

**DISEÑO DE CADENAS DE ABASTECIMIENTO NO
JERÁRQUICAS CON MÉTODOS DE SOLUCIÓN
MULTIOBJETIVO BAJO PRINCIPIOS DE
SOSTENIBILIDAD Y RIESGO**

Laura Andrea Sotelo Cortés

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2017**

DISEÑO DE CADENAS DE ABASTECIMIENTO NO JERÁRQUICAS CON MÉTODOS DE SOLUCIÓN MULTIOBJETIVO BAJO PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD Y RIESGO

Laura Andrea Sotelo Cortés

Trabajo de investigación para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director
Ing. Enrique Romero Mota (M.Sc.)

Codirector
Ing. William Guerrero (Ph.D.)

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2017**

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela, se debe incluir la siguiente nota: "Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería" en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2017 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá.
Colombia
TEL: +57 – 1 668 36 00

Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias a la valiosa ayuda de varias personas. En primer lugar, quiero mostrar mi gratitud hacia mis dos directores de tesis, William y Enrique, por todo el esfuerzo y dedicación que han tenido hacia mí. Su buena intuición, experiencia y sus ideas han contribuido en gran medida al desarrollo de esta tesis.

El mayor agradecimiento lo dirijo a mi familia: su amor, sus sabios consejos y su apoyo incondicional fueron fuente de inspiración para llevar acabo no solo este trabajo sino todo el desarrollo de la maestría.

Finalmente, quiero dar las gracias a mis amigos de la maestría, Sebastián y Ricardo, por su gran ayuda y apoyo en momentos de estudio a lo largo de todo este proceso.

¡A todos ellos, mi más sincero agradecimiento!

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar el diseño óptimo para una cadena de suministro de tres eslabones de acuerdo a consideraciones económicas, ambientales y de riesgo. Se plantea un modelo de programación entera mixta que busca simultáneamente: 1. Minimizar el costo total del transporte y uso de los nodos intermedios. 2. Minimizar las pérdidas de producto en el transporte como factor de riesgo. 3. Minimizar el impacto ambiental por emisiones de CO₂ en cada una de las conexiones y nodos. El modelo contempla decisiones de transporte entre los eslabones de la cadena, de forma que se satisface la demanda y se decide la cantidad que debe ser recuperada para ser reinyectada en el proceso de producción. El modelo se resuelve utilizando un método exacto y varios métodos de optimización vía simulación que permiten obtener distintas soluciones, de tal manera que el usuario podrá escogerlas de acuerdo a sus prioridades. Los experimentos en instancias aleatorias demuestran que los objetivos estudiados se oponen y que el problema es de interés para la industria y la academia.

Abstract

The objective of this document is to determine the optimum design for a supply chain of three links according to economic, environmental and risk considerations. A model of mixed whole programming is proposed; the model simultaneously seeks: 1. To minimize the total cost of transportation and use of intermediate nodes. 2. To minimize the risk of product losses in transport. 3. To minimize the environmental impact of CO₂ emissions on each of the connections and nodes. The model considers transport decisions between the links of the supply chain, in order that the demand is satisfied and the quantity, which must be recovered and re-injected in the production process, is decided. The model is solved using an exact method and simulation-based optimization methods that allow obtaining different solutions in such a way that the user will be able to choose according to his priorities. Experiments in random instances demonstrate that the objectives studied are opposed and that the problem is of interest to industry and academia.

Contenido

LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
2.1 OBJETIVOS.....	10
2.1.1 <i>Objetivo general</i>	10
2.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	10
2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	10
3 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RED DE ABASTECIMIENTO ESTUDIADA.....	18
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	19
4.2 MODELO MATEMÁTICO	20
4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ECUACIONES	22
5 MÉTODOS DE SOLUCIÓN.....	26
5.1 MÉTODOS BASADOS EN PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA.....	26
5.2 MÉTODOS BASADOS EN OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN.....	29
5.2.1 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación	29
5.2.2 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación, 3.º fase: Optimización	31
6 RESULTADOS OBTENIDOS.....	33
6.1 MÉTODOS BASADOS EN PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA.....	33
6.2 MÉTODOS BASADOS EN OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN.....	42
6.2.1 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación	43
6.2.2 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización	51
6.2.3 Comparación métodos basados en optimización vía simulación	56
7 CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.....	59
7.1 Conclusiones	59
7.2 Futuras investigaciones	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS.....	65
1. Parametrización de las simulaciones	65
2. Detalle de soluciones por instancia	67

Lista de Tablas

Tabla 1: <i>Resumen de la literatura</i>	17
Tabla 2: <i>Instancias método de programación lineal</i>	34
Tabla 3: <i>Optimización individual de las funciones objetivo</i>	34
Tabla 5: <i>Solución frontera de Pareto</i>	35
Tabla 6: <i>Tabla experimental e indicadores</i>	39
Tabla 7: <i>Resumen indicadores resultantes de las corridas</i>	40
Tabla 8: <i>Variación indicadores</i>	41
Tabla 9: <i>Instancias métodos de optimización-simulación</i>	43
Tabla 10: <i>Frontera de Pareto</i>	43
Tabla 11: <i>Medidas estadísticas</i>	44
Tabla 12: <i>Intervalos de confianza del 95 %</i>	44
Tabla 13: <i>Comparación función Costo</i>	45
Tabla 14: <i>Comparación función Emisiones</i>	45
Tabla 15: <i>Comparación función Productos perdidos</i>	46
Tabla 16: <i>ANOVA Costo (UM)</i>	46
Tabla 17: <i>ANOVA Emisiones CO2</i>	46
Tabla 18: <i>ANOVA Cantidad de productos perdidos</i>	46
Tabla 19: <i>Soluciones finales - Método 2.1</i>	48
Tabla 20: <i>Resumen soluciones no dominadas</i>	50
Tabla 21: <i>Espaciamiento e hipervolumen del método 2.1</i>	51
Tabla 22: <i>Valores de las funciones objetivo</i>	52
Tabla 23: <i>Intervalos de confianza de las funciones objetivo</i>	52
Tabla 24: <i>Medias, intervalos de confianza y valores de las restricciones</i>	52
Tabla 25: <i>Valores funciones objetivo resultado de las simulaciones - Método 2.2</i>	53
Tabla 26: <i>Comparación indicadores métodos optimización vía simulación</i>	56

Lista de Figuras

<i>Figura 1:</i> Aspectos de la sostenibilidad	13
<i>Figura 2.</i> Conceptos de gestión de riesgo (THE INSTITUTE OF INTERNAL AUDITORS, 2013)	14
<i>Figura 3:</i> grafo de la red de abastecimiento.....	19
<i>Figura 4:</i> Métodos de Solución.....	26
<i>Figura 5:</i> Ejemplos del hipervolumen dominado en dos y tres dimensiones	28
<i>Figura 6:</i> Ilustración del nivel de significancia.....	30
<i>Figura 7:</i> Frontera de Pareto para un problema de minimización (LÓPEZ, 2013)	30
<i>Figura 8:</i> Red de abastecimiento (ej. 1).....	34
<i>Figura 9:</i> Frontera de Pareto - Método 1	36
<i>Figura 10:</i> Diseño de cadena de abastecimiento de mínimo costo - Método 1	36
<i>Figura 11:</i> Diseño de cadena de abastecimiento de mínimas emisiones de CO ₂ - Método 1	37
<i>Figura 12:</i> Diseño de cadena de abastecimiento de mínima cantidad de productos perdidos - Método 1 ..	37
<i>Figura 13:</i> Promedio de hipervolumen (método de programación lineal)	40
<i>Figura 14:</i> Promedio de espaciamento (método de programación lineal)	40
<i>Figura 15:</i> Promedio cantidad de soluciones (Método de programación Lineal)	41
<i>Figura 16:</i> Promedio de tiempo (Método de programación Lineal)	41
<i>Figura 17:</i> Red de abastecimiento.....	43
<i>Figura 18:</i> Gráfica de caja de la función Costo.....	47
<i>Figura 19:</i> Gráfica de caja de la función Emisiones CO ₂	47
<i>Figura 20:</i> Gráfica de caja de la función Productos perdidos	47
<i>Figura 21:</i> Frontera de Pareto - Método 2.1.....	49
<i>Figura 22:</i> Diseño de la cadena de abastecimiento (Solución 8) - Método 2.1	50
<i>Figura 23:</i> Red de abastecimiento.....	51
<i>Figura 24:</i> Soluciones resultantes con la metodología 3.....	54
<i>Figura 25:</i> Solución 4 - Metodología 2.2.....	54
<i>Figura 26:</i> Solución 6 - Metodología 2.2.....	55
<i>Figura 27:</i> Promedio de hipervolumen (método de optimización y simulación)	57
<i>Figura 28:</i> Promedio de espaciamento (método de optimización y simulación).....	58
<i>Figura 29:</i> Promedio de tiempo (Método de optimización y simulación)	58

1. Introducción

Se considera que una industria es exitosa cuando logra posicionar su marca por encima de su competencia con un alto valor de ventas y de utilidades. Para lograr lo anterior, es clave una gestión eficaz y eficiente de la cadena de abastecimiento que permita administrar estratégicamente recursos para así cumplir niveles de servicio extraordinarios y márgenes altamente atractivos que, sin duda hoy en día, con la aceleración económica y mayor exigencia de los consumidores, resulta ser una ventaja diferenciadora.

La cadena de abastecimiento contempla la administración de redes de proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas que están conectados por flujos de transporte e información (Sahin & Robinson, 2002). Considerando la importancia de las decisiones que implica esta gestión, es fundamental el diseño óptimo de su estructura de modo que impacte directamente sobre la satisfacción de mercados, que son cada vez más dinámicos y exigentes. Dentro del diseño de la cadena, se contemplan decisiones de localización, de cantidad de fabricantes, de proveedores y de medidas de capacidad en cada uno de los niveles (Chopra & Meindl, 2004). La base de estas decisiones está ligada generalmente a la minimización de costos, objetivo que está directamente relacionado con la búsqueda de un mayor margen de ganancia. Asimismo, se resalta que los cambios y requerimientos no sólo conllevan a que el costo sea el único objetivo decisión, sino que a este se la han sumado también aspectos ambientales, de riesgo, entre otros.

Por lo anterior y resaltando las oportunidades de contribución que representa el contexto descrito, este trabajo busca desarrollar dos nuevas metodologías de diseño de la cadena de abastecimiento de acuerdo a consideraciones económicas, ambientales y de riesgo. Consideraciones económicas, dado que son un factor clave para lograr mayor eficiencia financiera. Consideraciones ambientales, puesto que actualmente son de los aspectos que más inquietan a las industrias y constituyen un reto en su participación. Por último, consideraciones de riesgo, debido a que las condiciones de operación perfectas son poco probables de mantener y/o alcanzar.

Teniendo en cuenta el escenario planteado, para lograr los objetivos se construye un modelo base con los elementos descritos. A partir de este, se emplean herramientas de optimización y simulación que contribuyan a buscar soluciones flexibles y aplicables a estructuras de abastecimiento de múltiples niveles. Se destaca el uso de la simulación como un método de amplio potencial en este tipo de problema, ya que a través de su modelación permite obtener distintos resultados y desarrollar un mayor análisis de sistemas complejos.

2. Objetivos y preguntas de investigación

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo y tres métodos de solución para el problema de diseño de la cadena de abastecimiento NO jerárquica, de ciclo cerrado (closed-loop supply chain design) con múltiples objetivos y distintos modos de transporte

2.1.2 Objetivos específicos

1. Formular el modelo matemático que representa la problemática descrita.
2. Proponer dos métodos de solución que permitan resolver el modelo planteado (Programación entera mixta y optimización vía simulación).
3. Evaluar y comparar la competitividad los dos métodos de solución propuestos usando optimización vía simulación en un conjunto clave de instancias generadas aleatoriamente.

2.2 Pregunta de investigación

¿Cómo se soluciona un problema de diseño de la cadena de abastecimiento NO jerárquica, de ciclo cerrado (closed-loop supply chain design) con múltiples objetivos y distintos modos de transporte?

3 Revisión de la literatura

La cadena de abastecimiento se refiere a todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes y servicios desde las materia prima hasta el consumo final (Ballou, 2004). La gestión de la cadena de suministro se puede clasificar en dos grandes categorías: configuración y coordinación. Por un lado la configuración se relaciona el diseño de alto nivel y la infraestructura básica de la cadena de suministro. Por el otro lado, la coordinación se relaciona con las decisiones tácticas y operativas (Xiaoyuan Lu & Swaminathan, 2015). Este trabajo está enfocado en la categoría de configuración, la cual integra elementos de gestión de riesgo y de sostenibilidad. Por este motivo, la revisión de la literatura se presenta alrededor de estos conceptos y de su relación.

Generalidades de diseño de cadenas de abastecimiento

El diseño de la cadena de abastecimiento es un tema de estudio relevante debido a fenómenos como la globalización. Las compañías se esfuerzan cada vez más por integrar los diferentes niveles de la cadena, con el fin de lograr un mayor rendimiento y cumplimiento de su misión por medio de estrategias de subcontratación, externalización, entre otras. Comúnmente, en la mayoría de trabajos se destacan las siguientes variables de decisión: ubicación de instalaciones, cantidades de producción y de envío y selección de proveedores. Asimismo, existen otros trabajos que integran variables como son los niveles de inventario, los modos de transporte, la capacidad de expansión, de transbordos, de desplazamiento, entre otros (Guerrero, Prodhon, Velasco, & Amaya, 2013). En cuanto a los objetivos a optimizar, en la literatura se encuentra que los más utilizados se relacionan con la maximización de utilidades o la minimización de costos. También se encuentran otros trabajos menos frecuentes, tales como maximizar la media y minimizar la varianza del beneficio después de los impuestos; reducir al mínimo la producción, los tiempos de parada y los costos de inicio del valor de flexibilidad con los tipos de cambio de incertidumbre; maximizar la ganancia en las operaciones y minimizar costos de producción y compras, entre otros (Meixell & Gargeya, 2005). Cabe resaltar que también existen modelos que son multiobjetivos, los cuales responden a las diferentes necesidades de las compañías (Meixell & Gargeya, 2005). En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de trabajos realizados que usan sus características principales.

Los modelos para el diseño de la cadena se han clasificado en las siguientes categorías: los modelos determinísticos, en los que se conocen y especifican los parámetros de información; los modelos estocásticos, los que muestran cuando los parámetros son aleatorios y suponen que siguen una distribución de probabilidad particular; los modelos económicos y de simulación (Beamon, 1998). Se ha trabajado sobre estas cuatro categorías a lo largo del tiempo en diversos modelos, entre los cuales se encuentra el modelo de cadena de suministro global (GSCM, por sus siglas en inglés), el que determina múltiples productos, instalaciones, etapas, períodos de tiempo y los modos de transporte (Arntzen, Brown, Harrison, & Trafton, 1995); los modelos deterministas, para optimizar la cadena y luego, con la técnica de simulación, para analizar el modo de optimización, los cuales se utilizarán en diferentes escenarios como la instalación, la descentralización y la cadena de suministro global (Tzafestas & Kapsiotis, 1994), entre otras variantes de las diferentes categorías.

Diseño de cadenas de suministro multiobjetivo

Los problemas de optimización multiobjetivo, a diferencia de los de optimización de un solo objetivo, presentan dos o más funciones objetivo, compuestos por un conjunto de funciones objetivo k , un conjunto de restricciones m y un conjunto de variables n (Marler & Arora, 2004). Mientras que en los problemas de optimización de un solo objetivo se enfocan en hallar un vector de decisión n -dimensional que optimiza una función. En la optimización multiobjetivo se busca determinar un vector que optimice una función vectorial, donde sus elementos representen las distintas funciones objetivo (Vargas & Montoya, 2008).

Concretamente, en cuanto al diseño de redes de abastecimiento que involucran más de un objetivo a contemplar, existe una amplia variedad de trabajos que incluyen objetivos de distintas naturaleza como lo es la minimización de costos de transporte sobre la base de criterios neutrales al riesgo (Yang, Liu, & Yang, 2015), el rendimiento económico y medioambiental según principios de evaluación del ciclo de vida (ACV) (Ruiz-Femenia, Guillén-Gosálbez, Jiménez, & Caballero, 2013), la minimización del costo total diario y los impactos ambientales al aplicar a una cadena de suministro de hidrógeno (Almaraz, Azzaro-Pantel, Montastruc, Pibouleau, & Baez Senties, 2012), el análisis de decisión de la red de suministro integrando costos, servicio al cliente y volumen de las entregas (Sabri & Beamon, 2000).

Varios autores han logrado modelos complejos que permiten encontrar soluciones a problemas con múltiples objetivos. A continuación, se presentan los puntos más destacados dadas las consideraciones de riesgo y sostenibilidad siendo estas involucradas en este trabajo y además menos comunes en la literatura:

Sostenibilidad:

Se define como sostenibilidad el “Desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. La sostenibilidad involucra tres ámbitos: el económico, el social y el medioambiental”, (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987). Considerar estos tres aspectos es un gran reto para las compañías, puesto que su gestión se encuentra tradicionalmente ligada a la vista económica. De todas maneras, tanto el factor social como el ambiental han ganado una mayor importancia en los últimos años, lo que les ha generado ventajas por su inclusión. Estas ventajas son las siguientes:

- Reducción de costos
- Estimulación de competitividad e innovación
- Apoyos financieros
- Mejora de imagen corporativa y fortalecimiento de marca, (El Economista, 2014)

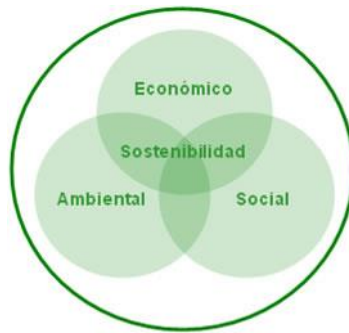


Figura 1: Aspectos de la sostenibilidad

Para este trabajo, el enfoque a considerar es el medio ambiente. En los siguientes párrafos, se muestran los principales hallazgos de la literatura aplicados al diseño de la cadena de abastecimiento.

En cuanto al diseño de la red de abastecimiento apoyada en los diferentes modelos, el tema ambiental no ha sido siempre integrado a los mismos o no se evalúa de forma explícita. No obstante, según una revisión realizada por (Eskandarpour, Dejax, Miemczyk, & Péton, 2015), se encuentran algunos modelos para la resolución de estos problemas de diseño, cuyo análisis abarcó 87 publicaciones, que incluyen una medida del medio ambiente o impacto social, ya sea en la función objetivo o en las restricciones del modelo. Se resalta también en este artículo que, en materia de sostenibilidad integrado al diseño de cadena, aproximadamente el 90 % de los trabajos se han publicado a partir del año 2008.

En este campo, las decisiones relacionadas con el diseño de la cadena se pueden referir a instalaciones, medios de transporte, procesos de diseño de productos, opciones tecnológicas, entre otras (Eskandarpour, Dejax, Miemczyk, & Péton, 2015). Dicha dimensión ha sido tratada por medio de modelos: *Life Cycle Assessment (ACV)*, *reasoning maps*, *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Analytic Network Process (ANP)*, *Data Envelopment Analysis (DEA)*, *equilibrium models*, simulación, entre otros, donde se mide especialmente con indicadores de emisiones de carbono, de desperdicios, de consumo energético y material reciclado (Brandenburg, Govindan, Sarkis, & Seuring, 2014). Autores como (Quariguasi Frota Neto, Bloemhof-Ruwaard, van Nunen, & van Heck, 2006) muestran las ventajas de resolver problemas usando programación multiobjetivo.

