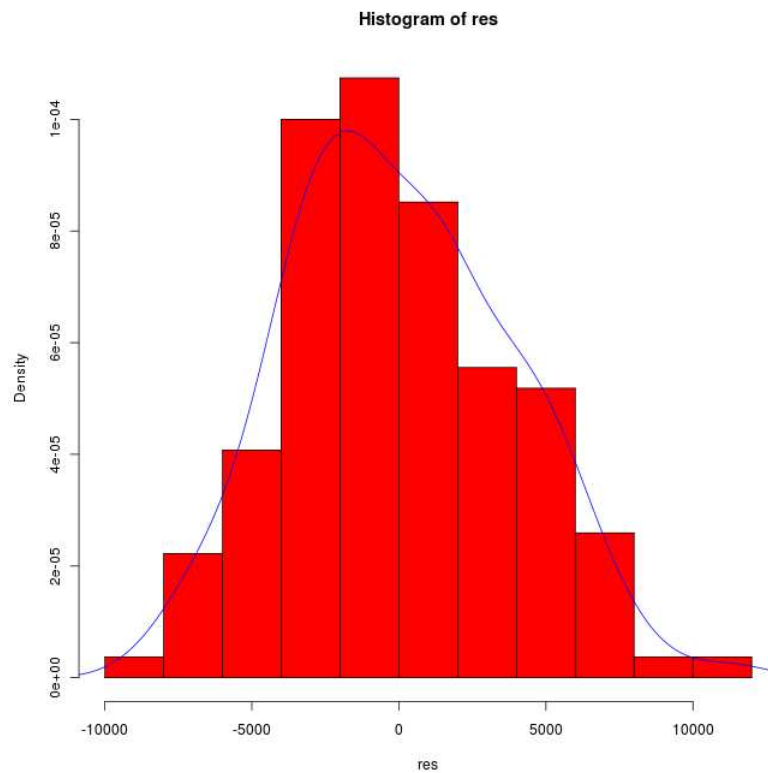


Figura 5.16: Histograma de frecuencia de los residuales para el costo total

PRECIO DE COMPRA En la gráfica se muestra que los residuales no siguen una curva normal, ya que el histograma no presenta la forma de una campana (forma de la curva normal), y no están centrados en cero.

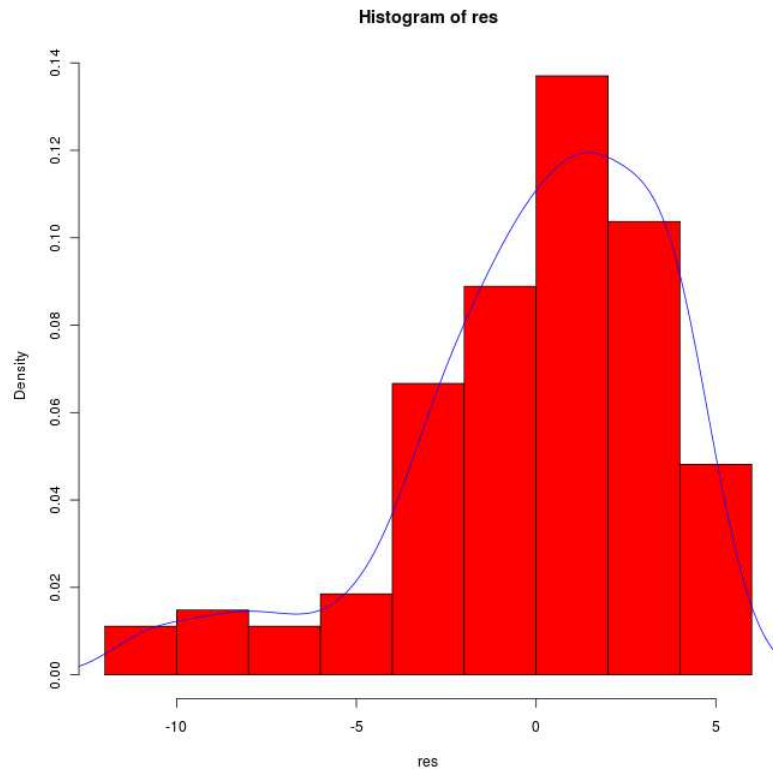


Figura 5.17: Histograma de frecuencia de los residuales para el precio de adquisición

TIEMPO EN QUE RESOLVIÓ LA INSTANCIA En la gráfica se muestra que los residuales no siguen una curva normal, ya que el histograma no presenta la forma de una campana (forma de la curva normal), y no están centrados en cero.

