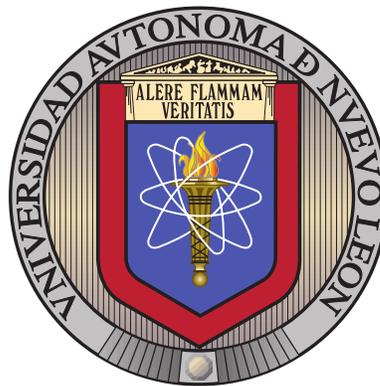


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELACIÓN DE UN PROBLEMA DE
LOCALIZACIÓN E INVENTARIO PARA UNA
CADENA DE SUMINISTRO

POR

HERNÁNDEZ GONZÁLEZ NELLY MONSERRAT

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELACIÓN DE UN PROBLEMA DE
LOCALIZACIÓN E INVENTARIO PARA UNA
CADENA DE SUMINISTRO

POR

HERNÁNDEZ GONZÁLEZ NELLY MONSERRAT

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2012

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

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Modelación de un problema de localización e inventario para una cadena de suministro», realizada por la alumna Hernández González Nelly Monserrat, con número de matrícula 1541903, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dra. Ada Margarita Álvarez Socarrás
Directora

Dr. Miguel Mata Pérez
Revisor

Dr. Pablo A. Miranda González
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2012

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, por siempre apoyarme y motivarme en cada una de las aventuras que emprendo.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	VIII
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Justificación del estudio	4
1.4. Hipótesis	6
1.5. Estructura de la tesis	6
2. Antecedentes	9
2.1. Conceptos generales	9
2.2. El problema de localización de instalaciones	10
2.3. El problema de inventarios	11
2.4. Revisión de la literatura relacionada	12
2.5. Modelos de programación lineal entera mixta	18
2.6. Modelos de programación no lineal entera mixta	20

3. Formulación del problema	22
3.1. Notación	22
3.1.1. Conjuntos	22
3.1.2. Parámetros	23
3.1.3. Variables	24
3.2. Determinación de costos esperados del sistema	25
3.2.1. Costo esperado de ordenar, transportar y mantener inventario promedio anual	25
3.2.2. Costo de inventario de seguridad.	27
3.2.3. Costo de localización.	29
3.2.4. Costo causado por la transportación del producto dentro del segundo nivel de la cadena	29
3.2.5. Costo total	29
3.3. Modelo matemático	30
3.4. Dimensiones del modelo	32
4. Metodología de solución	33
4.1. Linealización del modelo MINLP	33
4.1.1. Modelo MILP	34
4.1.2. Dimensiones del modelo	36
4.2. Reformulación del modelo MILP	37
4.2.1. Modelo BLP	39
4.2.2. Dimensiones del modelo	41

5. Experimentación	42
5.1. Evaluación de los modelos formulados	42
5.1.1. Generación de casos de prueba	43
5.1.2. Análisis de resultados	44
5.1.3. Conclusión	48
5.2. Evaluación de la configuración de red	48
5.2.1. Ejemplo de un caso de prueba evaluado en el modelo BLP . . .	49
5.2.2. Modificando los modelos propuestos	51
5.2.3. Conclusión	55
5.3. Análisis de sensibilidad	56
5.3.1. Diseño factorial	56
5.3.2. Resultados	57
5.3.3. Análisis estadístico	60
5.3.4. Comprobación de idoneidad del análisis	63
5.4. Otras estadísticas para el modelo BLP modificado	65
5.5. Efecto de múltiples plantas	67
6. Conclusiones y trabajo a futuro	70
A. Datos de caso de estudio	74
B. Resultados de bloques evaluados	76
B.1. Análisis de sensibilidad	76

B.2. Análisis de efectos de múltiples plantas	82
C. Herramientas computacionales	86
C.1. GAMS	86
C.2. GAMS/CPLEX	89
C.3. GAMS/AlphaECP	90
Bibliografía	98

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Ejemplo de una red de cadena de suministro de dos niveles	2
4.1. Asignación de estrellas	39
5.1. Caso de prueba analizado	49
5.2. Configuración de red para el caso 279	53
5.3. Gráfica de efectos principales	62
5.4. Gráfica de interacciones	63
5.5. Histograma de residuos	64
5.6. Residuos contra valores ajustados	65
5.7. Tiempo promedio para cada grupo	67