Por otra parte, enfocándose en las cadenas de suministro de ciclo cerrado, la literatura relacionada con el tema muestra que su progresiva atención se centra en la conciencia pública y la legislación de los gobiernos (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015). Cabe señalar también que las diversas publicaciones envuelven el concepto de logística inversa sabiendo que este hace parte del ciclo cerrado. La cadena de suministro de ciclo cerrado ha sido definida por (Guide & Van Wassenhove, 2009) como la que se encarga del diseño, el control y la operación de un sistema para maximizar la creación de valor sobre el ciclo de vida de un producto, mediante su aprovechamiento a través del tiempo. Algunos trabajos encontrados en la revisión de la literatura sobre el tema se caracterizan por contener diferentes enfoques y diversas variables a tener en cuenta, tales como el precio, que afecta la demanda y por lo tanto los flujos (Rezapour, Farahani, Fahimnia, Govindan, & Mansouri, 2015), las puntuaciones de los proveedores (Amin & Zhang, 2012), las extensiones a más de un producto (Easwaran & Üster, 2010) e incluso a más de un periodo (Kannan, Sasikumar, & Devika, 2012), los modelos jerárquicos que tiene en cuenta impactos ambientales y sociales (Metta & Badurdeen, 2011) y las diversas combinaciones de los anteriores agregando variables como el tiempo (Ramezani, Karimi, Hejazi, & Kimiagari, 2014).

Riesgo:

Se define como un evento inesperado con amenaza de daño, lesión, responsabilidad, pérdida o cualquier otra ocurrencia que es causada por impactos externos o internos, y que puede ser tratado a través de acciones preventivas y reactivas (BD, 2017). Para las compañías, el riesgo es un aspecto de alta importancia, puesto que su gestión es una clave de éxito como factor inherente a la creación de valor. Existen varias estrategias para gestionarlo de acuerdo a su apetito y a su tolerancia al riesgo. El apetito de riesgo se describe como la cantidad de exposición a impactos desfavorables de alto impacto que una empresa está dispuesta a aceptar para alcanzar sus objetivos. La tolerancia se refiere a la desviación respecto a este nivel. En cuanto a la capacidad de riesgo, este se define como el nivel máximo de riesgo que una organización puede soportar (The Institute of Internal Auditors, 2013). La siguiente ilustración muestra las dimensiones de cada uno de estos conceptos:

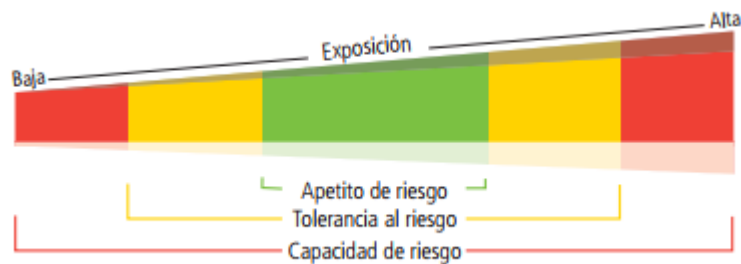


Figura 2. Conceptos de gestión de riesgo (THE INSTITUTE OF INTERNAL AUDITORS, 2013)

En la literatura se encuentra también el estudio de diseño de la cadena bajo medidas de robustez, que es la capacidad de una cadena de suministro para funcionar en una variedad de escenarios futuros (Dong, 2006) y de resistencia. Esta tiene como objetivo mitigar los riesgos operativos y las perturbaciones que amenacen el funcionamiento de la cadena de abastecimiento (Gong, Mitchell, Krishnamurthy, & Wallace, 2014) a partir de las interrupciones como fuente de ineficiencia, que se relaciona de manera directa con los riesgos. Algunos autores (Craighead, Blackhurst, Rungtusanatham, & Handfield, 2007) señalan aspectos como la severidad de las perturbaciones, la cual está directamente relacionada con la densidad, la complejidad y los nodos de la criticidad de las cadenas de suministro.

Se han formulado diversos trabajos sobre modelos de diseño de abastecimiento que permiten tener en cuenta algunos riesgos. Dichos modelos son: programación estocástica multiobjetivo para el diseño de la cadena de suministro teniendo en cuenta el riesgo financiero (Azaron, Brown, Tarim, & Modarres, 2008); un modelo estocástico del problema de la red de la cadena de suministro global de múltiples etapas con riesgos de la oferta, la demanda, el intercambio y la interrupción (Goh, Lim, & Meng, 2007); un diseño de la red de la cadena de suministro de bajo riesgo e incertidumbre orientado a una batería de plomo y ácido de circuito cerrado (Subulan, Baykasoğlu, Özsoydan, Taşan, & Selim, 2014); un modelo conceptual para la gestión de riesgos de la red de la cadena de suministro (Trkman & McCormack, 2009) y el uso de redes de Petri para modelar y analizar una red de cadena de suministro sujeta a diversos riesgos (Tuncel & Alpan, 2010).

Con respecto a los métodos de solución propuestos en la literatura, de acuerdo a (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015), estos problemas se han tratado de resolver con los métodos analíticos o exactos basados en programación matemática que usan solucionadores de optimización comerciales. Para problemas estocásticos, existen métodos como el Promedio de Aproximación (AEA). Si se trata de

problemas de gran tamaño, se requieren métodos heurísticos y algoritmos metaheurísticos. Asimismo, la simulación se considera como una técnica poderosa a tener en cuenta si se presentan incertidumbres (Oberkamp, DeLand, Rutherford, Diegert, & Alvin, 2002) (Robinson, 2014).

De acuerdo a la revisión realizada, en la literatura se evidencia que han sido varios los autores que han trabajado temas de diseño de cadena, de riesgos y de sostenibilidad. En común, se encuentra que dentro de los modelos realizados se involucra la incertidumbre como una consideración de error. No obstante, no es común encontrar en la literatura desarrollos asociados que se involucren de manera explícita e integral.

Método de solución: optimización y simulación

En cuanto a los métodos de solución, como se especificó en los objetivos planteados para este trabajo, se basan en metodologías que combinan la simulación con la optimización. A continuación, se explica brevemente de qué se trata cada uno de estos conceptos.

Respecto a la optimización de un proceso o sistema, este consiste en la selección de un mejor elemento (teniendo en cuenta uno o varios criterios) de algún conjunto de alternativas (Mathematical Programming Glossary, 2017). Específicamente, un problema de optimización consiste en maximizar o minimizar una función seleccionando sistemáticamente los valores de entrada desde dentro de un conjunto permitido y calculando el valor de la función disponibles (Cambridge University, 2011).

Además, la simulación es el proceso de crear una representación para configurar aspectos del mundo real. Los modelos de simulación contribuyen a la exploración del comportamiento de sistemas en determinadas situaciones, y de esta manera realizar cambios y analizar alternativas en un entorno bajo incertidumbre y/o riesgos. Dada esta característica de la simulación, su aplicación ha sido bastante amplia en campos como el de la salud, la manufactura, los aeropuertos, las cadenas de abastecimiento, la milicia, la minería de datos, los puertos y el lean six sigma, entre otros (Simio, 2017).

Asimismo, en relación al diseño de cadenas de abastecimiento, la simulación resulta ser una herramienta que permite evaluar varios escenarios de la cadena, con el fin de generar alternativas para mejorarla en diferentes industrias. Por ejemplo, en un trabajo realizado en la industria automotriz de Portugal, se consideraron las siguientes medidas de desempeño: relación, tiempo de entrega y costo total (Carle, Martel, & Zufferey, 2012). En las diferentes investigaciones, también se encuentran nuevas herramientas de medición para manejar el riesgo de un futuro incierto como lo es la "*Supply Chain Resilience Assessment and Management* (SCRAM™)". Esta herramienta se enfoca en los riesgos del medio ambiente. En varias pruebas arrojó como resultado el aumento de la capacidad de recuperación y un mayor rendimiento de la cadena de suministro (Pettit, Croxton, & Fiksel, 2013).

Concretamente, en este trabajo se realiza la aplicación de la simulación de Montecarlo, puesto que es un método flexible que puede ser desarrollado en diferentes programas, tales como MS Excel. Las simulaciones de Montecarlo tuvieron origen y uso principal en 1944, en la realización de la investigación para desarrollar la primera bomba atómica, específicamente en la resolución de un problema de difusión de neutrones (Pillana, 2000). Esta simulación representa un importante análisis estadístico y frecuentemente utilizado en distintos áreas de estudio como por ejemplo en la simulación de fenómenos físicos, flujos de tráfico, pronósticos, entre otros.

A continuación, se nombra el esquema de esta simulación:

1. Muestreo en las variables de entrada aleatoria.
2. Evaluación de la salida del modelo.
3. Análisis estadístico sobre la producción del modelo. (MST, 2017)

Además, aludiendo a la integración de la optimización con simulación, se tiene que es un proceso cuyo objetivo es minimizar los recursos gastados mientras se maximiza la información obtenida en un experimento de simulación (Carson, 1997). Las técnicas de simulación-optimización se utilizan desde hace algunas décadas, las cuales iniciaron con una aproximación estocástica durante la década de 1950. Sin embargo, esta técnica se ha potencializado en los últimos años, debido al aumento de la capacidad computacional, lo que permite proporcionar diferentes soluciones alternativas de alta calidad en los sistemas y promover la introducción de incertidumbre y de riesgos (Juan, Faulin, Grasmanc, Rabe, & Figueira, 2015). Entre los métodos para su desarrollo se encuentran en la literatura los siguientes: los métodos de búsqueda basados en gradientes de probabilidad, de diferencias finitas y de análisis de perturbación; la optimización estocástica; la metodología de superficie de respuesta; los métodos heurísticos como algoritmos genéticos, estrategias evolutivas y búsqueda tabú y los métodos estadísticos como clasificación y selección (Juan, Faulin, Grasmanc, Rabe, & Figueira, 2015).

Conclusiones de la revisión de la literatura

De acuerdo a cada uno de los extractos presentados anteriormente y a que el diseño de cadena es un tema de muchas extensiones que está orientado a mejorar su desempeño, se decide integrar adicionalmente la sostenibilidad y el riesgo. Este último considerado como la pérdida de productos en el transporte, independientemente de los medios usados y de las conexiones de la red proveídas por inesperadas situaciones, tema que parece ser interesante debido a que las empresas tienen beneficio al evitar pérdidas de producto. Un claro ejemplo es el interés de los ejecutivos de aseguradoras que lo reconocen como una herramienta de mitigación de riesgos, el cual, aplicado a lo descrito, en muchos casos no solo realiza el pago del costo de la mercancía, sino del valor total de la venta (Dittmann, 2014).

En la siguiente tabla se resumen los trabajos relevantes realizados en la última década, en donde se destacan características interesantes de los problemas de diseño de cadena, riesgo y sostenibilidad según aplique:

Autores	Sostenibilidad	Riesgo	Incertidumbre	Función (es) objetivo	Método de solución
(Azaron, Brown, Tarim, & Modarres, 2008)		✓	✓	Minimización de costos, variación del costo total y minimización del riesgo financiero.	Programación estocástica multiobjetivo
(Pan & Nagi, 2010)			✓	Minimizar costo total esperado, variabilidad de costos, y de la penalidad por demanda insatisfecha	Heurística basada en un algoritmo del camino más corto que se desarrolla mediante el uso de una distancia sustituta para referirse a la efectividad de cada miembro de la cadena de suministro.
(El-Sayed, Afia, & El-Kharbotly, 2010)		✓		El objetivo es maximizar el beneficio esperado total.	Programación entera estocástico lineal mixto (SMILP) como un programa estocástico multietapa
(PrasannaVenkatesan & Kumanan, 2012)		✓		Minimizar el costo total y maximizar la fiabilidad de entrega del proveedor	Optimización por enjambre de partículas y simulación

(Pishvae, Razmi, & Torabi, 2012)	✓		✓	Minimizar los impactos ambientales y los costos totales de la creación de la red	Enfoque de solución difuso interactivo
(Pishvae, Razmi, & Torabi, 2012)	✓		✓	Minimizar los impactos ambientales y los costos totales de la creación de la red	Programación posibilística robusta (RPP)
(Ruiz-Femenia, Guillén-Gosálbez, Jiménez, & Caballero, 2013)	✓		✓	Maximizar el valor esperado del Valor Presente Neto y el potencial de calentamiento global (GWP)	Programa estocástico multiescenario entero mezclado lineal (MILP) con la característica única de incorporar la incertidumbre de la demanda
(Hamed & Govindan, 2014)	✓	✓		Maximizar beneficio esperado teniendo en cuenta tres tipos de medidas de riesgo	Programación lineal entera Mixta
(Yang, Liu, & Yang, 2015)		✓	✓	Minimizar costos y riesgo	Optimización basada biogeografía-multiobjetivo mejorada (MO-BBO, por sus siglas en inglés) algoritmo integrado con el software de LINGO.
(Nooraie & Mellat Parast, 2015)		✓		Maximizar visibilidad, minimizar riesgo y costo	Algoritmo heurístico basado en un método de relajación en variables de decisión para resolver un modelo NP-duro
(Jindal & Sangwan, 2016)	✓		✓	Minimizar costos, minimizar impacto ambiental.	Método interactivo ϵ -constraint
(Mota, Gomes, Carvalho, & Barbosa-Povoa, 2015)	✓			Minimizar el coste global de la cadena de suministro, minimizar el impacto ambiental, y maximizar el beneficio social	Solución con el método a posteriori o método de generación
(Montoya-Torres, 2015)	✓			Minimización del costo total, minimización de los impactos ambientales: nivel de emisiones de CO ₂ , Y minimización de los impactos sociales negativos.	Programación lineal entera mixta

Tabla 1: *Resumen de la literatura*

Dentro de la literatura se encontró como herramienta de solución la simulación; sin embargo, las que predominan son la programación matemática y estocástica. De los artículos considerados en la Tabla 1, solo uno de ellos usa la simulación como método de solución. No obstante, esta se caracteriza por apoyar el modelamiento matemático considerando la incertidumbre de la información (Huerta-Barrientos, Elizondo-Cortés, & Flores de la Mota, 2014). En este trabajo, se propone el uso de simulación como herramienta para la solución del problema definido, ya que además permite gran flexibilidad y es apropiada para considerar factores de riesgo (Gabiella, Meloni, & Pierreval, 2014).

De acuerdo con la revisión realizada, no se evidencia que algún autor aborde simultáneamente el problema de diseño de la cadena de abastecimiento con los tres objetivos propuestos de la manera especificada anteriormente. Tampoco se evidencia que alguno desarrolle las metodologías propuestas que se especifican en el capítulo 5 (Métodos de solución) de este documento.

4 Descripción general de la red de abastecimiento estudiada

La red de abastecimiento considerada en este trabajo se compone de seis niveles. Cuatro niveles comprenden desde las plantas de producción hasta la demanda del cliente final y dos niveles adicionales, uno de recolección y otro de destrucción. A continuación, se describe brevemente su funcionamiento:

1. Para satisfacer la demanda del cliente final (nivel 4), el producto se despacha desde los centros de producción (nivel 1) y se reparte a través de las bodegas o centros de distribución, pasando, si es necesario, por minoristas (niveles 2 y 3, correspondientemente). Esta característica hace mención a que la cadena de abastecimiento a considerar es de tipo no jerárquica. Es decir, el abastecimiento de productos hacia los clientes se puede dar desde distintos niveles de la red. Los productos pueden ser abastecidos directamente desde los centros de producción, o pueden pasar por los niveles intermedios, sin ningún orden específico; opuesto a la cadena de abastecimiento jerárquica.
2. Cada instalación se caracteriza por contar con una capacidad definida, un costo y un impacto en emisiones de CO₂ asociado a su uso. Para los niveles 2 y 3, como se mencionó en el punto anterior, la red no es restrictiva, es decir, los productos no tienen que pasar obligatoriamente por estos niveles.
3. El transporte de los productos se puede realizar por medio de dos tipos de vehículos (Tipo I y Tipo II) cuyas características varían en costo y cantidad de emisiones de CO₂. Este transporte puede darse entre las instalaciones que conectan un nivel a otro o movilizar el producto a instalaciones dentro del mismo nivel hasta llegar al consumo. Adicionalmente, se considera que las decisiones de transporte tienen asociadas una proporción de pérdida de productos.
4. Luego de que el producto cumple su función con el cliente final, se recoge una proporción de este y se transporta hacia los centros de recolección (nivel 5), allí se realiza un proceso de selección para decidir si el producto puede volver a las plantas para que se reutilice o, por el contrario, si se debe enviar a un centro de destrucción (nivel 6). En esta etapa de la red se evidencia la característica de ciclo cerrado.

En la siguiente figura, se puede observar la red estudiada y sus conexiones.

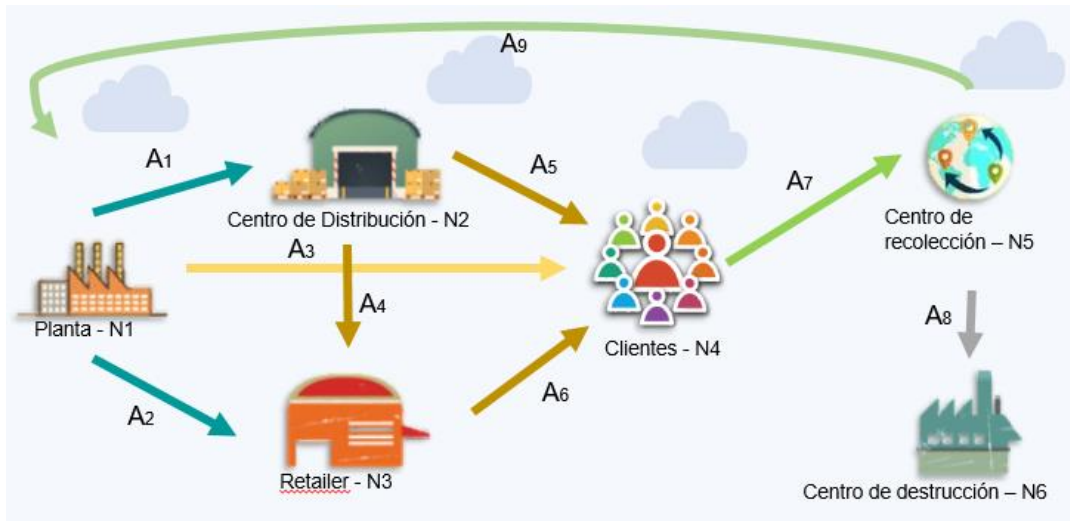


Figura 3: grafo de la red de abastecimiento

Fuente: elaboración propia

N1: Nivel 1; N2: Nivel 2; N3: Nivel 3; N4: Nivel 4; N5: Nivel 5; N6: Nivel 6.

4.1 Descripción de la problemática

El objetivo de este trabajo es determinar la configuración óptima para la cadena de suministro descrita anteriormente, de acuerdo con consideraciones económicas, ambientales y de riesgo, bajo un esquema multiobjetivo. Los objetivos a tener en cuenta son:

1. Minimizar el costo total del transporte y del uso de los nodos intermedios.
2. Minimizar el riesgo de las pérdidas de producto en el transporte.
3. Minimizar el impacto ambiental por emisiones de CO₂ en cada una de las conexiones y nodos.

Consideraciones:

- La localización de los centros de producción, nodos intermedios, clientes, centros de recolección y centros de destrucción es fija. Cabe destacar que, aunque las localizaciones son fijas, se decidirá cuáles de ellas se van a utilizar (asociada a la variable de decisión binaria de si se usa o no cada nodo).
Respecto a esta consideración y dados los atributos mencionados, se resalta que se trata de un problema de diseño de cadenas de abastecimiento puesto que su gestión como tal requiere de una reorganización y evaluación de decisiones del conjunto actual de nodos además de los flujos entre ellos, refiriéndose así a un problema táctico (Simchi-Levi, Kaminsky, & Simchi-Levi, 2000).
- Los centros de producción, los nodos intermedios y los centros de recolección tienen una capacidad conocida y limitada.
- Se conocen los costos fijos de uso de los nodos y de los arcos como los parámetros para dar la mejor solución a uno de los objetivos: minimizar costos.
- Se define un diseño de un periodo simple, considerando que las principales características del problema no varían en el corto plazo.

- Los costos son lineales porque no existe *tapering*, es decir, no hay reducción de costos a medida que aumentan los recorridos.
- Se conoce el impacto ambiental por usos de arcos y nodos expresados en kg de CO₂, que también representan un parámetro clave para definir la solución a otro de los objetivos, el cual es minimizar el impacto ambiental.
- Se conoce la demanda para cada uno de los clientes.
- El pedido se entrega completo y no fraccionado para mantener así la linealidad en el transporte.