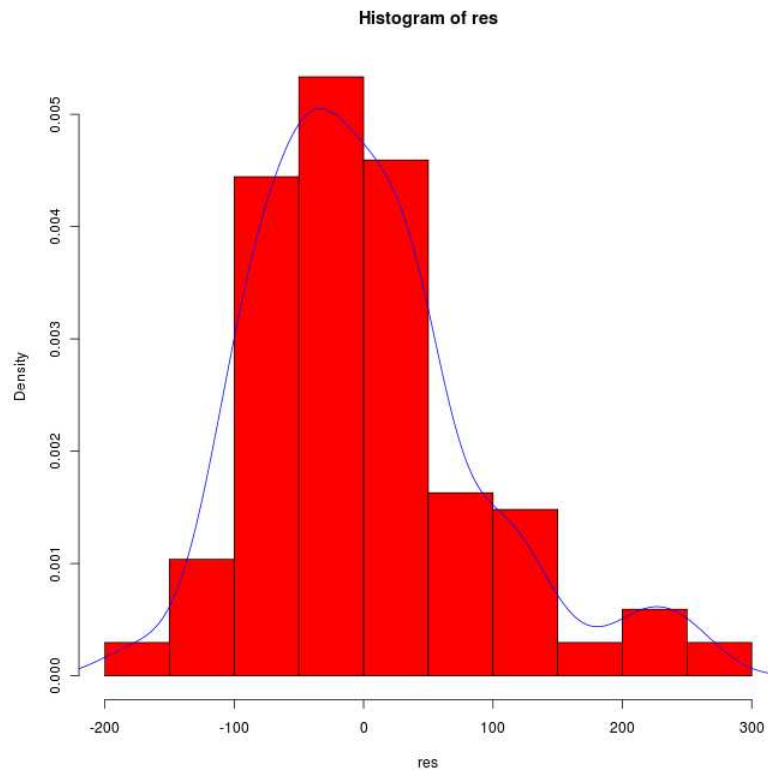


Figura 5.18: Histograma de frecuencia de los residuales para el tiempo de computo

KOLMOGOROV-SMIRNOV

La prueba de Kolmogorov-Smirnov compara la función de la distribución acumulada de los datos observados con la de una distribución normal, midiendo la máxima distancia entre ambas curvas.

Se utilizó un nivel de confianza del 95 % y nivel de significancia del 5 %, donde la hipótesis nula se rechaza cuando el nivel de significancia observado (p-value) es menor que el nivel de significancia.

Donde:

H_0 : es que el conjunto de datos siguen una distribución normal.

H_1 : es que no sigue una distribución normal.

Veamos la salida de la prueba con los datos con R.

```
One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data:  residuales
D = 0.0575,      p-value = 0.7641
alternative hypothesis: two-sided
```

En base a los resultados obtenidos, se observa que el valor P de la prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor al 5% (p-value=0.7641), comprobando que el conjunto de datos siguen una distribución normal.

```
One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data:  residuales
D = 0.0887, p-value = 0.2391
alternative hypothesis: two-sided
```

En base a los resultados obtenidos, se observa que el valor P de la prueba de Kolmogorov-Smirnov es menor al 5% (p-value=0.2391), comprobando que el conjunto de datos no siguen una distribución normal.

```
One-sample Kolmogorov-Smirnov test
```

```
data: residuales
```

```
D = 0.0915, p-value = 0.2087
```

```
alternative hypothesis: two-sided
```

En base a los resultados obtenidos, se observa que el valor P de la prueba de Kolmogorov-Smirnov es menor al 5% (p-value=0.2087), comprobando que el conjunto de datos no sigue una distribución normal.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En esta tesis se abordó un problema de cadenas de suministro de ciclo cerrado bajo incertidumbre. Se aplicó el modelado por escenarios para atacar la incertidumbre y se determinó que el diseño de configuración de red será aquella correspondiente al diseño con estructura independiente. Bajo esta estructura se determinan las decisiones de los estados, la primera se encarga de evaluar el mejor lugar para colocar instalaciones tanto para almacenes centros de inspección y plantas para remanufactura, con el objetivo de pasar a la segunda fase que es encontrar la mejor ruta para la distribución y recolección de producto en tanto a costos de transporte.