Se pretende determinar:

- La cantidad de producto a transportar por cada uno de los arcos en cada tipo de vehículo.
- El tipo de vehículo a usar para el transporte entre nodos.
- La cantidad de productos a trasladar entre cada uno de los clientes y los centros de recolección.
- Si se pasa o no por cada nodo.

Supuestos determinados para establecer el diseño metodológico:

- Solo hay un tipo de producto a abastecer, pero se puede diferenciar si es nuevo o reciclado.
- De acuerdo con cada conexión, hay dos opciones de transporte: vehículo tipo I y II. Se considera una flota para cada nodo suficiente para el transporte de productos.
- Los productos se encuentran libres de defectos.
- La oferta total de los puntos de origen es suficiente para abastecer toda la demanda (no se crean nodos ficticios de oferta).
- Se puede abastecer al cliente desde diferentes niveles de la cadena (multicanal).
- El modelo no tiene en cuenta de manera explícita consideraciones de tipo financiero relativas a impuestos y beneficios tributarios propios de procesos de comercialización.
- El modelo permite el envío de productos desde un centro de distribución hacia otro (traslado de productos entre centros de distribución).
- Los costos de transporte son variables.

4.2 Modelo matemático

El problema se formuló matemáticamente de la siguiente manera:

1. Conjuntos y parámetros

Se define un grafo $G = \{N, A\}$ dirigido, completo y ponderado, compuesto por un conjunto de nodos N que representa el total de instalaciones y clientes de la cadena de abastecimiento. Este conjunto N se compone en los siguientes subconjuntos de nodos:

- N_1 : Conjunto de plantas de producción
- N_2 : Conjunto de centros de distribución
- N_3 : Conjunto de minoristas
- N_4 : Conjunto de clientes
- N_5 : Conjunto de centros de recolección
- N_6 : Conjunto de centros de destrucción

Adicionalmente, el grafo se compone de un conjunto de arcos dirigidos A .

- A_1 : Arcos que conectan las plantas de producción (N_1) con los centros de distribución (N_2)
- A_2 : Arcos que conectan las plantas de producción (N_1) con los minoristas (N_3)
- A_3 : Arcos que conectan las plantas de producción (N_1) con los clientes (N_4)
- A_4 : Arcos que conectan los centros de distribución (N_2) con los minoristas (N_3)
- A_5 : Arcos que conectan los centros de distribución (N_2) con los clientes (N_4)
- A_6 : Arcos que conectan los minoristas (N_3) con los clientes (N_4)
- A_7 : Arcos que conectan los clientes (N_4) con los centros de recolección (N_5)
- A_8 : Arcos que conectan los centros de recolección (N_5) con los centros de destrucción (N_6)
- A_9 : Arcos que conectan los centros de recolección (N_5) con las plantas de producción (N_1)

Asimismo, se considera un conjunto finito de modos de transporte M y un conjunto de tipos de producto $T = \{\text{nuevo, reciclado}\}$.

Parámetros del modelo:

C_{ijm}^T : Costo unitario de transporte en el arco $(i, j) \in A$ a través del medio de transporte $m \in M$

C_u^F : Costo financiero por usar el nodo intermedio $u \in N_2 \cup N_3$

C_{ii}^P : Costo de producción de producto tipo t en la planta de producción $i \in N_1$

E_{ijm}^T : Emisiones de CO₂ por transportar producto en el arco $(i, j) \in A$ a través del medio de transporte $m \in M$

E_u^F : Emisiones de CO₂ por usar el nodo intermedio $u \in N_2 \cup N_3$

S_{ijm} : Proporción de pérdida de productos en transporte en el arco $(i, j) \in A$ a través del medio de transporte $m \in M$

Q_u : Capacidad de recepción y procesamiento en cada uno de los nodos $u \in N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_5 \cup N_6$

D_j : Demanda de producto del cliente $j \in N_4$

α_j : Proporción esperada de productos que van desde los clientes $j \in N_4$ a los centros de recolección.

β_k : Proporción esperada de productos que van desde el centro de recolección $k \in N_5$ a los centros de producción

H : Número muy grande

Los valores para estos modelos se obtienen de manera aleatoria con la función de MS Excel de generación de número aleatorios para una distribución uniforme teniendo en cuenta las siguientes especificaciones, detalladas en el Anexo 1.

VARIABLES DE DECISIÓN Y NOTACIÓN

Las siguientes son las variables de decisión definidas para el desarrollo del modelo. Las primeras son de naturaleza entera asociadas a la cantidad de producto a transportar entre nodos y las siguientes son binarias, que precisan si se hace uso de cada uno de los nodos y si se usa o no un modo de transporte específico.

- Variables de decisión enteras:

P_{ti} : Cantidad de producto tipo $t \in T$ que se manufactura en el centro de producción $i \in N_1$

X_{ijm} : Cantidad de producto a transportar en el arco $(i, j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6$ a través del medio de transporte $m \in M$

Y_{ijm} : Cantidad de producto a transportar en el arco $(i, j) \in A_7$ a través del medio de transporte $m \in M$

Z_{klm} : Cantidad de producto a transportar en el arco $(i, j) \in A_8$ a través del medio de transporte $m \in M$

R_{kim} : Cantidad de producto a transportar en el arco $(i, j) \in A_9$ a través del medio de transporte $m \in M$

- Variables de decisión binarias:

$B_u = 1$ Si se usa el nodo $u \in N_2 \cup N_3$ para el transporte de producto. 0 de lo contrario.

$W_{ijm} = 1$ Si se usa el arco $(i, j) \in A$ a través del medio de transporte $m \in M$. 0 de lo contrario.

4.3 Descripción de las ecuaciones

Funciones Objetivo: El modelo propuesto busca simultáneamente optimizar los siguientes tres objetivos:

1. Minimizar el costo total del costo de transporte entre nodos, más el costo fijo de usar nodos y más el costo de producción

$$\begin{aligned} \text{Min } A = & \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6} C_{ijm}^T X_{ijm} + \sum_{u \in N_2 \cup N_3} C_u^F B_u \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in N_1} C_{ti}^P P_{ti} + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_7} C_{ijm}^T Y_{ijm} + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_8} C_{ijm}^T Z_{ijm} \\ & + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_9} C_{ijm}^T R_{ijm} \end{aligned} \quad (1)$$

2. Minimizar la cantidad total de emisiones de CO₂: emisiones por transporte entre nodos más las emisiones por usar un nodo.

$$\text{Min } G = \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A} E_{ijm}^T W_{ijm} + \sum_{u \in N_2 \cup N_3} E_u^F B_u \quad (2)$$

3. Minimizar la cantidad de producto perdido en el transporte como factor de riesgo.

$$\text{Min } Q = \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6} S_{ijm} X_{ijm} + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_7} S_{ijm} Y_{ijm} + \sum_{m \in M} \sum_{(i,j) \in A_9} S_{ijm} R_{ijm} \quad (3)$$

Restricciones:

- a. Se debe atender la demanda en cada punto de demanda:

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \mid (i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6} (1 - S_{ijm}) X_{ijm} \geq D_j \quad \forall j \in N_4 \quad (4)$$

b. Capacidades limitadas:

- No se debe superar la capacidad de recepción de productos para cada uno de los nodos.

$$\sum_{m \in M} \sum_{i | (i,u) \in A_1 \cup A_2 \cup A_4} X_{ium} \leq Q_u B_u \quad \forall u \in N_2 \cup N_3 \quad (5)$$

- No se debe superar la capacidad de producción y recepción de productos de cada uno de los centros de producción.

$$\sum_{t \in T} P_{ti} \leq Q_i \quad \forall i \in N_1 \quad (6)$$

- La cantidad de productos que salga de cada planta de producción debe ser igual a la cantidad de productos con los que cuentan

$$\sum_{m \in M} \sum_{j | (i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3} X_{ijm} = \sum_{t \in T} P_{ti} \quad \forall i \in N_1 \quad (7)$$

- Existe una capacidad de recepción de productos que van desde el centro de recolección en cada una de las plantas:

$$\sum_{k | (k,i) \in A_9} \sum_{m \in M} R_{kim} (1 - S_{kim}) \leq Q_i \quad \forall i \in N_1 \quad (8)$$

- Existe una capacidad de recepción de productos en los centros de recolección.

$$\sum_{j | (j,k) \in A_7} \sum_{m \in M} Y_{jkm} (1 - S_{jkm}) \leq Q_k \quad \forall k \in N_5 \quad (9)$$

c. Relación:

- Si se decide usar un arco, los nodos asociados deben usarse:

$$\sum_{i | (i,u) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4} \sum_{m \in M} W_{ium} \leq B_u Q_u \quad \forall u \in N_2 \cup N_3 \quad (10)$$

- Variables enteras con binarias del transporte

$$\begin{aligned} H \cdot X_{ijm} &\leq W_{ijm} \quad \forall (i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6, \forall m \in M \\ H \cdot Y_{ijm} &\leq W_{ijm} \quad \forall (i,j) \in A_7, \forall m \in M \\ H \cdot Z_{ijm} &\leq W_{ijm} \quad \forall (i,j) \in A_8, \forall m \in M \\ H \cdot R_{ijm} &\leq W_{ijm} \quad \forall (i,j) \in A_9, \forall m \in M \end{aligned} \quad (11)$$

d. Restricciones de balance de material

- o Las cantidades que llegan al nodo de destino deben ser menores teniendo en cuenta la proporción de pérdida de producto según el arco y el tipo de vehículo

$$\sum_{i|(i,j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4} \sum_{m \in M} X_{ijm} (1 - S_{ijm}) = \sum_{i|(j,i) \in A_4 \cup A_5 \cup A_6} \sum_{m \in M} X_{jim} \quad \forall j \in N_2 \cup N_3 \quad (12)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_3 \cup A_5 \cup A_6} \sum_{m \in M} X_{ijm} (1 - S_{ijm}) = \sum_{k \in N_5} \sum_{m \in M} Y_{jkm} \quad \forall j \in N_4 \quad (13)$$

$$\sum_{j|(j,k) \in A_7} \sum_{m \in M} Y_{jkm} (1 - S_{jkm}) = \sum_{i|(k,i) \in A_9} \sum_{m \in M} R_{kim} + \sum_{l|(k,l) \in A_8} \sum_{m \in M} Z_{klm} \quad \forall k \in N_5 \quad (14)$$

- o La cantidad de productos que llegan a las plantas de producción desde el centro de recolección debe ser igual a la cantidad de productos allí restaurados teniendo en cuenta su factor de pérdida.

$$\sum_{k|(k,i) \in A_9} \sum_{m \in M} R_{kim} (1 - S_{kim}) = P_{1i} \quad \forall i \in N_1 \quad (15)$$

- e. Se debe enviar mínimo la fracción de productos desde los clientes a los centros de recolección

$$\sum_{k \in N_5} \sum_{m \in M} Y_{jkm} \geq \alpha_j D_j \quad \forall j \in N_4 \quad (16)$$

- f. Se debe enviar la fracción de los productos desde los centros de recolección a los nodos de origen y al centro de destrucción

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{m \in M} R_{kim} \geq \beta_k \sum_{j \in N_4} \sum_{m \in M} Y_{jkm} (1 - S_{jkm}) \quad \forall k \in N_5 \quad (17)$$

$$\sum_{l \in N_6} \sum_{m \in M} Z_{klm} \geq (1 - \beta_k) \sum_{j \in N_4} \sum_{m \in M} Y_{jkm} (1 - S_{jkm}) \quad \forall k \in N_5 \quad (18)$$

- g. El pedido del cliente es abastecido completamente desde una sola bodega usando un único modo de transporte (no se atienden pedidos fraccionados).

$$\sum_{i|(i,j) \in A} \sum_{m \in M} W_{ijm} = 1 \quad \forall j \in N_4 \quad (19)$$

Definición de variables de decisión:

- $B_u \in \{0, 1\} \quad \forall u \in N_2 \cup N_3$
- $W_{ijm} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, \forall m \in M$
- $X_{ijm} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6, \forall m \in M$
- $Y_{ijm} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A_7, \forall m \in M$

- $Z_{ijm} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_8, \forall m \in M$
- $R_{ijm} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_9, \forall m \in M$

5 Métodos de Solución

Para resolver el problema expuesto se seleccionaron tres métodos. A continuación, se presentan clasificados de acuerdo a la técnica utilizada.

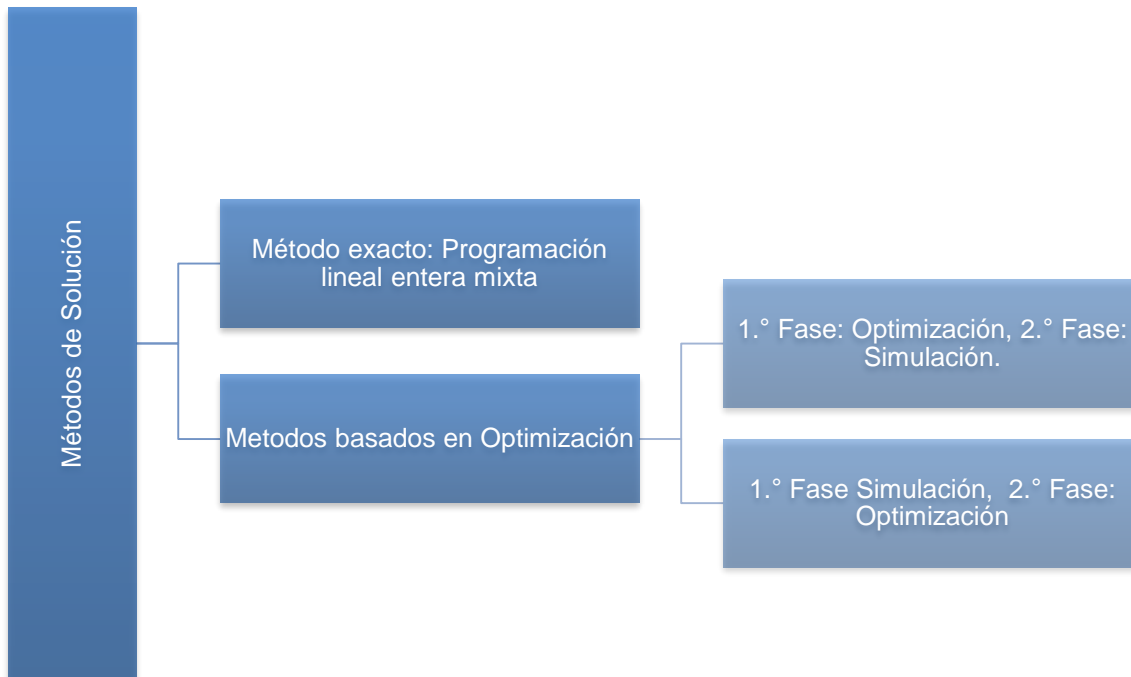


Figura 4: Métodos de Solución

5.1 Métodos basados en programación entera mixta

Como concepto, este método responde a la necesidad de optimizar, es decir, maximizar o minimizar funciones lineales con distintas variables y con restricciones lineales. Su representación obedece a un algoritmo a través del cual se logra resolver situaciones buscando en incremento de productividad respecto a los recursos (principalmente los limitados y costosos), (Ingeniería Industrial Online, 2017).

De acuerdo con lo anterior, y una vez definida la formulación del problema en el punto anterior para la realización del método de programación entera mixta, se desarrollaron los siguientes puntos:

Formulación y escritura del modelo:

1. El lenguaje de modelación implementado es GAMS (General Algebraic Modeling Language, www.gams.com).
2. Creación de instancias aleatorias para modificar los valores de las cantidades de nodos en los distintos niveles de la cadena. La generación de instancias aleatorias se basó en las modificaciones

de cada uno de los parámetros teniendo en cuenta el valor de los subíndices. Para definir los valores aleatorios, se usó la función de aleatoriedad de Microsoft Excel.

- Definición del método de solución de problema multiobjetivo y el número de soluciones para la representación del frente de Pareto:

En este punto, el método de solución escogido es ε -*constraint*. Debido a que en los problemas multiobjetivo es común obtener más de una solución para los tres objetivos del problema descrito, este método puede proporcionar un subconjunto representativo del conjunto de Pareto, que en la mayoría de los caso se considera suficiente (Mavrotas, 2009).

A continuación se describe brevemente el método ε -*constraint*:

Se supone el siguiente problema multiobjetivo:

$$\begin{aligned} & \text{Max } (F_1(x), F_2(x), F_3(x) \dots F_p(x)) \\ & \text{Sujeto a:} \\ & x \in S \end{aligned}$$

Donde x es el vector de variables de decisión, $F_1(x), \dots, F_p(x)$ son las funciones objetivo P y S es la región factible.

En el método de ε -*constraint* se optimiza una de las funciones objetivo usando las otras funciones objetivo como restricciones, de tal manera que se incorporan en el modelo como una limitación:

$$\begin{aligned} & \text{Max } F_1(x) \\ & \text{Sujeto a:} \\ & F_2(x) \geq e_2 \\ & F_3(x) \geq e_3 \\ & \dots \\ & F_p(x) \geq e_p \\ & x \in S \end{aligned}$$

Una vez comprendido el método ε -*constraint*, se implementa de la manera propuesta por (Mavrotas, 2009):

- Determinar los valores de la tabla *Lexicographic optimization for the payoff table*, basada en el cálculo de los rangos de búsqueda de soluciones como resultado de las optimización individual de las funciones objetivo.
- Dividir los rangos de las funciones objetivo en intervalos iguales.
- Estos puntos equidistantes (*Grid point* o puntos de red), definidos por los intervalos anteriores, son los valores de las restricciones correspondientes a las funciones objetivo no consideradas como la prioridad.
- Obtener del conjunto de soluciones con el optimizador variando el valor del lado derecho de las restricciones.
- Procesar los datos y el cálculo de los indicadores hipervolumen y dispersión-espaciamento.

Los anteriores indicadores se consideran apropiados para el problema tratado al ser de naturaleza multiobjetivo. A continuación, se describe brevemente de qué se trata cada uno de estos indicadores:

Hipervolumen:

Es una métrica propuesta por (Zitzler & Thiele, 1998), quienes lo definen como “el tamaño del espacio cubierto o del espacio dominado”. Este indicador tiene dos ventajas importantes:

1. Es sensible a cualquier tipo de mejora. Lo que quiere decir que cuando se calcula el hipervolumen para un conjunto A de soluciones, que domina a otro conjunto B de soluciones, el aporte del hipervolumen será de mayor calidad para el primer conjunto que para el segundo.
2. De acuerdo con lo anterior, el hipervolumen garantiza que cualquier aproximación al conjunto A de soluciones que alcanza el valor máximo de calidad posible para un problema particular, contiene todo el conjunto de óptimos de Pareto.

Se considera que el cálculo de este indicador es de tipo *#P-hard* (Bringmann & Friedrich, 2009). Han sido varios autores los que han realizado propuestas para el cálculo de este indicador. El que se implementa para este trabajo es el de (Fonseca, Paquete, & López-Ibáñez, 2006), descrito como una mejora del método HSO (Hypervolume by Slicing Objectives).

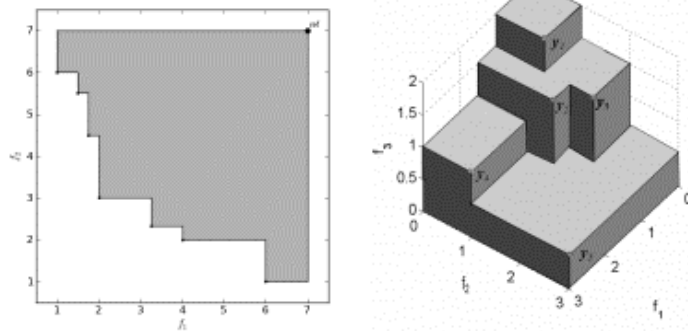


Figura 5: Ejemplos del hipervolumen dominado en dos y tres dimensiones

La figura de la izquierda muestra un caso de minimización mientras que la derecha muestra la maximización (Technische Universität Dortmund, 2015)

Espaciamiento

Esta métrica fue propuesta por (Schott, 1995). Se refiere a la distancia relativa entre las soluciones consecutivas. La idea es conocer cómo las soluciones están distribuidas a lo largo del frente de Pareto.

Su cálculo define de la siguiente manera:

$$S = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - d'|}{d_f + d_l + (N - 1) * d'}$$

Donde N es la cantidad de puntos del frente, d_i es la distancia euclidiana entre soluciones consecutivas, d' es el valor medio de todas las distancias y, d_f y d_l son las distancias euclidianas a los extremos del frente de Pareto.

Cuando las soluciones se encuentran esparcidas uniformemente entre sí, el espaciamento tendrá un valor pequeño. El valor de 0 en esta métrica indica que todos los puntos del conjunto de vectores solución están igualmente distanciados uno de otro (Deb, Thiele, Laumanns, & Zitzler, 2002).

5.2 Métodos basados en optimización vía simulación

Dada la ventaja de la simulación como herramienta para replicar situaciones con numerosas relaciones entre variables, se trabajan dos métodos, los cuales combinados con la optimización permiten generar atractivas soluciones para los diferentes objetivos expuestos.

Con el objetivo de no invertir en mayor exigencia computacional, todos los casos desarrollados en este capítulo se realizaron en MS Excel y en GAMS. Esto, además, permite la aplicación del método, ya que no requiere un software especializado.

Cabe destacar que con los siguientes métodos se solucionan 10 instancias generadas aleatoriamente, también usadas en el método de programación lineal. La limitación a 10 instancias se debe específicamente a la inversión de tiempo y análisis requerido. Este esfuerzo es acorde a la exigencia académica para la realización de este trabajo de grado.

5.2.1 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación

Para el desarrollo de este capítulo, se trabaja la siguiente metodología:

1. De manera aleatoria, se escogen las instancias: estos modelos se optimizan en GAMS con el método \mathcal{E} -constraint para obtener las soluciones de la frontera de Pareto.
2. De todas las soluciones de la frontera de Pareto, se escogen 10 casos y se simulan en el modelo construido en MS Excel. Esta simulación permite variar los siguientes parámetros: costo, emisiones y la proporción de pérdida de productos con una distribución discreta.
3. Al finalizar la simulación de cada uno, se obtiene una tabla de resultados para cada función objetivo, y se determina un intervalo de confianza con un nivel de significancia del 5 %. Cabe resaltar que la cantidad de iteraciones para cada simulación está limitada por el error máximo permitido que se ha escogido: 7 % para cada una de las funciones objetivo.

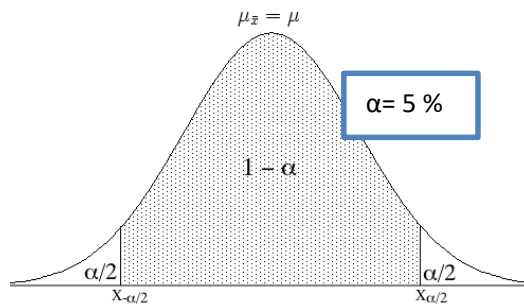


Figura 6: Ilustración del nivel de significancia

4. Cada solución obtenida puede ser clasificada de acuerdo a los cruces que tiene con otros:
- No se traslapa con ninguna otra solución
 - Presenta traslapes con al menos una solución en cualquiera de sus objetivos
 - Presenta traslape en todas las funciones objetivo.

Con esta clasificación, es importante analizar la dominancia de las soluciones con el objetivo de desechar aquellas que resultan inútiles para la toma de decisiones.

A continuación, se explica brevemente el concepto de dominancia de Pareto, el cual es muy importante en el avance de esta metodología:

Sea B solución factible, B domina a una solución factible A , para un problema con múltiples objetivos si B es al menos tan bueno como A con respecto a cada objetivo y estrictamente mejor que A con respecto al menos un objetivo (Universidad Técnica Federico Santa María, 2017).

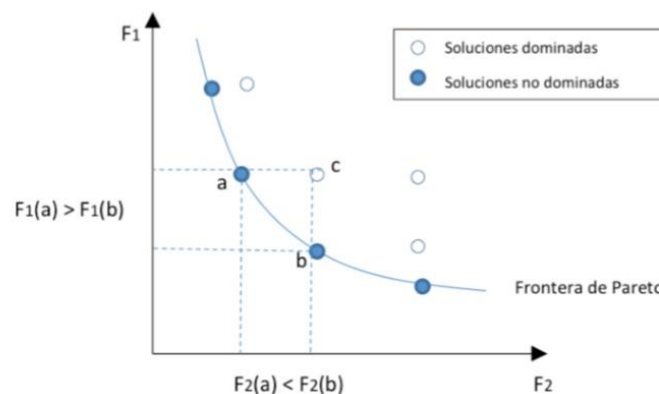


Figura 7: Frontera de Pareto para un problema de minimización (LÓPEZ, 2013)

5. Después de clasificar cada una de las soluciones, se permitirá conocer del conjunto total de cuales son aquellas opciones definitivas que representan resultados distintos y que se puede seleccionar de acuerdo al criterio del analista. Para este análisis de soluciones, se usa la prueba Tukey desarrollada en Minitab®. El método de Tukey se usa con el análisis de varianza (ANOVA, por su terminología inglesa) para crear intervalos de confianza para todas las diferencias entre pares de

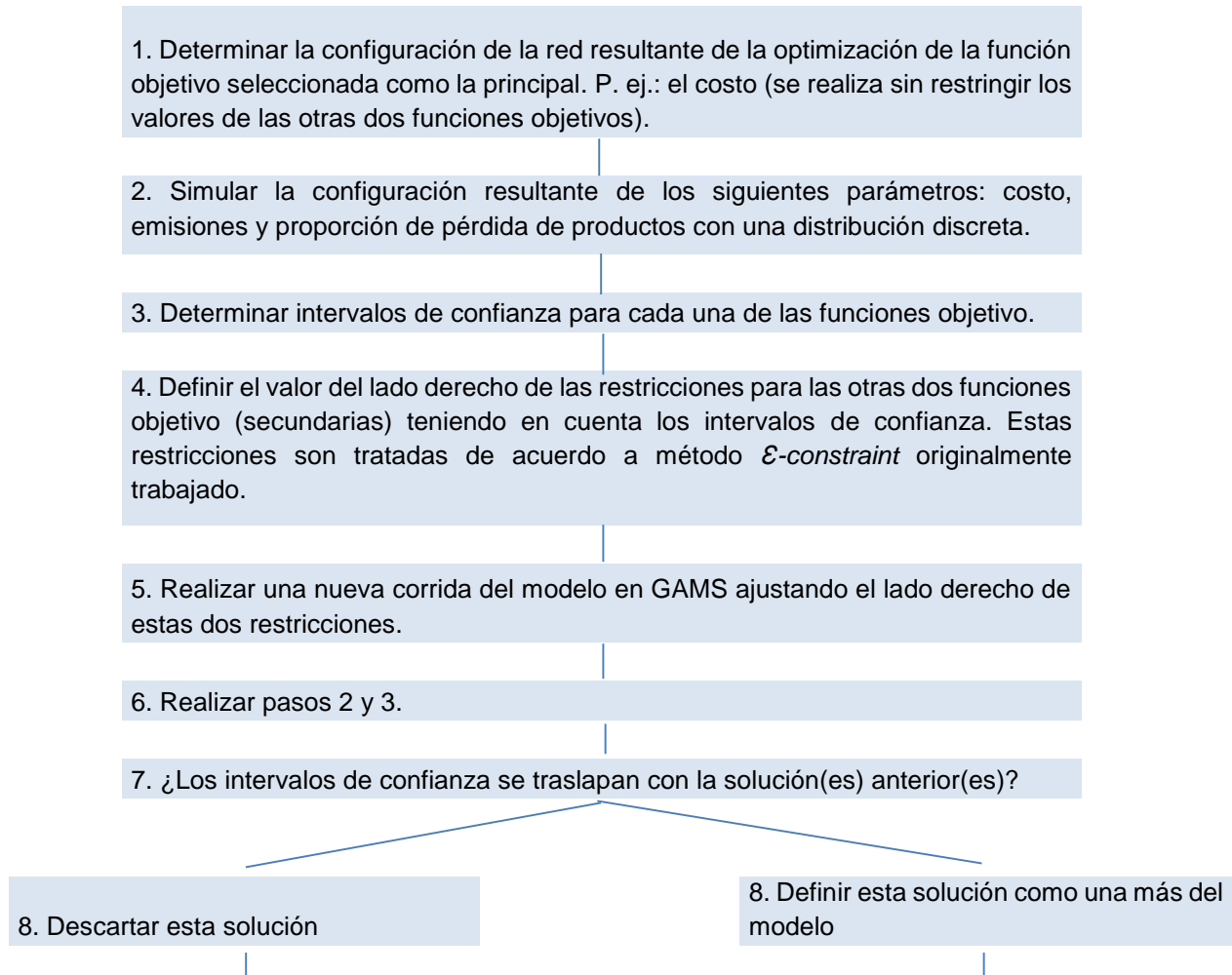
medias mientras se controla la tasa de error a un nivel que se especifique (Minitab, 2017). Para este trabajo, el error especificado es del 5 %.

La prueba de Tukey realiza la comparación de la media de cada tratamiento con la media de cualquier otro tratamiento. Es decir, se aplica simultáneamente al conjunto de todas las comparaciones por parejas y se identifica cualquier diferencia entre dos medias que sea mayor que el error estándar esperado (Minitab, 2017):

$$\mu_i - \mu_j$$

5.2.2 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación, 3.º fase: Optimización

Este modelo busca converger a soluciones atractivas en menos corridas de simulación. Esta variante se explica a través del siguiente flujo:



9. Intentar una nueva corrida del modelo en GAMS con valores distintos del lado derecho de las restricciones.

9. Realizar nuevamente el ciclo a partir del paso 4.

La cantidad de soluciones dependerá del analista teniendo en cuenta algunos criterios como:

- ✓ Los valores aceptables de cada una de las funciones objetivos bajo los cuales puede funcionar la red de abastecimiento
- ✓ El orden de prioridad de las funciones objetivo.

Es importante mencionar que con el objetivo de buscar agilidad en el desarrollo de esta metodología, la cantidad de iteraciones por simulación se ha limitado a 10.

6 Resultados Obtenidos

De acuerdo a los métodos anteriores, se procede a desarrollar una fase de experimentación y análisis que se presenta a continuación.

6.1 Métodos basados en programación entera mixta

Es esta sección, se presentan los resultados de los estudios experimentales que se realizaron (48 instancias). Todos los experimentos fueron ejecutados en el mismo computador, el cual cuenta con las siguientes características:

Procesador: Intel™ C™TM) i7-3930k CPU @ 3.20 GHz.

12G de memoria RAM.

Sistema Operativo: Windows 8 de 64 bits.

Parametrización:

La definición de los experimentos se basa en la variación de cantidad de nodos por nivel que corresponde a 3 o 6, y para clientes de 5 o 10. Asimismo, la variación de cantidad puntos en la red (*grid points*) es de 5 o 10. Esta variación se escoge teniendo en cuenta la inversión de tiempo exigida para el desarrollo de este trabajo.

En total, son 48 instancias que corresponden a 24 configuraciones distintas, las cuales se especifican continuación:

Número de experimento	Grid Points	C. Producción	C. Distribución	Minoristas	Cientes	C. Reciclaje	C. Destrucción
1,2	5	3	3	3	5	3	3
3,4	5	3	3	3	10	3	3
5,6	5	6	3	3	5	3	3
7,8	5	6	3	3	10	3	3
9,10	5	3	6	3	5	3	3
11,12	5	3	6	3	10	3	3
13,14	5	3	3	6	5	3	3
15,16	5	3	3	6	10	3	3
17,18	5	3	3	3	5	6	3
19,20	5	3	3	3	10	6	3
21,22	5	3	3	3	5	3	6
23,24	5	3	3	3	10	3	6
25,26	10	3	3	3	5	3	3
27,28	10	3	3	3	10	3	3
29,30	10	6	3	3	5	3	3
31,32	10	6	3	3	10	3	3

Número de experimento	Grid Points	C. Producción	C. Distribución	Minoristas	Cientes	C. Reciclaje	C. Destrucción
33,34	10	3	6	3	5	3	3
35,36	10	3	6	3	10	3	3
37,38	10	3	3	6	5	3	3
39,40	10	3	3	6	10	3	3
41,42	10	3	3	3	5	6	3
43,44	10	3	3	3	10	6	3
45,46	10	3	3	3	5	3	6
47,48	10	3	3	3	10	3	6

Tabla 2: Instancias método de programación lineal

Ejemplo numérico:

Se supone la siguiente configuración, la cual presenta 6 niveles con 3 fábricas (Nivel 1), 6 centros de distribución (Nivel 2), 3 minoristas (Nivel 3), 5 clientes (Nivel 4), 3 centros de recolección (Nivel 5) y 3 centros de destrucción (Nivel 6).

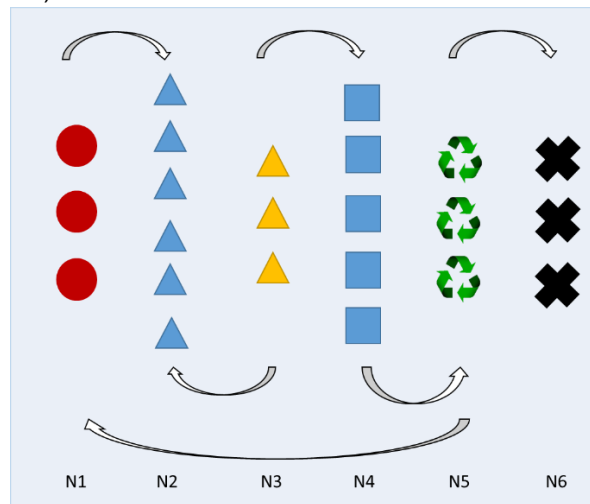


Figura 8: Red de abastecimiento (ej. 1)

Una vez corrido el modelo con esta configuración, se presenta la siguiente tabla como resultado de la optimización individual de las funciones objetivo:

	Costo (MM. UM)	Emisiones de CO ₂	Cantidad de productos perdidos
Min Costo	5,289	796	7.4
Min Emisiones	7,929	438	5.1
Min Perdidas	7,959	1,055	4

Tabla 3: Optimización individual de las funciones objetivo

De acuerdo a los resultados anteriores, los valores del lado derecho de las restricciones de emisiones y la cantidad de productos perdidos (funciones objetivo secundarias) para las corridas posteriores parametrizando el modelo con 5 *grid points* son:

Lado derecho de Restricciones	0	1	2	3	4	5
Emisiones de CO ₂	1,055.0	952.2	849.3	746.5	643.7	540.8
Cantidad de Productos perdidos	7.4	6.8	6.3	5.7	5.1	4.6

Tabla 4: Valores de las restricciones (5 *grid points*)

Soluciones de la frontera de Pareto

La siguiente tabla muestra los 15 resultados arrojados del modelo descrito:

Solución	Costo (UM)	Emisiones de CO ₂	Cantidad de productos perdidos
1	5,863	680	5.9
2	7,811	440	5.0
3	7,959	1,055	4.0
4	5,289	796	7.4
5	5,391	821	7.2
6	7,929	438	5.1
7	6,745	705	5.3
8	6,100	541	5.1
9	5,871	678	6.0
10	5,988	606	5.6
11	5,880	669	6.0
12	7,968	1,049	4.1
13	5,378	803	7.3
14	6,039	535	5.2
15	5,928	594	6.1

Tabla 4: Solución frontera de Pareto

La siguiente gráfica muestra los puntos pertenecientes a la frontera de Pareto:

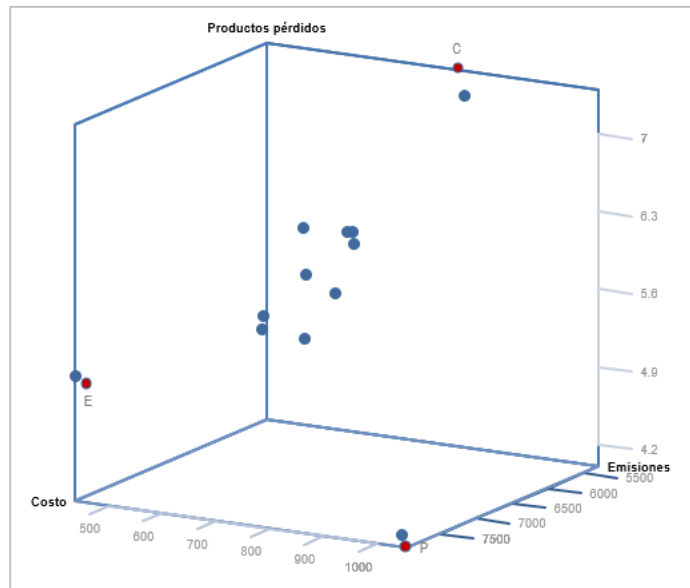


Figura 9: Frontera de Pareto - Método 1

En la Figura 7, se puede observar la ubicación de los diferentes puntos y se resaltan aquellos tres que tienen los mínimos valores de costo (C), emisiones (E) y productos perdidos:

A continuación, se muestran cada una de las configuraciones de la cadena de abastecimiento y la cantidad que resultaron de la optimización de cada una de las funciones del experimento realizado:

1. Mínimo Costo: 5,289 UM
Emisiones CO₂: 796
Cantidad de Productos Perdidos: 7.4

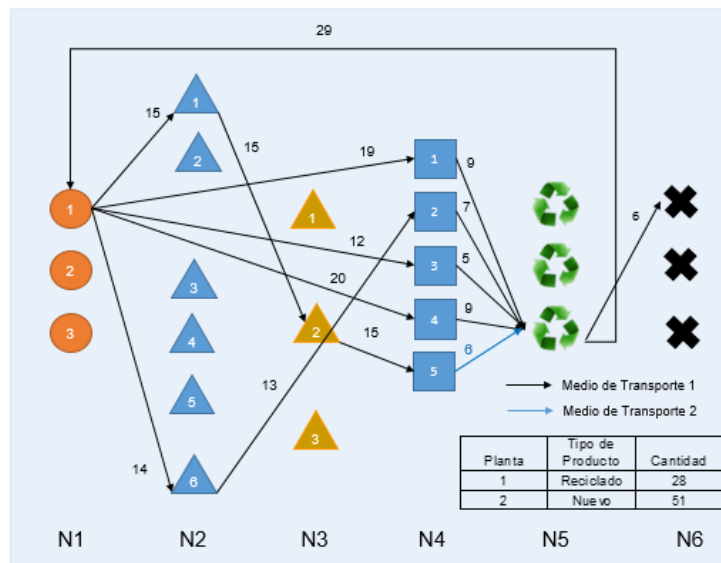


Figura 10: Diseño de cadena de abastecimiento de mínimo costo - Método 1

2. Cantidad mínima de misiones CO₂: 438

Costo: 7,929 UM

Cantidad de productos perdidos: 5.1

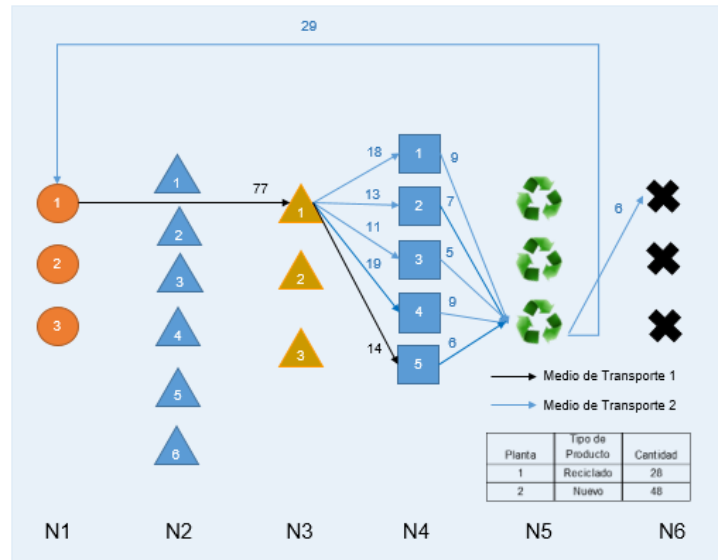


Figura 11: Diseño de cadena de abastecimiento de mínimas emisiones de CO₂ - Método 1