Como se había mencionado anteriormente se aplicaron las técnicas de solución mas eficientes reportadas en Tombus [2009], las cuales son el uso del método de descomposición de Benders anidado dentro del Método de la sección dorada, con el objetivo de atacar la restricción no lineal y el segundo método fue el de ramificación y acotamiento igualmente anidado dentro del método de la sección dorada. Se probaron estas metodologías y en la comparativa se observó que es mucho más eficiente el uso del método de ramificación y acotamiento en tanto a los tiempos de solución que ambos arrojaban y para ambos las soluciones eran de calidad, generalmente las mismas y el valor de las variables de respuesta también, por tal motivo nos preguntamos ¿por qué cambiaron de forma dramática estos tiempos con respecto también del modelo determinístico?. Cuando se agrega el indice de los escenarios, la estructura del modelo cambia y las restricciones difíciles son más complicadas aun

de atacar, la aplicación del método de Benders se adapta a la estructura pero las restricciones difíciles complican la primera etapa de decisión para la búsqueda.

Entonces hecha la comparativa del desempeño de estos métodos de solución se determina claramente que el uso de ramificación y acotamiento es mucho más eficiente para la obtención de solución en tanto a tiempo de cómputo.

6.1 CONCLUSIONES.

Determinado el uso de el método de ramificación y acotamiento, el análisis elaborado para el desempeño del modelo determinístico contra el modelo estocástico demostró que los tiempos de solución son muy diferentes a lo que se pensaría, esto es afectado por causa del aumento de los escenarios, el tiempo tiende a incrementarse exponencialmente para el modelado estocástico según sea el caso de los escenarios manejados. La solución en tanto al óptimo del costo total se ve afectada en un rango considerable pero aun aceptable de riesgo, mismo que para el caso estocástico la planeación para el corto plazo será mas caro, pero como se considero el factor de riesgo con los escenarios agregados en el largo plazo este reducirá y será estable.

Con respecto a la competencia del valor del precio de adquisición en cuanto mas crece la instancia el valor se vuelve mas estable y se reduce su valor. Esto es conveniente tener en cuenta dado que nos marca una tendencia clara de el valor que puede tener la recuperación de producto en la economía para proyectos grandes, así como organizaciones de gran escala que busquen la recuperación de productos a través de incentivos. Este factor no fue afectado por el modelado bajo incertidumbre ya que se observo el mismo comportamiento para el modelado determinístico y el estocástico. En hecho, si se quisiera observar el comportamiento de esta variable en una red dada, se recomendaría hacer el análisis por medio de modelación determinística.

Para fines prácticos en instancias grandes se decidió reducir la precisión de la solución observándose la robustez del modelado dada su escasa variación del costo de la red en la función objetivo, a cambio de una reducción bastante buena en el tiempo de cómputo, esto es conveniente si se quiere obtener una solución buena, más no la óptima en corto tiempo y establecer una configuración de red aceptable. También esto facilita el análisis de comportamiento si se quiere hacer de manera rápida y sencilla.

Al observar el comportamiento de la variación de la probabilidad de que suceda uno u otro, basado en la relación alto y bajo para los factores demanda y tasa de retorno, se observa claramente la influencia del factor demanda y tasa de retorno. El mejor de los casos es obtener una demanda alta y un retorno alto, esto gráficamente representa el menor costo del diseño de la red contra el caso de tener una demanda baja y un retorno alto, el cual representa el peor de los casos. De tales comportamientos se deduce que el tener una demanda o una tasa de retorno alta no es suficiente para encontrar las mejores soluciones si el factor inverso ya sea retorno o demanda es bajo según el caso. Los mejores resultados se obtienen al presentarse ambos factores altos o ambos bajos, dado que esto mantiene cierto equilibrio en los costos por el hecho de que los flujos se balancean.