1. Mínima Cantidad de productos perdidos: 4.0

Costo: 7,959 UM

Emisiones CO₂: 1,055

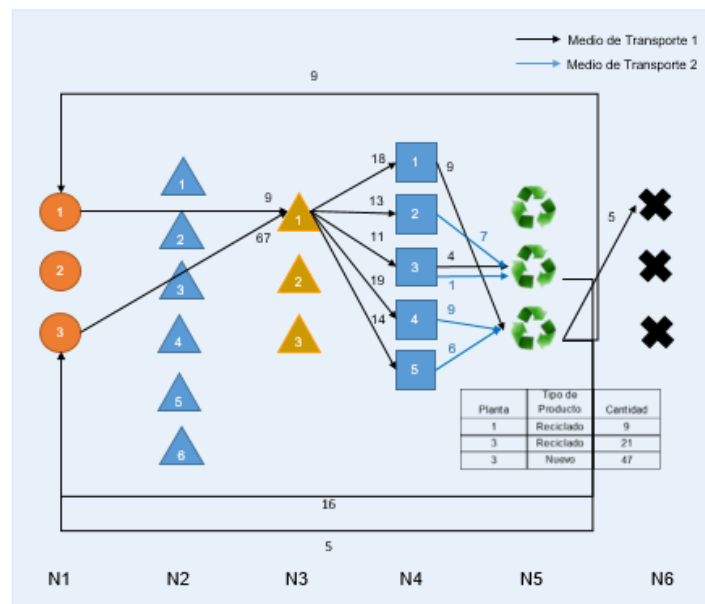


Figura 12: Diseño de cadena de abastecimiento de mínima cantidad de productos perdidos - Método 1
De acuerdo a lo anterior, los resultados obtenidos de los indicadores descritos son:

Indicadores

Número de experimento	Grid Points	Fábricas	Centro Distribución 1	Centro Distribución 2	Clientes	Centros de Reciclaje	Centros de Destrucción	Tiempo Total Transcurrido	El tiempo en segundos de CPU que el solucionador utiliza para resolver el modelo.	Espaciamiento	Hipervolumen	Número de Soluciones de la frontera de Pareto
1	5	3	3	3	5	3	3	473.4	19.4	66	7.24E+09	15
2	5	3	3	3	5	3	3	1,567.6	30.9	344	7.49E+09	11
3	5	3	3	3	10	3	3	1,198.1	191.7	1,302	3.29E+09	20
4	5	3	3	3	10	3	3	1,297.3	41.1	119	3.46E+09	20
5	5	6	3	3	5	3	3	331.9	30.1	359	7.78E+09	13
6	5	6	3	3	5	3	3	55.0	26.7	145	7.25E+09	16
7	5	6	3	3	10	3	3	1,112.1	103.0	55	4.01E+09	15
8	5	6	3	3	10	3	3	1,127.7	91.7	708	4.46E+09	20
9	5	3	6	3	5	3	3	1,630.2	65.7	776	7.76E+09	13
10	5	3	6	3	5	3	3	1,805.7	24.4	330	6.28E+09	8
11	5	3	6	3	10	3	3	2,203.4	184.3	983	3.31E+09	14
12	5	3	6	3	10	3	3	251.8	162.0	1,716	3.46E+09	13
13	5	3	3	6	5	3	3	27.2	24.2	199	7.77E+09	15
14	5	3	3	6	5	3	3	180.6	19.2	777	7.86E+09	8
15	5	3	3	6	10	3	3	1,740.0	188.2	230	3.40E+09	21
16	5	3	3	6	10	3	3	141.5	95.5	453	2.66E+09	18
17	5	3	3	3	5	6	3	1,181.3	112.0	244	7.15E+09	14
18	5	3	3	3	5	6	3	50.6	46.8	201	7.56E+09	22
19	5	3	3	3	10	6	3	1,377.4	135.4	201	3.03E+09	14
20	5	3	3	3	10	6	3	2,213.8	207.7	657	3.96E+09	8
21	5	3	3	3	5	3	6	507.2	15.3	1,302	7.32E+09	14
22	5	3	3	3	5	3	6	66.6	49.6	903	7.73E+09	11
23	5	3	3	3	10	3	6	153.5	59.7	1,660	2.94E+09	13
24	5	3	3	3	10	3	6	83.1	79.2	1,007	3.60E+09	15
25	10	3	3	3	5	3	3	454.7	57.4	150	7.11E+09	50
26	10	3	3	3	5	3	3	106.3	98.3	132	7.89E+09	57
27	10	3	3	3	10	3	3	408.1	193.4	235	3.62E+09	69

28	10	3	3	3	10	3	3	1,745.4	706.4	316	3.48E+09	46
29	10	6	3	3	5	3	3	355.0	241.9	111	7.65E+09	49
30	10	6	3	3	5	3	3	166.9	157.9	120	7.93E+09	53
31	10	6	3	3	10	3	3	2,279.0	291.8	762	3.42E+09	41
32	10	6	3	3	10	3	3	653.6	494.4	762	3.42E+09	41
33	10	3	6	3	5	3	3	199.9	61.0	113	7.38E+09	32
34	10	3	6	3	5	3	3	213.7	209.7	297	7.95E+09	62
35	10	3	6	3	10	3	3	2,759.8	1,818.4	130	5.01E+09	49
36	10	3	6	3	10	3	3	866.1	860.6	163	3.07E+09	48
37	10	3	3	6	5	3	3	1,402.3	282.1	90	6.51E+09	63
38	10	3	3	6	5	3	3	242.3	175.2	59	7.92E+09	60
39	10	3	3	6	10	3	3	345.4	299.5	884	3.99E+09	38
40	10	3	3	6	10	3	3	532.6	339.5	100	3.94E+09	52
41	10	3	3	3	5	6	3	1,161.8	206.5	94	7.09E+09	56
42	10	3	3	3	5	6	3	872.1	96.4	125	7.31E+09	47
43	10	3	3	3	10	6	3	1,449.3	437.0	99	4.37E+09	74
44	10	3	3	3	10	6	3	3,158.3	1,504.9	108	4.63E+09	58
45	10	3	3	3	5	3	6	152.9	118.1	69	7.87E+09	41
46	10	3	3	3	5	3	6	109.0	109.0	137	7.26E+09	47
47	10	3	3	3	10	3	6	1,506.1	213.2	381	3.54E+09	43
48	10	3	3	3	10	3	6	2,585.1	257.5	57	3.71E+09	33

Tabla 5: *Tabla experimental e indicadores*

A continuación, se presenta de manera resumida el resultado de los indicadores para los experimentos:

Clientes	Grid Points							
	5				10			
	CPU (Seg)	Espaciamiento	Hipervolumen	N° de Soluciones frontera de Pareto	CPU (Seg)	Espaciamiento	Hipervolumen	N° de Soluciones frontera de Pareto
5	39	471	7.4E+09	13	151	125	7.5E+09	51
10	128	758	3.5E+09	16	618	333	3.9E+09	49

Tabla 6: Resumen indicadores resultantes de las corridas

Las siguientes gráficas muestran gráficamente los promedios obtenidos por indicador:

Hipervolumen:

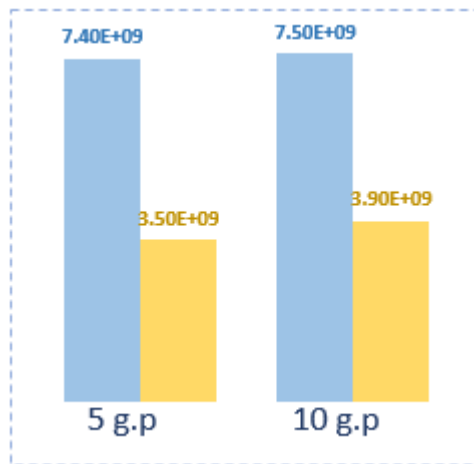


Figura 13: Promedio de hipervolumen (método de programación lineal)

Espaciamiento:

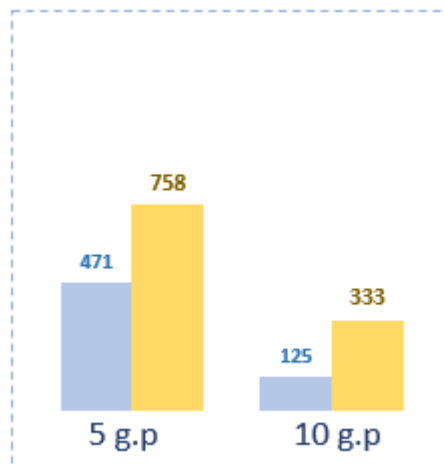


Figura 14: Promedio de espaciamiento (método de programación lineal)

Cantidad de soluciones:

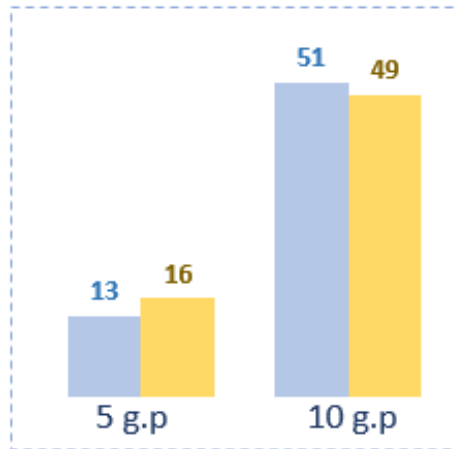


Figura 15: Promedio cantidad de soluciones (Método de programación Lineal)

Tiempo (segundos):

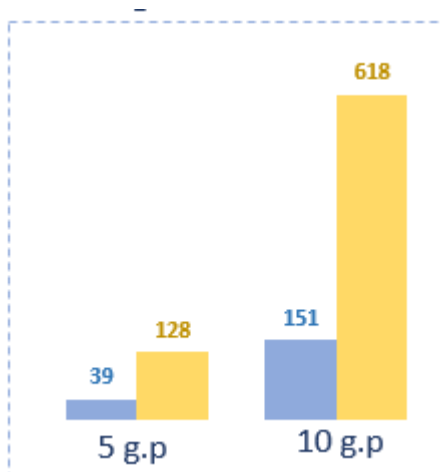


Figura 16: Promedio de tiempo (Método de programación Lineal)

La siguiente tabla muestra las variaciones de los experimentos dado el cambio de la cantidad de *grid points*.

Clientes	GAP				% Variación				
	5				10				
	CPU (Seg)	Espaciamiento	Hipervolumen	N° de Soluciones frontera de Pareto	CPU (Seg)	Espaciamiento	Hipervolumen	N° de Soluciones frontera de Pareto	
5	112	-	346	5.7E+07	38	291%	-73%	1%	286%
10	490	-	424	3.9E+08	33	382%	-56%	11%	210%

Tabla 7: Variación indicadores

De acuerdo a lo obtenido anteriormente, se pueden resaltar las siguientes afirmaciones:

- Cuanto mayor sea el número de red de puntos, más densa es la representación del conjunto eficiente (frontera de Pareto), pero con el costo de un mayor tiempo de cálculo.
- Resulta mejor el valor de calidad de las soluciones (hipervolumen) para redes de abastecimiento donde hay menor cantidad de nodos por los niveles, el cual es positivo para cadenas de suministro más limitadas.
- La medición de la distribución de las soluciones a lo largo del frente de Pareto (espaciamiento) se presenta con mejor desempeño en aquellas instancias corridas con más puntos equidistantes (*grid points*).

Por último, cabe destacar que las decisiones de abastecimiento son sensibles según la solución esperada; es responsabilidad del usuario del modelo (analista) definir la prioridad sobre los objetivos expuestos para ser aplicado en diferentes tipos de industrias.

6.2 Métodos basados en optimización vía simulación

En esta sección se presentan los resultados de los estudios experimentales que se realizaron: 10 instancias. Todos los experimentos fueron ejecutados en el mismo computador, el cual cuenta con las siguientes características:

Procesador Intel™ C™TM) i7-3930k CPU @ 3.20 GHz.
12G de memoria RAM.
Sistema Operativo: Windows 8 de 64 bits.

Parametrización:

Así como el método de programación lineal, la definición de los experimentos se basa en la variación de cantidad de nodos por nivel: 3 o 6, y para clientes: 5 o 10. Además, la variación de cantidad puntos en la red (*grid points*) es de 5 o 10. Esta variación es escogida teniendo en cuenta la inversión de tiempo exigido para el desarrollo de este trabajo.

En total, son 48 instancias que corresponden a 24 configuraciones distintas las cuales se especifican continuación:

Número de experimento	Grid Points	C. Producción	C. Distribución	Minoristas	Cientes	C. Reciclaje	C. Destrucción
1	3	3	3	5	3	3	1
2	6	3	3	5	3	3	2
3	3	6	3	5	3	3	3
4	3	3	6	5	3	3	4
5	3	3	3	5	3	3	5
6	3	3	3	10	3	3	6
7	3	6	3	10	3	3	7

8	3	3	6	10	3	3	8
9	3	3	3	10	6	3	9
10	3	6	3	10	3	6	10

Tabla 8: Instancias métodos de optimización-simulación

6.2.1 1.º Fase: Optimización, 2.º fase: Simulación

Como ejemplo del desarrollo de la metodología propuesta, se explica a continuación un caso:

Se supone la misma configuración de red presentada en el ejemplo anterior, la cual presenta 6 niveles con 3 fábricas (Nivel 1), 6 centros de distribución (Nivel 2), 3 minoristas (Nivel 3), 5 clientes (Nivel 4), 3 centros de recolección (Nivel 5) y 3 centros de destrucción (Nivel 6).

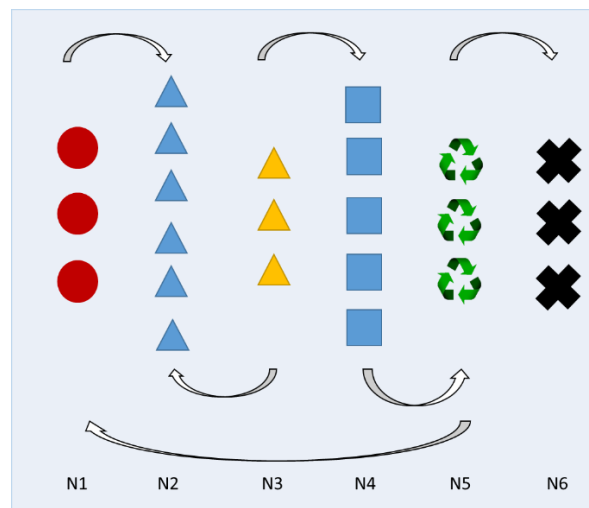


Figura 17: Red de abastecimiento

Las 10 soluciones de la frontera de Pareto obtenidas del modelo de GAMS son:

	Costo	Emisiones	Cantidad de Productos perdidos
1	5,863	680	5.9
2	7,811	440	5.0
3	7,959	1,055	4.0
4	5,289	796	7.4
5	5,391	821	7.2
6	7,929	438	5.1
7	6,745	705	5.3
8	6,100	541	5.1
9	5,871	678	6.0
10	5,988	606	5.6

Tabla 9: Frontera de Pareto

A continuación, se presenta el detalle resultado de la simulación de la primera solución de la tabla anterior:

	Costo	Emisiones	Productos Perdidos
Media	\$5,863	680	5.9
Desviación Estándar	474	10	0.6
Intervalo de Confianza	176	4	0.2
Amplitud IC	351	7	0.4
Error Máximo	6%	1%	7%
Amplitud IC Aceptable	7%	7%	7%

Tabla 10: *Medidas estadísticas*

Corridas las simulaciones para cada una de las 10 soluciones de la frontera de Pareto pertenecientes a una instancia, se tienen los siguientes resultados respecto a los intervalos de confianza calculados:

Número de Solución	Costo	Emisiones	Cantidad de productos perdidos
1	$5688 < \mu < 6039$	$676 < \mu < 684$	$5.7 < \mu < 6.1$
2	$7698 < \mu < 7924$	$439 < \mu < 442$	$4.8 < \mu < 5.2$
3	$7820 < \mu < 8098$	$1052 < \mu < 1058$	$3.8 < \mu < 4.2$
4	$5026 < \mu < 5552$	$787 < \mu < 804$	$7.2 < \mu < 7.6$
5	$5130 < \mu < 5653$	$814 < \mu < 829$	$7 < \mu < 7.4$
6	$7773 < \mu < 8086$	$436 < \mu < 441$	$4.9 < \mu < 5.4$
7	$6564 < \mu < 6850$	$703 < \mu < 708$	$5.4 < \mu < 6.1$
8	$5900 < \mu < 6300$	$539 < \mu < 544$	$4.7 < \mu < 5.5$
9	$5693 < \mu < 6050$	$674 < \mu < 683$	$5.8 < \mu < 6.2$
10	$5761 < \mu < 6215$	$603 < \mu < 610$	$5.3 < \mu < 5.8$

Tabla 11: *Intervalos de confianza del 95 %*

Las soluciones se pueden comparar estadísticamente teniendo en cuenta que todas estas soluciones pertenecen a la frontera de Pareto inicial. Esto gracias a la optimización del problema en GAMS, ya que ahora se tienen los intervalos de confianza, resultados de la simulación. Si hay traslape de los intervalos de confianza, estas podrían ser consideradas estadísticamente iguales. Por lo anterior, para cada una de las soluciones funciones objetivos se procede a hacer esta comparación. Las siguientes tablas indican si existe traslape de intervalo entre soluciones "X" o sino "O":

Costo

Número de solución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		O	O	O	O	O	O	X	X	X
2	O		X	O	O	X	O	O	O	O
3	O	X		O	O	X	O	O	O	O
4	O	O	O		X	O	O	O	O	O
5	O	O	O	X		O	O	O	O	O
6	O	X	X	O	O		O	O	O	O
7	O	O	O	O	O	O		O	O	O
8	X	O	O	O	O	O	O		X	X
9	X	O	O	O	O	O	O	X		X
10	X	O	O	O	O	O	O	X	X	

Tabla 12: Comparación función Costo

Como se puede observar en la tabla de costos, 9 de las 10 soluciones tienen traslape con 1 o más soluciones.

Emisiones

Número de solución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		O	O	O	O	O	O	O	X	O
2	O		O	O	O	X	O	O	O	O
3	O	O		O	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O		O	O	O	O	O	O
5	O	O	O	O		O	O	O	O	O
6	O	X	O	O	O		O	O	O	O
7	O	O	O	O	O	O		O	O	O
8	O	O	O	O	O	O	O		O	O
9	X	O	O	O	O	O	O	O		O
10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

Tabla 13: Comparación función Emisiones

Las emisiones es el objetivo que menos traslapes presenta. Este corresponde al traslape entre la solución 1 y 9 y 6 y 2.

Productos perdidos

Número de solución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		O	O	O	O	O	O	O	X	O
2	O		O	O	O	X	O	O	O	O
3	O	O		O	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O		O	O	O	O	O	O
5	O	O	O	O		O	O	O	O	O
6	O	X	O	O	O		O	O	O	O
7	O	O	O	O	O	O		O	O	O
8	O	O	O	O	O	O	O		O	O
9	X	O	O	O	O	O	O	O		O
10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	

Tabla 14: Comparación función Productos perdidos

Similar al objetivo de costos, las soluciones dadas para la función de cantidad de productos perdidos en su mayoría presentan traslapes con alguna otra. No obstante, basados en el intervalo de confianza, es posible determinar conclusiones tentativas, pero no definitivas. Además, a través de la prueba Tukey, se realizó la prueba de medias para determinar si cada una de las soluciones es estadísticamente diferente a otras. Los resultados fueron:

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	9	365,157,951	40,573,106	114	0.000
Error	420	149,169,810	355,166		
Total	429	514,327,761			

Tabla 15: ANOVA Costo (UM)

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	9	24,162,023	2,684,669	23,179	0.000
Error	420	48,646	116		
Total	429	24,210,669			

Tabla 16: ANOVA Emisiones CO₂

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	9	233.358	25.929	31.530	0.000
Error	420	345.418	0.822		
Total	429	578.776			

Tabla 17: ANOVA Cantidad de productos perdidos

De acuerdo a lo anterior, las gráficas de comparaciones arrojadas en Minitab son:

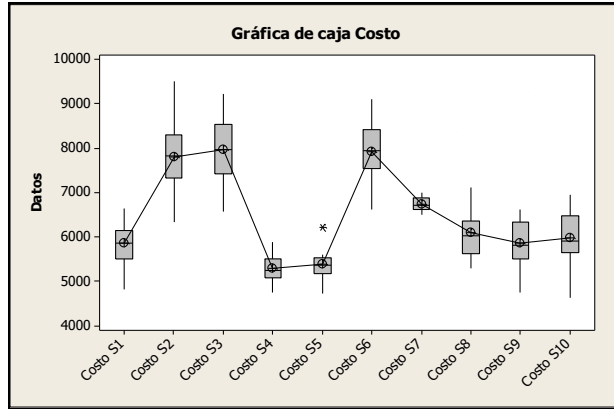


Figura 18: Gráfica de caja de la función Costo

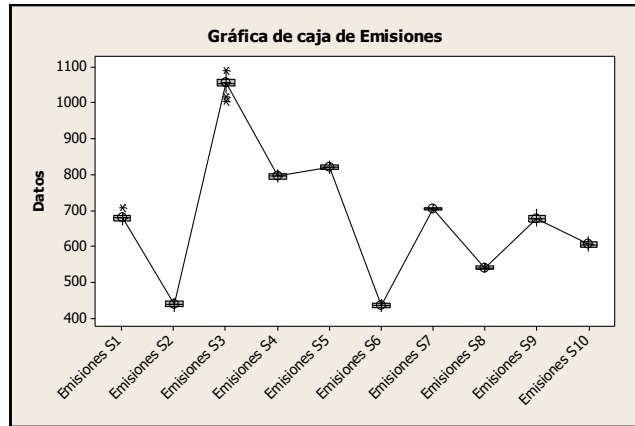


Figura 19: Gráfica de caja de la función Emisiones CO₂

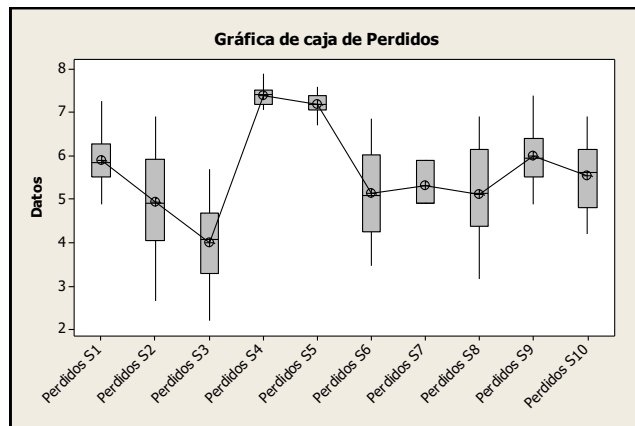


Figura 20: Gráfica de caja de la función Productos perdidos

Al revisar las comparaciones por parejas de la prueba Tukey y el concepto de dominancia se puede observar:

1. Las medias de todos los objetivos de las parejas 1-9 y 2-6 no tienen diferencias significativas. Se concluye que estas dos parejas de soluciones son iguales entre ellas.
2. La solución 1 domina a la solución 4 y 5. En cuanto al costo, el resultado es estadísticamente igual; en cantidad de emisiones y productos perdidos la 4 y 5 mantienen valores superiores.
3. Las soluciones 8 y 10 dominan a la solución 1, ya que por costo son estadísticamente iguales; tienen niveles inferiores en emisiones y cantidad de productos perdidos.
4. Las soluciones 2 y 3 son iguales en costos; la 2 es mejor que la tres en cuanto a emisiones y la 3 es mejor que la 2 en productos perdidos.
5. Las soluciones 3 y 6 son iguales en cuanto a costos; la 6 es mejor que la 3 en emisiones y la 3 es mejor que la 6 en productos perdidos.
6. Las soluciones 4 y 5 son estadísticamente iguales para los resultados de costo y productos perdidos. Sin embargo, la 4 es mejor en emisiones, por lo que domina a 5.
7. Las soluciones 8, 9 y 10 dominan a 5, ya que son mejores en los objetivos de emisiones y productos perdidos. Asimismo, son iguales a nivel de costos.
8. 8 domina a las soluciones 9 y 10: son iguales en costo, pero la 8 es mejor en emisiones y productos perdidos.
9. 10 domina a 9: es igual en costos y productos perdidos , pero la 10 es mejor en emisiones.
10. 1 domina a 7: es mejor en costo y emisiones, pero es igual en perdidos.
11. 2 es igual a 7 y 8 en productos perdidos y mejor en emisiones; 7 y 8 son mejores en costos.
12. 6 es igual a 7, 8 y 10 en productos perdidos y mejor en emisiones; 7, 8 y 10 son mejores en costos.
13. 8, 9 y 10 dominan a 7, ya que son mejores en misiones y costo; son iguales en productos perdidos.
14. 8 es mejor que 10 en emisiones, peor en costo e igual en productos perdidos.
15. 9 es peor que 10 en emisiones, peor que en costo e igual que en perdidos.

Finalmente, las opciones se reducen a las soluciones 2 o 6,3 y 8. Escoger la configuración dependerá del analista, ya que cada una de estas tres soluciones da un desempeño mejor que otro en los objetivos. La solución 8 permitirá mantener los costos más bajos, la 2 o 6 la menor cantidad de emisiones de CO₂ y la 3 la menor cantidad de productos perdidos.

Número de solución	Costo	Emisiones	Cantidad de productos perdidos
2	7698 < μ < 7924	439 < μ < 442	4.8 < μ < 5.2
6	7773 < μ < 8086	436 < μ < 441	4.9 < μ < 5.4
3	7820 < μ < 8098	1052 < μ < 1058	3.8 < μ < 4.2
8	5900 < μ < 6300	539 < μ < 544	4.7 < μ < 5.5

Tabla 18: Soluciones finales - Método 2.1

La siguiente gráfica muestra los puntos pertenecientes a la frontera de Pareto:

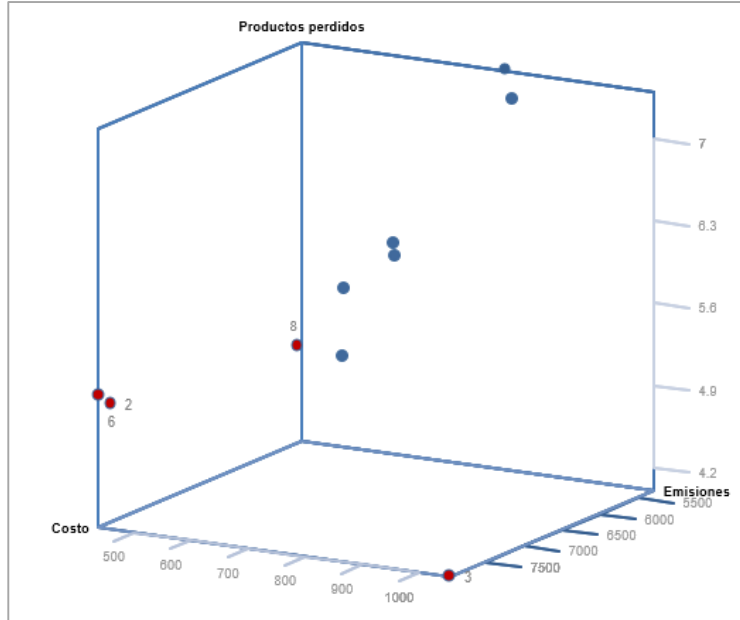


Figura 21: Frontera de Pareto - Método 2.1

En la Figura 15 se puede observar la ubicación de los diferentes puntos y se resaltan aquellas soluciones no dominadas que resultan de aplicar esta metodología.

A continuación, se muestra la configuración la cadena de abastecimiento de la solución 8. La configuración de la solución 3 y 6 corresponden a las Figuras 9 y 10 respectivamente:

Mínimo Costo: 6,100 UM
 Emisiones CO₂: 541
 Cantidad de Productos Perdidos: 5.1

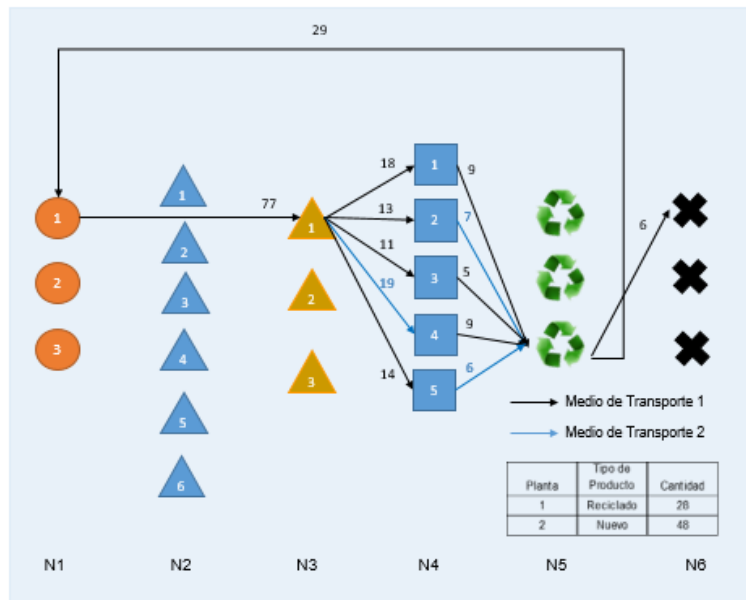


Figura 22: Diseño de la cadena de abastecimiento (Solución 8) - Método 2.1

Luego de realizar el ejercicio anterior con otras 10 configuraciones, se obtienen los siguientes resultados en cuanto a la cantidad de soluciones dada la condición de dominancia:

Instancia	Número de soluciones "no dominadas"	Cantidad de Soluciones
1	7,8,9	3
2	5,7,8,9 o 10	4
3	2 o 7, 6, 9 o 10	3
4	2,5,6,8,9	5
5	1,2,3,4,8	5
6	3,6,7,9,10	5
7	1,4,5,9	4
8	2,3,7	3
9	1,6,7	3
10	1,2,5,8	4

Tabla 19: Resumen soluciones no dominadas

Como se puede observar, con las diferentes simulaciones realizadas, la cantidad de opciones a escoger se reduce aproximadamente al 40 % de las obtenidas inicialmente, de esta manera el analista podrá definir la configuración que mejor se ajuste a las necesidades y prioridades de la industria en estudio entre una cantidad de escenarios más limitada.

En la siguiente tabla se puede ver el valor de los indicadores de hipervolumen y espaciamiento de acuerdo a los resultados del desarrollo del método en 10 instancias:

Instancia	Espaciamiento	Hipervolumen	Tiempo (seg.)
1	848	1.27E+08	134,136
2	363	1.29E+08	149,281
3	433	1.12E+08	148,241
4	697	1.44E+08	151,875
5	1,025	9.68E+07	140,720
6	1,003	3.40E+07	135,351
7	1,811	8.11E+07	128,907
8	980	8.56E+07	148,847
9	1,232	1.26E+07	146,066
10	1,429	6.65E+07	141,713

Tabla 20: *Espaciamiento e hipervolumen del método 2.1*

6.2.2 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización

Como ejemplo del desarrollo de la metodología propuesta, se explica a continuación un caso:

Se supone la misma configuración de red presentada en el ejemplo anterior, la cual presenta 6 niveles con 3 fábricas (Nivel 1), 6 centros de distribución (Nivel 2), 3 minoristas (Nivel 3), 5 clientes (Nivel 4), 3 centros de recolección (Nivel 5) y 3 centros de destrucción (Nivel 6).

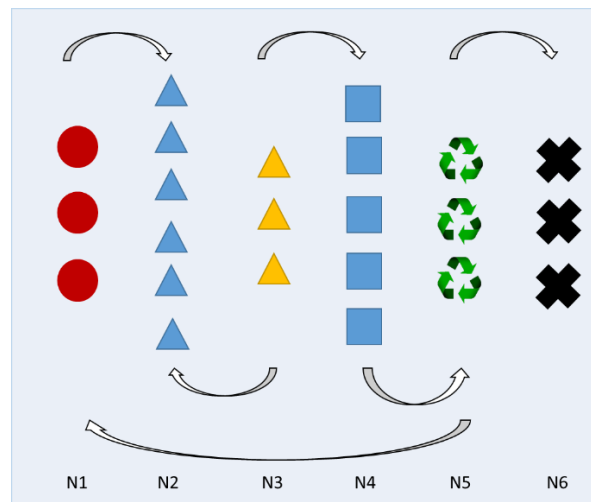


Figura 23: Red de abastecimiento

1. Se selecciona para este ejemplo el costo como la función objetivo principal. El valor funciones objetivo resultante luego de la optimización de la función Costo es la siguiente:

Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos
5,289.45	796	7.4

Tabla 21: Valores de las funciones objetivo

2. Al ingresar las decisiones de la red resultante en el simulador, se obtienen los siguientes intervalos de confianza:

Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos
298.3	23.8	0.22

Tabla 22: Intervalos de confianza de las funciones objetivo

3. Basado en los anteriores intervalos de confianza, se procede a restringir los valores de las funciones objetivo: “emisiones de CO₂” y “Cantidad de productos perdidos”. Los valores de los resultados son los siguientes:

Media			IC			Restricciones	
Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos	Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos	Emisiones	Número de Productos Perdidos
5,986.5	769.2	5.8	280.0	7.4	0.3	837.4	6.5

Tabla 23: Medias, intervalos de confianza y valores de las restricciones

Los valores de las restricciones escogidos para este ejemplo corresponden:

-Para cantidad de emisiones al resultado de la media inicial menos 5 veces su intervalo de confianza

$$5,289.5 - 5 * 23.8 = 5,628$$

-Para la cantidad de productos perdidos menos 5 veces su intervalo de confianza:

$$7.4 - 5 * 0.22 = 6.7$$

El factor multiplicativo no debe ser el mismo. Esta metodología no restringe que deban ser iguales; esto dependerá del criterio del analista y del rango en el que se pueden llegar a variar los valores de estas dos funciones objetivo. Incluso podría ser conveniente buscar soluciones en las que solo se restrinja una sola de las funciones.

4. Luego de seguir los pasos de la metodología descrita, se realizaron 5 simulaciones:

	Media			IC			Restricciones	
	Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos	Costo	Emisiones	Número de Productos Perdidos	Emisiones	Número de Productos Perdidos
1	5,289	796	7.4	298.3	23.8	0.22	NA	NA
2	5,913	656	5.5	115.6	6.1	0.20	677	6.3
3	6,701	483	4.8	198.9	5.2	0.24	484	5.3
4	6,887	1,174	4.6	197.8	7.1	0.46		4.8
5	6,217	542	4.9	392.3	15.1	0.33	647	5.3
6	8,046	430	5.1	326.8	9.5	0.44	437	

Tabla 24: Valores funciones objetivo resultado de las simulaciones - Método 2.2

Se evidencia que las soluciones 1, 4 y 6 tienen cada una los valores más bajos obtenidos de cada una de las funciones: Costo, Productos perdidos y cantidad correspondientemente.

De acuerdo con la metodología presentada, se realizó el anterior ejercicio para cada una de las 10 instancias seleccionadas y se realizaron hasta 6 simulaciones de cada una. Por lo anterior, se puede concluir:

- Para el valor de las restricciones, es conveniente poner valores con una diferencia de al menos tres veces el intervalo de confianza, esto para evitar llegar a soluciones dominadas.
- Por lo abierto que resulta ser el método, el analista puede direccionar sus soluciones hacia valores aceptables dependiendo de sus prioridades y requerimientos.

La siguiente gráfica muestra los puntos pertenecientes a las soluciones resultantes de aplicar la metodología 3:

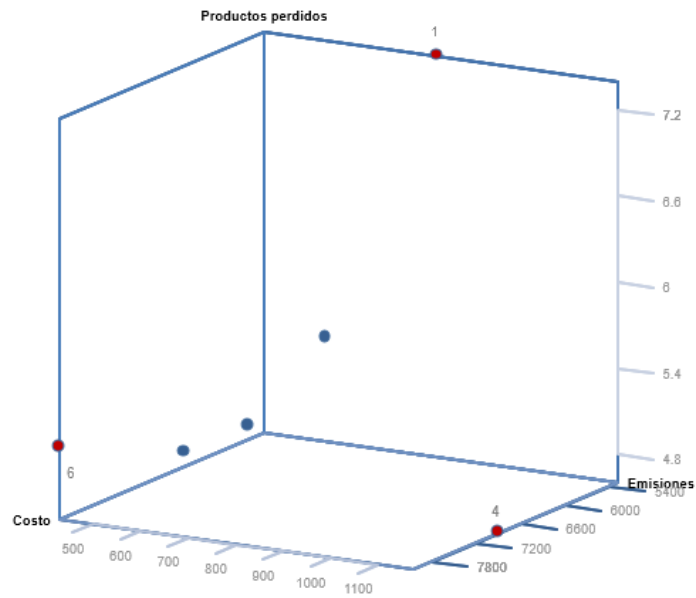


Figura 24: Soluciones resultantes con la metodología 3

A continuación, se muestra la configuración de la cadena de abastecimiento de la soluciones 4 y 6 y la configuración de la solución 1, que corresponden a la Figura 8:

Solución 4: Menor cantidad de productos perdidos:
 Costo: 8,046 UM
 Emisiones CO₂: 430
 Cantidad de Productos Perdidos: 5.1

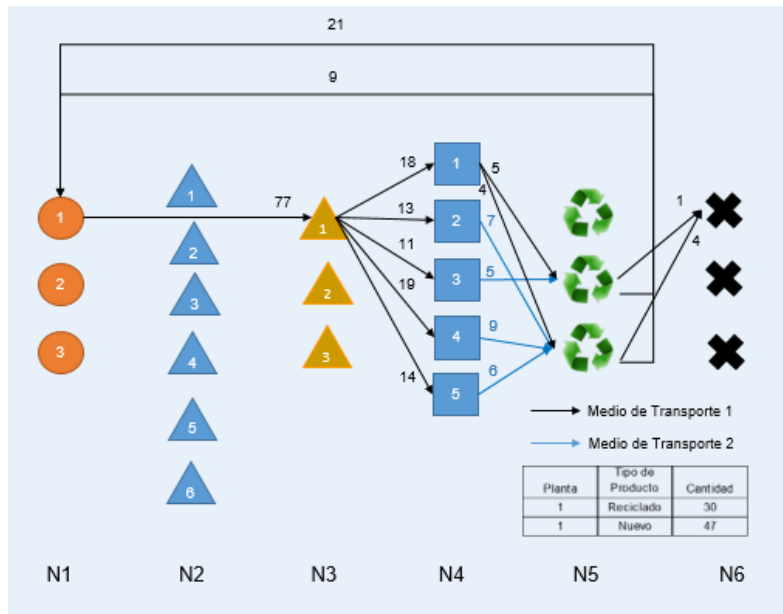


Figura 25: Solución 4 - Metodología 2.2

Solución 4: Menor cantidad de productos perdidos:

Costo: 6,887 UM

Emissiones CO₂: 1,174

Cantidad de Productos perdidos: 4.6

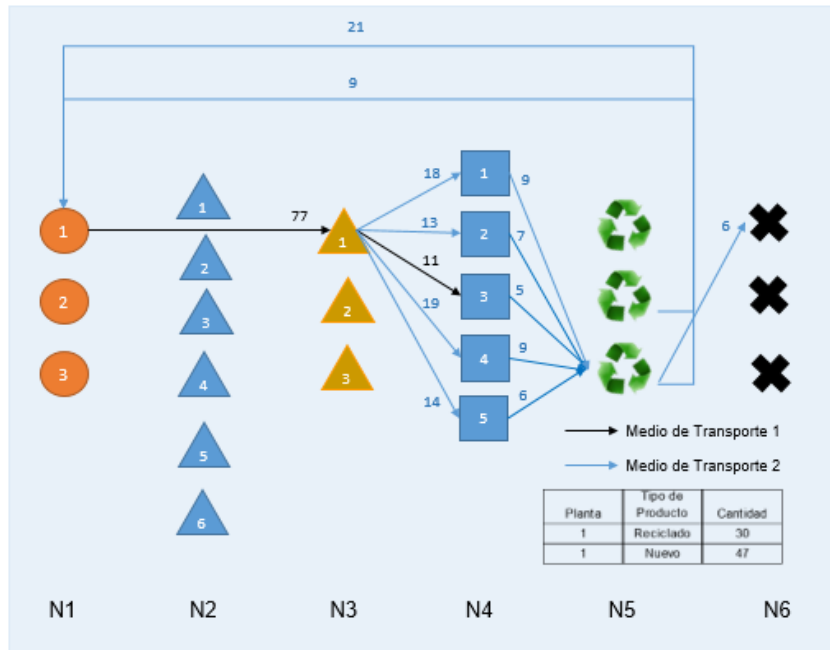


Figura 26: Solución 6 - Metodología 2.2

6.2.3 Comparación métodos basados en optimización vía simulación

Se presenta a continuación el siguiente resumen dados los resultados del desarrollo de los métodos anteriores:

Método	Instancia	C. Producción	C. Distribución	Minoristas	Clientes	C. Reciclaje	C. Destrucción	Indicador		
								Espaciamiento	Hipervolumen	Tiempo (Segundos)
1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación	1	3	3	3	5	3	3	848	1.27E+08	134,136
	2	6	3	3	5	3	3	363	1.22E+08	149,281
	3	3	6	3	5	3	3	433	1.12E+08	148,241
	4	3	3	6	5	3	3	697	1.44E+08	151,875
	5	3	3	3	5	3	3	1,025	9.68E+07	140,720
	6	3	3	3	10	3	3	1,003	3.40E+07	135,351
	7	3	6	3	10	3	3	1,811	8.11E+07	128,907
	8	3	3	6	10	3	3	980	8.56E+07	148,847
	9	3	3	3	10	6	3	1,232	1.26E+07	146,066
	10	3	6	3	10	3	6	1,429	6.65E+07	141,713
1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización	1	3	3	3	5	3	3	1,760	3.37E+08	61,594
	2	6	3	3	5	3	3	1,742	5.59E+07	51,342
	3	3	6	3	5	3	3	384	8.40E+07	56,922
	4	3	3	6	5	3	3	1,466	6.15E+08	56,799
	5	3	3	3	5	3	3	402	2.07E+08	63,935
	6	3	3	3	10	3	3	2,287	7.12E+07	60,460
	7	3	6	3	10	3	3	912	4.76E+07	52,667
	8	3	3	6	10	3	3	2,167	8.31E+07	60,631
	9	3	3	3	10	6	3	2,176	6.59E+07	60,487
	10	3	6	3	10	3	6	1,529	6.90E+08	56,189

Tabla 25: Comparación indicadores métodos optimización vía simulación

En la tabla anterior, se encuentra que el segundo método presenta, en general, un espaciamiento de aproximadamente el 51 % más alto que el primero. Esto debido a que la búsqueda de soluciones allí no tiene una referencia para moverse dentro de la frontera de Pareto, contrario al primer método.

Similar al método exacto para estos dos desarrollos, el hipervolumen tiene un valor mayor en instancias de menor cantidad de nodos, lo que permite concluir que tiene soluciones lejanas al valor de referencia.

Respecto al tiempo computacional, el método 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación representa una mayor demanda de tiempo al ser aproximadamente 2.4 veces más que 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización.

Para ver el detalle de las soluciones por cada instancia- iteración ver el Anexo 2 (página 67)

A continuación, se muestran gráficamente los promedios obtenidos por indicador para cada una de las metodologías propuestas de optimización-simulación:

M1: 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación

M2: 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización

Hipervolumen:

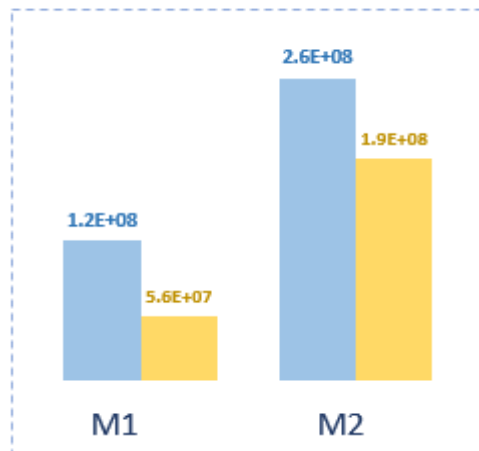


Figura 27: Promedio de hipervolumen (método de optimización y simulación)

Espaciamento:

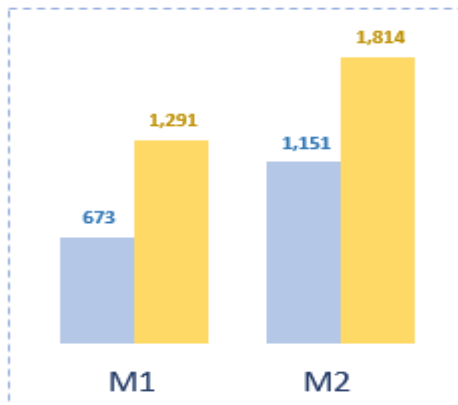


Figura 28: Promedio de espaciamento (método de optimización y simulación)

Tiempo (segundos):

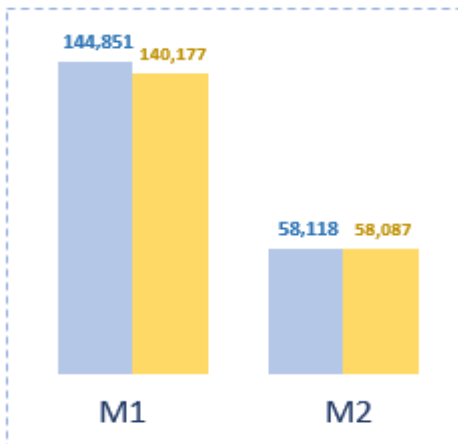


Figura 29: Promedio de tiempo (Método de optimización y simulación)

7 Conclusiones y futuras investigaciones

7.1 Conclusiones

Este trabajo analizó dos metodologías de diseño de cadena de abastecimiento a través de distintas técnicas. El método exacto genera buenos resultados a nivel funcional: la frontera de Pareto allí encontrada para cada una de las instancias permite visualizar un gran conjunto de soluciones. Sin embargo, aunque se presentan numerosas opciones no se garantiza que estas sean estadísticamente distintas al ser un método que no considera parámetros aleatorios. Por lo tanto, se estudió la cooperación de métodos de optimización y simulación, con el fin de acotar el conjunto de soluciones y permitir al tomador de decisiones escoger entre estas configuraciones la más conveniente. Los resultados computacionales muestran que el método reduce la cantidad de soluciones al 40 % por no ser estadísticamente diferentes.

La aplicación de simulación en la búsqueda y evaluación del desempeño de soluciones resulta de gran utilidad, lo que permite incluir la incertidumbre de los parámetros y aproximar la medición de la variabilidad a comportamientos reales en las compañías.

De acuerdo a las preguntas de investigación planteadas, en el caso de la primera pregunta, se puede afirmar que realizar un diseño de la cadena de abastecimiento que tenga un desempeño eficaz y eficiente considerando factores de sostenibilidad y riesgo puede lograrse a través de la modelación y del uso de herramientas convencionales como lo es la optimización y la simulación. El mayor impacto en este trabajo fue la combinación de estas dos, lo cual permitió obtener soluciones robustas y metodologías de interés investigativo. Para el caso de la segunda pregunta de investigación, se definen las siguientes ventajas y desventajas de los métodos desarrollados:

Ventajas:

- Estos métodos, al combinar e integrar la simulación en su desarrollo, permiten obtener escenarios más probables y cercanos a la representación de una industria real.
- La ventaja del método **1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación, 3.º Fase: Optimización** es permitir al analista buscar una solución robusta, puesto que a través de los límites en las restricciones sabrá hacia qué dirección encaminar sus posibles soluciones.
- La principal ventaja del método **1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación** es que cuenta con varias soluciones iniciales; sin embargo, se debe ser cuidadoso y analítico para seleccionar las configuraciones a simular. Esto con el fin de evitar hacer demasiadas simulaciones que resulten ser estadísticamente iguales.

Desventajas:

- Para ninguno de los dos métodos se garantiza que las soluciones a simular no sean dominadas, dado que esto depende de los intervalos de confianza y el error máximo permitido, por lo que lo más recomendable es escoger soluciones que no se encuentren muy cercanas.
- Las corridas de simulación para las configuraciones resultantes del método exacto son demoradas; tardan en promedio 40 horas para la primera técnica. Lo recomendable aquí es reducir la cantidad

de corridas y analizar previamente qué soluciones son de interés a simular de acuerdo a las propiedades. De esta manera, el tiempo computaciones se reduce a dos horas, es decir, el 40 % de inversión del tiempo.

- El método Fase: **Optimización**, 2.º Fase: **Simulación**, 3.º Fase: **Optimización** al no tener una referencia de puntos en la frontera de Pareto, dificulta conocer si una de las soluciones obtenidas es mejor que otras, puesto que para esto requeriría de un mayor número de simulaciones.

Por último, se destaca que el presente trabajo se presentó en un congreso internacional. La cita del trabajo presentado es la siguiente:

Sotelo, L., Guerrero, W.J., Romero-Motta, E. (2016) Diseño de cadenas de abastecimiento no jerárquicas con métodos de solución multiobjetivo bajo principios de sostenibilidad y riesgo. Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa CLAIO 2016. 2-6 de octubre, Santiago de Chile, Chile.

7.2 Futuras investigaciones

Las futuras investigaciones pueden incluir modelos y métodos de solución para cadenas de abastecimiento multiobjetivo con niveles jerárquicos y multiproducto a lo largo de la cadena, considerando su proceso de transformación. Asimismo, se pueden incluir los contextos de múltiples periodos, dado que es común tener comportamientos estacionales en distintas industrias. Además, se puede agregar la inclusión de otras métricas de riesgo, tales como el riesgo financiero y de sostenibilidad social. De la misma manera, se pueden investigar en el futuro los métodos de optimización de tipo metaheurístico.

BIBLIOGRAFÍA

- Pettit, T., Croxton, K., & Fiksel, J. (2013). Ensuring Supply Chain Resilience: Development and Implementation of an Assessment Tool. *Journal of Business Logistics*, 34, 46–76.
- Almaraz, S. D.-L., Azzaro-Pantel, C., Montastruc, L., Pibouleau, & Baez Senties, O. (2012). Design of an hydrogen supply chain using multiobjective optimization. *Computer Aided Chemical Engineering*, 30, 292–296.
- Amin, S. H., & Zhang, G. Z. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications*, 39, 6782–6791.
- Arntzen, B., Brown, G., Harrison, T., & Trafton, L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 69 - 93.
- Azaron, A., Brown, K., Tarim, S., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116, 129–138.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro*. Mexico: Pearson Education.
- BD. (2017, Julio). *Business Dictionary*. Retrieved from <http://www.businessdictionary.com/definition/risk.html>
- Beamon, B. (1998). Supply chain design and analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics*, 55, 281–294.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. ,, & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233, 299–312.
- Bringmann, K., & Friedrich, T. (2009). Don't be Greedy when Calculating Hypervolume Contributions. *FOGA*, 103–112.
- Cambridge University. (2011). *Optimization concepts and applications*. Cambridge: Pretinzel Hall.
- Carle, M., Martel, A., & Zufferey, N. (2012). The CAT metaheuristic for the solution of multi-period activity-based supply chain network design problems. *International Journal of Production Economics*, 139, 664-677.
- Carson, Y. (1997). *Simulation and optimization: methods and applications*. New York: State University of New York at Binghamton.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2004). *Supply Chain Management*. (Segunda ed.). Pretince-Hall.
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. (1987). *Our Common Future*. Gathering a body of global agreements.
- Craighead, C., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M., & Handfield, R. (2007). The Severity of Supply Chain Disruptions: Design Characteristics and Mitigation Capabilities. *Decision Sciences*, 38, 131–156.
- Deb, K., Thiele, L., Laumanns, M., & Zitzler, E. (2002). Scalable MultiObjective Optimization Test Problems. *Congress on Evolutionary Computation*, 825–830.
- Dittmann, J. P. (2014). *Managing Risk in the Global Supply Chain*. Tennessee: University of Tennessee.
- Dong, M. (2006). Development of supply chain network robustness index. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 1, 54 - 66.
- Easwaran, G., & Üster, H. (2010). A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions. *IIE Transactions*, 42, 779–792.
- El Economista. (2014, Noviembre). *Infoautónomos*. Retrieved from ¿Qué es una empresa sostenible y por qué te beneficia aplicarlo a tu negocio?: <http://infoautonomos.eleconomista.es/blog/que-es-una-empresa-sostenible-y-por-que-te-beneficia-aplicarlo-tu-negocio/>
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58, 423–431.

- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, *54*, 11–32.
- Fonseca, C., Paquete, L., & López-Ibáñez, M. (2006). An Improved Dimension-Sweep Algorithm for the Hypervolume indicator. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1157–1163.
- Gabriella, D., Meloni, C., & Pierreval, H. (2014). Simulation-Optimization of Complex Systems: Methods and Applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *46*, 1–3.
- Goh, M., Lim, J., & Meng, J. (2007). A stochastic model for risk management in global supply chain networks. *European Journal of Operational Research*, *182*, 164-173.
- Gong, J., Mitchell, J., Krishnamurthy, A., & Wallace, W. (2014). An interdependent layered network model for a resilient supply chain. *Omega*, *46*, 104–116.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, *240*, 603–626.
- Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, *1*, 359-370.
- Guide, D., & Van Wassenhove, L. (2009). The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research*, *57*, 10-18.
- Hamed, S., & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. *Kannan Govindan*, *237*, 487-497.
- Huerta-Barrientos, A., Elizondo-Cortés, M., & Flores de la Mota, I. (2014). Analysis of scientific collaboration patterns in the co-authorship network of Simulation–Optimization of supply chains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *46*, 135–148.
- Ingeniería Industrial Online. (2017). *Ingeniería Industrial Online*. Retrieved from <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/investigaci%C3%B3n-de-operaciones/programaci%C3%B3n-lineal/>
- Jindal, A., & Sangwan, K. (2016). Multi-objective fuzzy mathematical modelling of closed-loop supply chain considering economical and environmental factors. *Annals of Operations Research*, 1-26.
- Juan, A., Faulin, J., Grasmanc, S., Rabe, M., & Figueira, G. (2015). A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic. *Operations Research Perspectives*, *2*, 62-72.
- Kannan, G., Sasikumar, P., & Devika, K. (2012). A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling. *Applied Mathematical Modelling*, *34*, 655–670.
- López, J. (2013). *Optimización multiobjetivo: aplicaciones a problemas del mundo real*. Universidad Nacional de la Plata.
- Marler, R., & Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization. *Struct Multidisc Optim*, *26*, 369-395.
- Mathematical Programming Glossary. (2017, Julio). *The Nature of Mathematical Programming*. Retrieved from The Nature of Mathematical Programming
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, *213*, 455–465.
- Meixell, M. J., & Gargeya, V. B. (2005). Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *41*, 531–550.
- Metta, H., & Badurdeen, F. (2011). Optimized closed-loop supply chain configuration selection for sustainable product designs. *IEEE*, 438–443.
- Minitab. (2017). *Minitab Support*. Retrieved from <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/multiple-comparisons/what-is-tukey-s-method/>
- Montoya-Torres, J. R. (2015). Designing Sustainable Supply Chains Based on the Triple Bottom Line Approach. *Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT 2015)* (pp. 1-6). Valenciennes, Francia: IIE Publishing.

- Mota, B., Gomes, M., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. (2015). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27.
- MST. (2017, Julio). MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. Missouri, Estados Unidos.
- Nooraie, V., & Mellat Parast, M. (2015). A multi-objective approach to supply chain risk management: Integrating visibility with supply and demand risk. *International Journal of Production Economics*, 161, 192-200.
- Oberkamp, W., DeLand, S., Rutherford, B., Diegert, K., & Alvin, K. (2002). Error and uncertainty in modeling and simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 75, 333–357.
- Pan, F., & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research*, 37, 668–683.
- Pishvae, M., Razmi, J., & Torabi, S. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*(206), 1-20.
- Pishvae, S., Razmi, J., & Torabi, S. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 624-632.
- Pllana, S. (2000, Agosto). <http://www.geocities.com/CollegePark/Quad/2435/index.html>. Retrieved from <http://www.geocities.com/CollegePark/Quad/2435/index.html>
- PrasannaVenkatesan, S., & Kumanan, S. (2012). Multi-objective supply chain sourcing strategy design under risk using PSO and simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61, 325-337.
- Quariguasi Frota Neto, J., Bloemhof-Ruwaard, J., van Nunen, J., & van Heck, E. (2006). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *Int. J. Production Economics*, 111, 195–208.
- Ramezani, M., Karimi, B., Hejazi, T., & Kimiagari, A. (2014). Closed-loop supply chain network design under a fuzzy environment. *Knowledge-Based Systems*, 59, 108-120.
- Rezapour, S., Farahani, R., Fahimnia, B., Govindan, K., & Mansouri, Y. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. *Journal of Cleaner Production*, 93, 251-272.
- Robinson, S. (2014). Defining Simulation: What, Why and When? In R. Stewart, *Simulation: The Practice of Model Development and Use* (Segunda ed., pp. 2-18). Nueva York: Palgrave Macmillan.
- Ruiz-Femenia, R., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., & Caballero, J. (2013). Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 95, 1-11.
- Sabri, E. H., & Beamon, B. M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581–598.
- Sahin, F., & Robinson, E. (2002). Flow coordination and information sharing in supply chains: Review, implications and directions for future research. *Decision Science*, 33, 505 - 536.
- Schott, J. R. (1995). *Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization*. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2000). Introduction to Supply Chain Management. In D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, & E. Simchi-Levi, *Designing and Managing the Supply Chain* (p. 9). McGraw-Hill.
- Simio. (2017, Julio). *Simio.com*. Retrieved from <https://www.simio.com/applications/>
- Subulan, K., Baykasoğlu, A., Özsoydan, F. B., Taşan, A. S., & Selim, H. (2014). A case-oriented approach to a lead/acid battery closed-loop supply chain network design under risk and uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*.
- Technische Universität Dortmund. (2015). *Department of Computer Science*. Retrieved from <https://ls11-www.cs.uni-dortmund.de/rudolph/hypervolume/start>

- The Institute of Internal Auditors. (2013). *Definición e implantación de apetito de riesgo*. Madrid: La fábrica de pensamiento.
- Trkman, P., & McCormack, K. (2009). Supply chain risk in turbulent environments—A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal of Production Economics*, 119, 247–258.
- Tuncel, G., & Alpan, G. (2010). Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. *Computers in Industry*, 61, 250-259.
- Tzafestas, S., & Kapsiotis, G. (1994). Coordinated control of manufacturing/supply chains using multi-level techniques. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7, 206–212.
- Universidad Técnica Federico Santa María. (2017). *Universidad Técnica Federico Santa María*. Retrieved from Optimalidad de Pareto: <https://www.inf.utfsm.cl/~mcriff/IO2/node4.html>
- Vargas, F., & Montoya, J. (2008). Implementación de un procedimiento basado en algoritmos evolutivos para programar la producción de marquillas estampadas por transferencia térmica. *Ingeniería y Universidad*, 12(2), 269-299.
- Xiaoyuan Lu, L., & Swaminathan, J. (2015). Supply Chain Management. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)*, 709–713.
- Yang, G., Liu, Y., & Yang, K. (2015). Multi-objective biogeography-based optimization for supply chain network design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 145-156.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1998). Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study. *Lecture Notes in Computer Science*, 292–304.