Siguiendo con el análisis del modelo una vez establecido el comportamiento con respecto a los escenarios, se analizan los factores que influyen mayormente para la obtención del precio de adquisición L dado que es una variable clave en nuestro modelo. Se logra observar la influencia del costo unitario de salvamento en interacción con el precio que el competidor ofrece al cliente tiene una fuerte influencia en el diseño de nuestra red, este hecho marca una pauta en el costo total dado que primeramente influye dentro de el precio al que vamos ofrecer al cliente por el producto y por razones lógicas se proyecta este hacia el costo total en el diseño de nuestra red, es decir si obtenemos un precio de adquisición alto o bajo, la influencia radica en la

factibilidad de abrir o cerrar centros de inspección y/o centros de remanufactura.

Finalmente podemos decir que el modelo en general es más adaptable a situaciones de riesgo con respecto a la toma de decisiones, y demuestra que el tomar en cuenta las situaciones de riesgo incrementa los costos pero también podemos determinar que situaciones se nos presentaran en caso de variar los factores externos basados en el cliente, para este caso demanda, tasa de retorno y el competidor, dado que estos son factores no controlados pero que se presentan a menudo y se deben tomar las mejores decisiones.

6.2 ÁREAS DE OPORTUNIDAD

El campo de experimentación para sistemas estocásticos es muy amplio y enumerar el trabajo que puede desarrollarse como consecuencia de este modelado seria muy amplio, establecemos los puntos mas importantes que serian un reto a futuro en el desarrollo del modelo.

- Usar otras técnicas de modelado estocástico para el modelo determinístico y hacer la comparación co respecto a las soluciones presentadas en este trabajo.
- Resolver el problema original convexificándolo esperando obtener resultados de manera más rápida mediante esta técnica.
- Obtener comparaciones resolviendo para la media por el método determinístico variando la demanda y retorno para finalmente compararlo con el modelo presentado.
- Establecer un punto de intercambio para la recolección, restringiendo el hecho de para que el cliente obtenga un descuento en la compra del producto nuevo, haga la entrega del viejo, como el caso de baterías de automóviles o automóviles.

-
- Realizar un análisis de costo (L) contra el ahorro, es decir, si se utilizara el 100% de materia prima, cuanto representaría la diferencia contra remanufacturar el producto para el modelo estocástico.

APÉNDICE A

APÉNDICE A

A.1 GRÁFICOS DE CAJAS

Para complementar las conclusiones del análisis con respecto al comportamiento de los escenarios, podemos agrupar nuestros datos en el incremento de las probabilidades y verificar que nuestros resultados no siguen una distribución uniforme mediante diagramas de cajas(boxplot), que nos proporcionan una visión general de la simetría de la distribución de los datos y son útiles para ver la presencia de valores atípicos. Se desarrollo un diagrama para cada uno de los escenarios.

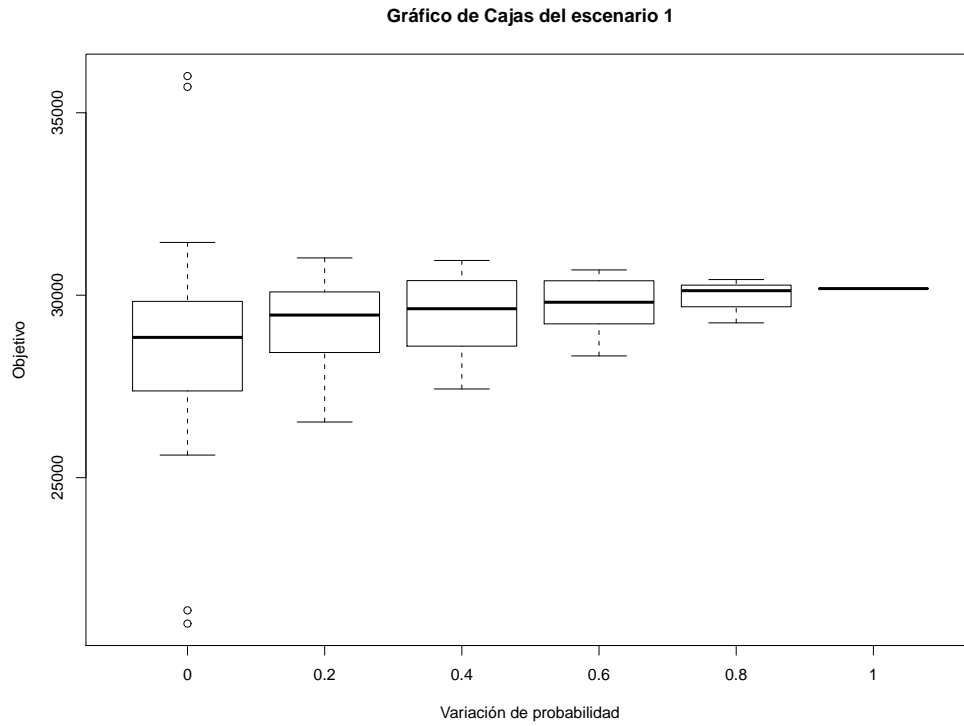


Figura A.1: Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 1

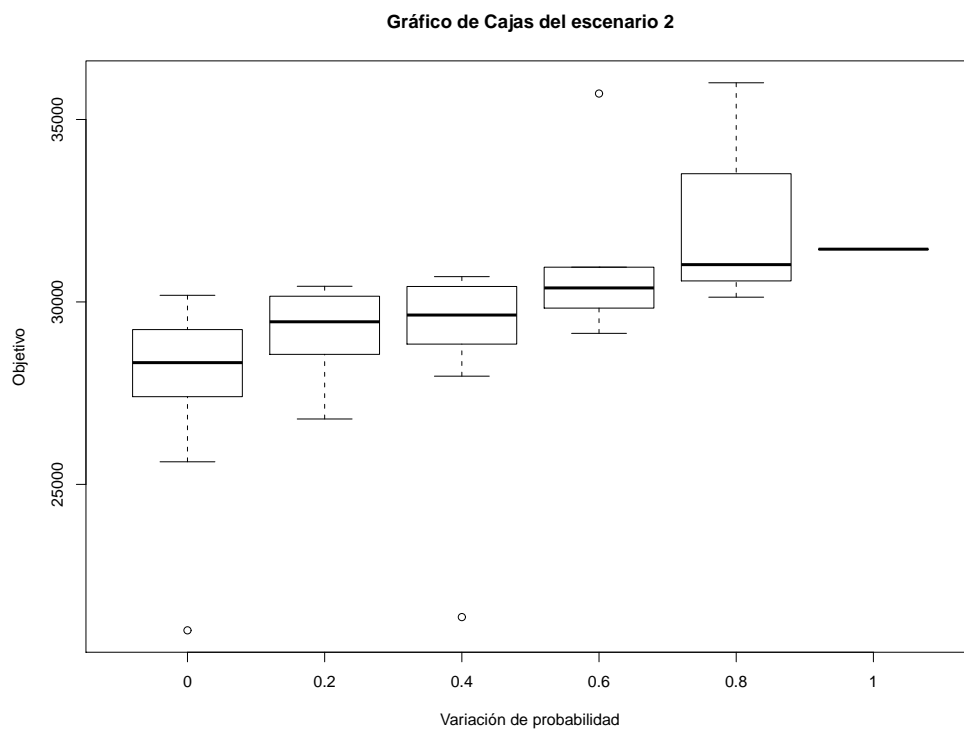


Figura A.2: Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 2

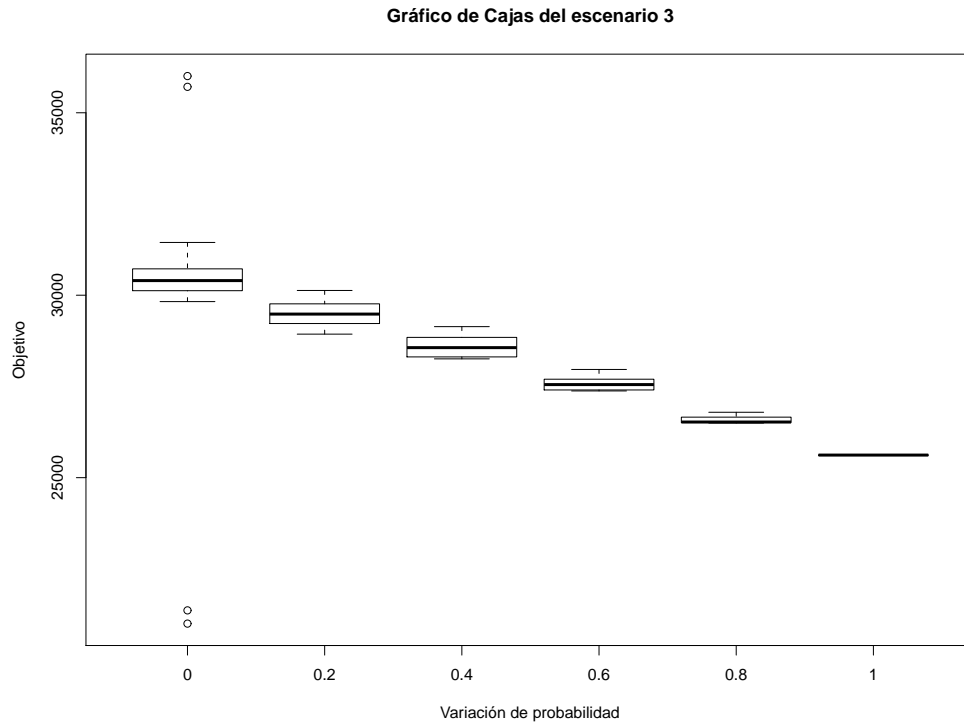


Figura A.3: Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 3

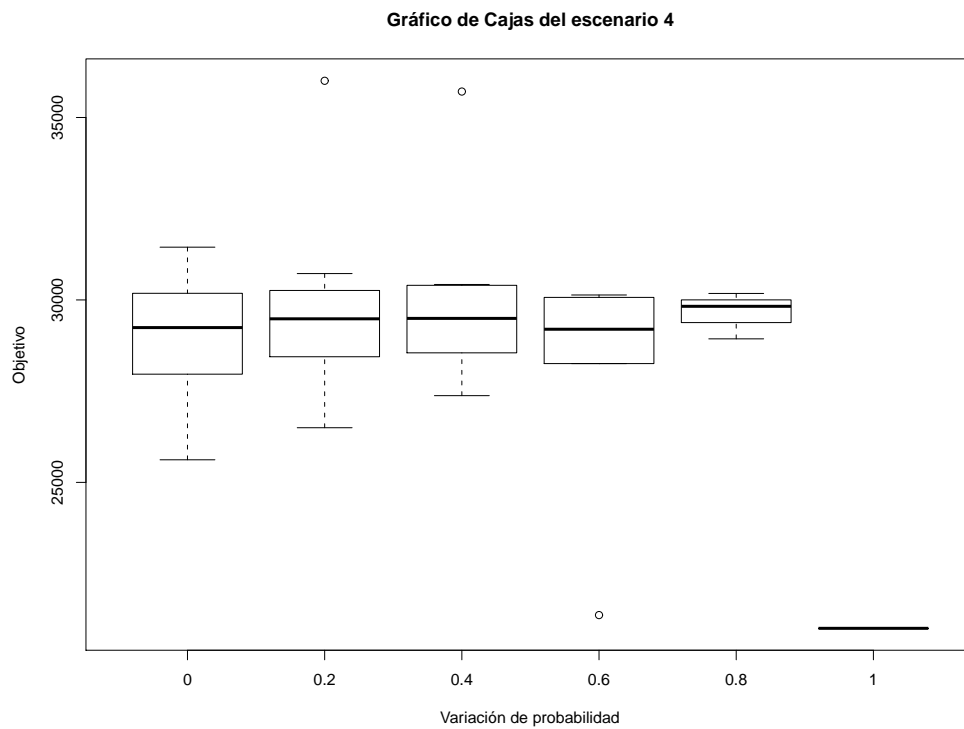


Figura A.4: Diagrama de cajas del aumento de probabilidades del escenario 4

Con estos diagramas hemos podido observar que nuestros resultados efectivamente presentan valores atípicos en los escenarios y sus distribuciones no son simétricas ya que para que este fuera así, deberían de observarse en las cajas un diseño geométrico, cosa que no ocurre en varios casos de los gráficos presentados.

BIBLIOGRAFÍA

- J.C. Ammons, M.J. Realf, and D. Newton. Infrastructure determination for electronic assembly reverse production systems. *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, International Symposium on*, page 696, 1999.
- A. I. Barros, R. Dekker, and V. Scholten. A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2):199–214, October 1998.
- T. Berger and B. Debaillie. Location of disassembly centres for re-use to extend an existing distribution network. Master’s thesis, University of Leuven, 1997.
- Marisa P. Brito and Rommert Dekker. Reverse logistics - a framework. In *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*, pages 3–27. Springer, 2002.
- Craig R Carter and Lisa M Ellram. Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics*, 1998.
- H.Congreso de la unión. Ley general del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente. *Diario oficial de la federacion*, pages 100–107, 1998.
- Harald Dyckhoff, Richard Lackes, and Joachim Reesem, editors. *Supply chain management and reverse logistics*. Springer, Berlin [u.a.], 2004.
- Mortiz Fleischmann, Hans Ronald Krikke, Rommert Dekker, and Simme Douwe P. Flapper. A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 2000.