Anexos

1. Parametrización de las simulaciones

Costos:

		Media	Min	Max
Trayecto con el tipo de vehículo I	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	0.17	0.12	0.22
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	0.17	0.12	0.22
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	0.17	0.12	0.22
	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	0.17	0.12	0.22
	C. Reciclaje (N5) -C. Destrucción (N6)	0.17	0.12	0.22
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	0.17	0.12	0.22
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	0.17	0.12	0.22
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	0.17	0.12	0.22
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	0.17	0.12	0.22
Trayecto con el tipo de vehículo II	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	0.24	0.18	0.29
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	0.24	0.18	0.29
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.18	0.29
	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	0.24	0.18	0.29
	C. Reciclaje (N5) -C. Destrucción (N6)	0.24	0.18	0.29
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	0.24	0.18	0.29
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.18	0.29
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.18	0.29
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	0.24	0.18	0.29
Uso C. Distribución (N2)	0.10	0.05	0.15	
Uso Retail (N3)	0.06	0.03	0.09	
Producto Reciclado	0.04	0.02	0.05	
Producto Nuevo	0.09	0.08	0.10	

Emissiones CO₂

		Media	Min	Max
Trayecto con el tipo de vehículo I	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	0.32	0.30	0.345
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	0.24	0.20	0.285
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	0.32	0.30	0.345
	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	0.24	0.20	0.285
	C. Reciclaje (N5) -C. Destrucción (N6)	0.32	0.30	0.345
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	0.24	0.20	0.285
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	0.32	0.30	0.345
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.20	0.285
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	0.32	0.30	0.345
Trayecto con el tipo de vehículo II	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	0.24	0.20	0.285
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	0.32	0.30	0.345
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.20	0.285

	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	0.32	0.30	0.345
	C. Reciclaje (N5) -C. Destrucción (N6)	0.24	0.20	0.285
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	0.32	0.30	0.345
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	0.24	0.20	0.285
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	0.32	0.30	0.345
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	0.24	0.20	0.285
	Uso C. Distribución (N2)	0.10	0.13	0.10
	Uso Retail (N3)	0.06	0.13	0.10
	Producto Reciclado	0.04	1.25	1.00
	Producto Nuevo	0.09	2.25	2.00

Proporciones de perdida:

Costo		Media	Min	Max
Trayecto con el tipo de vehículo I	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	3 %	1 %	4 %
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	5 %	4 %	6 %
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	3 %	2 %	4 %
	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	2 %	1 %	3 %
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	3 %	1 %	4 %
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	8 %	6 %	9 %
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	7 %	6 %	7 %
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	7 %	6 %	7 %
Trayecto con el tipo de vehículo II	C. Producción (N1)- C. Distribución (N2)	3 %	1 %	4 %
	C. Distribución (N2)- Retail (N3)	5 %	4 %	6 %
	Retail (N3)- Cliente (N4) (N3)	3 %	2 %	4 %
	Cliente (N4) (N3)- C. Reciclaje (N5)	2 %	1 %	3 %
	C. Reciclaje (N5) -C. Producción (N1)	3 %	1 %	4 %
	C. Producción (N1)- Cliente (N4) (N3)	8 %	6 %	9 %
	C. Distribución (N2)- Cliente (N4) (N3)	7 %	6 %	7 %
	C. Producción (N1)- Retail (N3)	7 %	6 %	7 %

Proporción esperada de productos que van desde los clientes a centros de recolección y de destrucción

	Media	Min	Max
α_j	50 %	40 %	60 %
β_k	88 %	80 %	95 %

2. Detalle de soluciones por instancia

2.1 Método 1: 1.º Fase: Optimización, 2.º Fase: Simulación

Instancia	Solución	Número de Iteraciones	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Solución Final
			Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	
1	1	28	5,507.3	± 151.1	861.5	± 4.5	5.8	± 0.3	
	2	59	8,526.6	± 148.9	425.9	± 3.1	7.5	± 0.4	
	3	96	6,610.7	± 79.2	896.3	± 1.9	3.9	± 0.2	
	4	18	5,600.4	± 152.7	857.4	± 5	7.5	± 0.4	
	5	8	5,891.4	± 255.2	765.2	± 6.1	6.6	± 0.3	
	6	10	5,982.8	± 295.8	664.0	± 4.3	6.7	± 0.3	
	7	43	6,035.0	± 127.5	546.6	± 2	5.3	± 0.3	X
	8	84	8,771.8	± 152.9	417.9	± 2.1	4.7	± 0.2	X
	9	96	6,610.7	± 79.2	873.5	± 2	3.9	± 0.2	X
	10	45	6,103.2	± 115.9	681.9	± 2.9	4.9	± 0.2	
2	1	8	5,337.7	± 194.3	930.6	± 7.5	8.8	± 1.7	
	2	7	5,663.0	± 207.5	844.2	± 7.5	9.7	± 1.7	X
	3	14	6,229.3	± 681.8	928.7	± 21.5	10.6	± 1.3	
	4	8	5,319.6	± 153.3	929.7	± 4.8	9.1	± 0.4	
	5	7	5,648.0	± 191.1	839.8	± 4.3	9.5	± 0.3	X
	6	19	6,212.8	± 669.2	923.8	± 21.7	10.5	± 1.1	X
	7	29	6,553.0	± 122.1	639.7	± 5.9	7.2	± 0.4	X
	8	56	5,601.1	± 115.2	904.2	± 2.9	6.7	± 0.2	X
	9	25	5,637.3	± 172.9	835.3	± 6.1	7.9	± 0.9	
	10	25	5,607.9	± 160	836.1	± 3.5	7.6	± 0.4	
3	1	7	5,886.2	± 247.9	733.0	± 3.3	7.3	± 0.3	
	2	16	6,809.4	± 204.6	509.8	± 5.7	7.5	± 0.4	X

Instancia	Solución	Número de Iteraciones	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Solución Final
			Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	
	3	36	5,683.5	± 154.4	834.0	± 2.9	4.1	± 0.2	
	4	7	5,442.0	± 225.9	861.7	± 5.4	7.4	± 0.3	
	5	77	5,826.2	± 115.3	734.9	± 2.2	4.1	± 0.2	
	6	88	5,861.2	± 87.5	657.8	± 2.8	4.4	± 0.2	X
	7	14	6,951.8	± 241.9	509.3	± 6.6	7.7	± 0.4	
	8	33	5,820.5	± 119.9	735.9	± 3.7	6.3	± 0.3	
	9	65	6,295.1	± 118.6	586.0	± 3.3	4.6	± 0.2	X
	10	65	6,290.4	± 123.9	585.9	± 3.4	4.6	± 0.2	
4	1	7	14,094.0	± 311.4	1,185.0	± 4.6	19.0	± 0.8	
	2	40	17,432.1	± 344.6	906.5	± 4.6	15.4	± 0.8	X
	3	62	17,150.7	± 244.7	1,566.9	± 4.7	8.1	± 0.4	X
	4	7	12,546.7	± 189	1,577.6	± 10.3	16.2	± 0.8	
	5	11	13,291.6	± 359.6	1,430.9	± 12.9	14.2	± 0.7	X
	6	91	13,146.2	± 656	1,327.9	± 3.2	11.4	± 0.3	X
	7	65	15,496.2	± 126.3	1,199.2	± 4.6	9.4	± 0.4	X
	8	96	18,742.3	± 250.4	1,053.5	± 3.1	7.9	± 0.4	X
	9	30	16,543.6	± 327.4	906.0	± 6	18.5	± 0.9	X
	10	8	15,139.1	± 721.8	1,046.2	± 13.1	15.5	± 0.7	X
5	1	30	15,320.2	± 367.3	791.8	± 2.4	13.6	± 0.4	X
	2	100	15,279.1	± 138.2	1,374.0	± 2.4	7.9	± 0.4	X
	3	9	18,576.9	± 903.4	674.4	± 8.7	16.8	± 0.5	
	4	10	13,151.4	± 348.8	1,269.4	± 7.8	15.4	± 0.7	X
	5	16	14,516.7	± 436.9	1,233.2	± 8.1	14.8	± 0.7	
	6	19	14,644.4	± 419.1	1,032.3	± 4.9	12.2	± 0.6	
	7	44	15,330.6	± 299.9	882.1	± 3.5	10.9	± 0.5	
	8	61	16,107.9	± 236.5	807.8	± 3	11.0	± 0.4	X

Instancia	Solución	Número de Iteraciones	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Solución Final
			Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	
	9	52	14,563.7	± 253.7	1,015.3	± 19.2	12.4	± 0.5	
	10	52	14,389.8	± 252.4	885.3	± 2.9	10.4	± 0.5	X
6	1	15	6,094.4	± 234	666.2	± 5.7	6.8	± 0.3	
	2	9	8,243.7	± 356.1	334.4	± 5.7	7.2	± 0.3	
	3	90	5,873.5	± 102.2	765.6	± 1.8	3.0	± 0.1	X
	4	7	6,085.8	± 249.9	743.3	± 6.2	8.0	± 0.3	
	5	37	5,817.1	± 134.6	658.2	± 3.2	5.9	± 0.3	X
	6	96	6,076.2	± 90.8	607.0	± 1.9	3.8	± 0.1	
	7	100	8,254.4	± 167.2	334.3	± 1.5	3.9	± 0.2	X
	8	42	6,072.7	± 173.1	556.9	± 2.8	6.7	± 0.3	
	9	37	6,709.2	± 219.8	461.0	± 3.2	5.1	± 0.3	X
	10	42	5,924.8	± 173.8	557.1	± 2.7	5.7	± 0.3	X
7	1	62	7,425.4	± 92.8	778.6	± 6.6	7.3	± 0.3	X
	2	29	7,654.8	± 61.7	681.9	± 6.6	7.4	± 0.3	X
	3	60	7,812.2	± 124.2	697.0	± 8.8	7.1	± 0.1	X
	4	40	7,570.5	± 150.3	766.6	± 28.2	7.1	± 0.2	
	5	40	7,834.3	± 115.3	628.6	± 14	7.5	± 0.1	
	6	20	8,106.6	± 125.2	728.2	± 36.9	6.9	± 0.2	
	7	47	7,908.7	± 63	666.7	± 7.8	7.4	± 0.2	X
	8	20	7,612.6	± 212.4	659.8	± 37.6	7.9	± 0.2	X
	9	40	8,138.1	± 110.9	766.2	± 15.1	6.9	± 0.1	
	10	24	8,259.5	± 165	653.4	± 16.6	7.1	± 0.2	
8	1	64	7,719.8	± 27.4	675.4	± 18.1	6.2	± 0.1	
	2	65	7,937.5	± 138.4	714.1	± 18.1	5.9	± 0.1	
	3	26	7,641.3	± 216	718.0	± 9	6.6	± 0.1	
	4	25	7,984.7	± 61.9	664.2	± 18.5	6.5	± 0.1	

Instancia	Solución	Número de Iteraciones	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Solución Final
			Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	
	5	27	7,833.9	± 17.4	722.0	± 9.7	5.9	± 0.2	
	6	58	7,537.4	± 49.7	660.4	± 8	7.5	± 0.3	X
	7	68	7,983.0	± 91.3	708.4	± 25.7	5.4	± 0.2	
	8	21	8,219.4	± 165.8	657.8	± 9.5	6.4	± 0.3	
	9	34	8,022.8	± 143.8	657.8	± 15.9	6.2	± 0.1	X
	10	49	7,722.1	± 86.7	706.7	± 3.8	6.0	± 0.2	X
9	1	23	7,737.5	± 297.7	670.7	± 27.8	8.9	± 0.3	
	2	32	7,723.6	± 324.7	703.6	± 23.9	8.7	± 0.2	
	3	20	7,608.1	± 295.7	777.4	± 26	8.0	± 0.1	X
	4	65	7,616.3	± 190.1	695.8	± 13.3	8.8	± 0	
	5	48	7,816.7	± 191.1	686.9	± 13.7	8.3	± 0.2	
	6	22	8,075.9	± 351.4	714.2	± 26.8	8.1	± 0.1	
	7	40	7,960.3	± 190.2	710.1	± 19	8.7	± 0.2	
	8	71	8,116.4	± 123.8	670.0	± 15.4	8.6	± 0.1	X
	9	37	7,823.5	± 265.6	716.5	± 15.2	8.0	± 0.2	X
	10	69	8,363.1	± 227.7	668.1	± 12.1	9.1	± 0.1	X
10	1	23	8,780.5	± 297.7	701.7	± 23.9	5.8	± 0.2	
	2	32	7,281.5	± 324.7	589.5	± 23.9	6.5	± 0.2	
	3	20	8,546.4	± 295.7	709.4	± 26	5.9	± 0.1	X
	4	65	8,522.0	± 190.1	745.1	± 13.3	5.9	± 0.1	
	5	48	7,280.1	± 191.1	747.6	± 13.7	6.1	± 0.2	X
	6	22	8,493.9	± 351.4	721.8	± 26.8	5.9	± 0.1	
	7	40	8,852.9	± 190.2	585.4	± 19	5.5	± 0.2	
	8	71	8,491.6	± 123.8	746.4	± 15.4	5.8	± 0.1	
	9	37	7,161.3	± 265.6	719.1	± 15.2	6.4	± 0.2	X
	10	69	8,352.8	± 227.7	710.8	± 12.1	5.9	± 0.1	

2.21° Fase: Optimización, 2° Fase: Simulación, 3° Fase Optimización

Instancia	Solución	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Restricciones		Solución Final
		Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Emisiones	Perdidos	
1	1	5,507.3	± 151.1	861.5	± 4.5	5.8	± 0.3	NA	NA	X
	2	6,114.6	± 143.2	583.9	± 2.4	5.2	± 0.2	< 590	< 5.6	X
	3	5,868.6	± 197.4	851.7	± 2.5	4.9	± 0.3	< 860	< 5.4	
	4	8,500.7	± 167.0	426.4	± 1.6	5.0	± 0.4	< 450	< 5.2	X
	5	6,263.0	± 127.9	657.9	± 2.8	4.3	± 0.3	< 700	< 4.6	X
	6	5,701.8	± 334.8	654.1	± 3.6	6.3	± 0.2	< 660	NA	X
2	1	5,319.6	± 153.3	929.7	± 4.8	9.1	± 0.4	NA	NA	X
	2	5,528.5	± 169.6	869.6	± 7.3	8.3	± 0.8	< 900	< 9.1	X
	3	5,432.9	± 218.9	941.2	± 5.3	8.6	± 0.2	NA	< 8.8	
	4	5,464.1	± 151.6	820.2	± 3.8	9.4	± 0.6	< 850	NA	
	5	5,727.0	± 130.3	889.6	± 2.8	7.0	± 0.5	< 900	< 7.5	
	6	5,874.3	± 174.3	812.9	± 6.6	7.1	± 0.5	< 825	< 8.0	X
3	1	5,442.0	± 225.9	861.7	± 5.4	7.4	± 0.3	NA	NA	X
	2	5,716.4	± 247.6	727.9	± 2.7	7.4	± 0.3	< 750	NA	X
	3	5,755.3	± 123.1	835.1	± 3.0	4.2	± 0.2	< 850	< 4.5	X
	4	5,846.8	± 95.5	736.6	± 2.4	4.2	± 0.2	< 750	< 4.5	
	5	5,912.1	± 81.2	658.3	± 2.8	4.4	± 0.1	< 700	< 4.7	X
	6	6,224.5	± 198.5	582.1	± 3.9	4.5	± 0.2	< 600	< 5.2	X
4	1	12,546.7	± 189.0	1,577.6	± 10.3	16.2	± 0.8	NA	NA	X
	2	13,668.5	± 254.0	1,205.7	± 9.9	15.1	± 0.8	< 1,250	NA	
	3	13,047.1	± 544.9	1,203.9	± 13.1	14.1	± 1.0	< 1,300	< 15.5	X
	4	12,813.1	± 683.3	1,339.3	± 4.5	11.5	± 0.6	< 1,400	< 12.2	X

Instancia	Solución	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Restricciones		Solución Final
		Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Emisiones	Perdidos	
	5	13,760.0	± 488.2	1,334.7	± 7.3	10.5	± 0.6	< 1,350	< 11.0	
	6	15,461.1	± 867.4	1,060.9	± 12.7	15.4	± 0.9	< 1,100	< 16.0	X
5	1	13,151.4	± 348.8	1,269.4	± 7.8	15.4	± 0.7	NA	NA	X
	2	14,878.8	± 392.2	808.5	± 5.2	13.0	± 0.5	< 850	< 13.9	X
	3	13,263.9	± 430.9	1,159.9	± 8.1	14.6	± 0.7	< 1,200	NA	
	4	14,485.6	± 603.2	1,087.2	± 5.6	13.5	± 0.6	< 1,100	< 13.5	
	5	13,267.7	± 236.6	1,135.7	± 14.6	14.0	± 0.8	< 1,150	< 14.5	X
	6	14,873.4	± 398.2	906.2	± 4.2	9.9	± 0.6	< 950	< 11	X
6	1	5,817.1	± 134.6	658.2	± 3.2	5.9	± 0.3	NA	NA	X
	2	6,430.1	± 164.8	596.5	± 4.9	6.3	± 0.3	< 650	NA	
	3	6,227.8	± 105.7	806.1	± 6.6	3.1	± 0.2	NA	< 3.5	X
	4	6,346.0	± 48.6	640.4	± 2.9	3.9	± 0.3	< 650	< 4.5	X
	5	6,427.5	± 197.4	597.1	± 2.7	5.7	± 0.2	< 600	< 5.9	
	6	6,009.9	± 155.7	603.4	± 2.7	5.5	± 0.3	< 650	< 5.9	X
7	1	7,425.4	± 92.8	778.6	± 6.6	7.7	± 0.3	NA	NA	X
	2	7,667.1	± 60.1	683.1	± 9.2	7.6	± 0.3	< 700	NA	X
	3	7,767.7	± 151.9	702.9	± 11.4	7.2	± 0.1	< 720	< 7.4	
	4	7,460.6	± 177.0	766.0	± 17.5	6.9	± 0.2	NA	< 7.2	X
	5	8,049.2	± 159.6	729.3	± 34.3	6.9	± 0.1	< 750	< 7.0	
	6	7,850.4	± 51.8	674.3	± 6.7	7.4	± 0.2	< 700	< 7.7	
8	1	7,537.4	± 49.7	710.4	± 8.0	7.5	± 0.3	NA	NA	X
	2	8,023.1	± 135.8	730.5	± 16.8	6.0	± 0.1	NA	< 6.3	X
	3	7,630.7	± 304.7	721.2	± 9.0	6.6	± 0.1	NA	< 6.9	X
	4	8,030.4	± 47.1	669.7	± 19.3	6.5	± 0.1	< 710	< 6.7	
	5	8,229.7	± 162.1	656.3	± 6.9	6.4	± 0.4	< 670	< 6.7	

Instancia	Solución	Costo		Emisiones		Cantidad de productos perdidos		Restricciones		Solución Final
		Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Media	Intervalo de Confianza	Emisiones	Perdidos	
	6	7,895.2	± 129.2	668.3	± 20.1	6.4	± 0.1	< 690	< 6.5	X
9	1	7,608.1	± 295.7	777.4	± 26.0	8.8	± 0.1	NA	NA	X
	2	7,903.7	± 385.6	710.6	± 17.0	8.5	± 0.2	< 730	< 8.7	
	3	7,622.5	± 139.0	697.1	± 11.5	8.9	± 0.1	< 710	NA	X
	4	8,215.7	± 247.1	711.1	± 15.4	8.1	± 0.1	< 730	< 8.2	
	5	7,834.2	± 204.0	699.8	± 20.3	8.7	± 0.2	< 700	< 8.8	
	6	7,877.5	± 262.0	716.7	± 16.7	8.0	± 0.1	< 740	< 8.1	X
10	1	7,161.3	± 265.6	719.1	± 15.2	6.4	± 0.2	NA	NA	X
	2	9,041.5	± 390.1	682.7	± 17.0	5.9	± 0.2	< 700	< 6.0	
	3	8,355.7	± 203.1	709.8	± 27.8	6.0	± 0.1	< 720	< 6.2	
	4	7,199.5	± 170.9	748.9	± 12.7	6.1	± 0.2	NA	< 6.2	
	5	8,533.8	± 404.2	740.9	± 14.3	5.9	± 0.1	NA	< 6.0	
	6	9,035.9	± 239.6	593.8	± 22.6	5.5	± 0.2	< 600	< 5.7	X