- V. Guide, Jr. Daniel R., Gilvan C. Souza, Luk N. Van Wassenhove, and Joseph D. Blackburn. Time Value of Commercial Product Returns. *MANAGEMENT SCIENCE*, 52(8):1200–1214, 2006.
- Tim Jackson and Roland Geyer. Supply loops and their constraints: the industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review*, 2004.
- Nicholas Jacobsson. Emerging product strategies: selling services of remanufacturing products. *IIIEE*, 2000.
- V. Jayaraman. A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 1999.
- H. Krikke, J. Bloemhof-Ruwaard, and L. N. Van Wassenhove. Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International journal of production research*, 2003.
- H.R. Krikke, A. van Harten, and P.C. Schuur. Business case océ: Reverse logistic network re-design for copiers. *OR Spectrum*, 21:381–409, 1999. ISSN 0171-6468.
- Leo Kroon and Gaby Vrijens. Returnable containers: an example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 1995.
- D.W. Krumwiede and C. Sheu. A model of reverse logistics entry by third-party providers. *Omega*, 30(5):325–333, 2002.
- Baptiste Lebreton. Strategic impact of closed-loop supply chains. In *Strategic Closed-Loop Supply Chain Management*, volume 586 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pages 31–50. Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-38908-8.
- Ovidiu Listes and Rommert Dekker. A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1):268–287, 2005.

- Dirk Louwers, Bert J. Kip, Edo Peters, Frans Souren, and Simme Douwe P. Flapper. A facility location allocation model for reusing carpet materials. *Comput. Ind. Eng.*, 36(4):855–869, 1999. ISSN 0360-8352.
- Robert T. Lund. *Remanufacturing : the experience of the United States and implications for developing countries / Robert T. Lund*. World Bank, Washington, D.C., U.S.A., 1984. ISBN 0821304488.
- Shaligram Pokharel and Akshay Mutha. Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53:175–182, 2009.
- Andrés Ramos and Santiago Cerisola. Optimización estocástica. *ICAI*, 1(1):1–48, 2008.
- Matthew Realff. Robust reverse production system design for carpet recycling. *IIE Transactions*, 36, 2004.
- Matthew J. Realff, C. Ammons Jane, and David Newton. Carpet recycling: Determining the reverse production system design. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1999.
- M. Salema, A. Barbosa, and A. Novais. An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3):1063–1077, June 2007. ISSN 03772217.
- Marc Salomon, Martijn Thierry, Jo Van Nunen, and Luk Van Wassenhove. Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 1995.
- Samir K. Srivastava. Network design for reverse logistics. *Omega*, 36(1):535–548, 2006.
- Samir K. Srivastava. Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53–80, 2007.
- J.R. Stock. *Reverse logistic*. Oak Brook, 1992.

Ayşe Cilaci Tombus. *Quantitative model for decision making in reverse logistics network design*. PhD thesis, Bogazici University, Turkey, February 2009.

Rico Wojanowski, Vedat Verter, and Tamer Boyaci. Incentive based collection strategies for product recovery, 2003.

Rico Wojanowski, Vedat Verter, and Tamer Boyaci. Retail-collection network design under deposit-refund, 2007.

Guang-Fen Yang and Zhi-Ping Wang. The optimization of the closed-loop supply chain network. *Transportation Research*, (45):16–28, 2009.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Leonardo Gabriel Hernández Landa

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELO ESTOCÁSTICO POR ESCENARIOS PARA
UNA RED DE LOGÍSTICA INVERSA

Nací en la ciudad de Perote, Veracruz el día 14 de Octubre de 1983. Me he graduado de Ingeniero Industrial en el Instituto Tecnológico Superior de Perote en el Año de 2008 e ingresé en 2009 al Posgrado en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Autónoma de Nuevo León, como estudiante de Maestría y en la cual he desarrollado esta tesis para obtener el grado académico correspondiente.