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Literatura revisada	14
5.1. Valores de los parámetros utilizados en la evaluación de los modelos. .	44
5.2. Valor objetivo para los casos de prueba	46
5.3. Número de elementos en los casos de prueba	47
5.4. Tiempo computacional de los casos evaluados	47
5.5. Asignación en el segundo nivel de la cadena	50
5.6. Asignación en el primer nivel de la cadena	51
5.7. Configuración en el segundo nivel de la cadena obtenida con el modelo BLP modificado	52
5.8. Asignación en el primer nivel de la cadena con el modelo modificado .	52
5.9. Comparación entre soluciones	54
5.10. Factores y niveles para el análisis de sensibilidad	56
5.11. Casos evaluados en diseño factorial	57
5.12. Variación de parámetros en el grupo A	59
5.13. Análisis de varianza para el modelo factorial de efectos fijos	61
5.14. Casos evaluados	65

5.15. Estadísticas del modelo BLP modificado	66
5.16. Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques A a C	69
A.1. Capacidad de plantas	74
A.2. Características de las demandas de los minoristas	74
A.3. Parámetros correspondientes a los centros de distribución	75
A.4. Parámetros definidos por los centros de distribución, al tener enlace con plantas y minoritas	75
B.1. Variación de parámetros en el grupo B	77
B.2. Variación de parámetros en el grupo C	78
B.3. Variación de parámetros en el grupo D	79
B.4. Variación de parámetros en el grupo E	80
B.5. Variación de parámetros en el grupo F	81
B.6. Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques D y E	82
B.7. Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques F a H	83
B.8. Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques I a K	84
B.9. Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques K a M	85
C.1. Tipos de modelos que GAMS puede resolver	88

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido de una u otra forma a la realización de este trabajo de investigación.

Primeramente, a Dios por llenarme de bendiciones y luz en mi camino.

A mi mayor motivación y sustento: mi familia, de manera especial a mis padres, el señor Teodoro Aristeo Hernández y la señora Guillemina González Hernández, así como a mi tía Rosalia González Hernández, de quienes he aprendido que el trabajo constante, esfuerzo y disciplina, conforman la principal herramienta para el logro del éxito. Por que su amor, cariño e incluso regaños siempre han sido encaminados a desarrollar mi potencial, a convertirme en la mejor versión de mí misma.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante todo el periodo de la maestría y con la cual fue posible cursar el posgrado.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo financiero brindado.

Al Proyecto CONACYT clave 61903 y al proyecto PAICYT-UANL clave IT533-10 por el apoyo económico brindado que me permitió la culminación de este trabajo de investigación, así como la estancia académica realizada en la Pontificia Universidad Católica de Valparaiso, Chile.

A mi comité de tesis: a la Dra. Ada Margarita Álvarez Socarrás, por brindarme su apoyo, tiempo y comprensión en el desarrollo de esta tesis. Al Dr. Miguel Mata Pérez por la orientación brindada, tanto en el aprendizaje de las herramientas

computacionales utilizadas como en los métodos de solución abordados, pero principalmente por los consejos y apoyo brindados. Al Dr. Pablo Miranda, por su atención, guía y orientación en el trabajo presentado.

A los profesores del posgrado de Posgrado de Ingeniería de Sistemas, por los conocimientos y experiencias compartidas. En especial al Dr. Óscar L. Chacón por la asesoría brindada en el área de programación no lineal.

A todos mis compañeros del posgrado que me brindaron su amistad y compartieron momentos difíciles y alegres durante el logro de esta meta trazada.

A todos ustedes, muchas gracias.

RESUMEN

Hernández González Nelly Monserrat.

Candidato para el grado de Maestro en Ingeniería
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

MODELACIÓN DE UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN E INVENTARIO PARA UNA CADENA DE SUMINISTRO

Número de páginas: 99.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: En el presente trabajo, el problema de estudio consiste en diseñar una red de cadena de suministro con un único producto con demanda estocástica, de dos niveles, con plantas, centros de distribución y minoristas. Involucra los costos por la apertura de instalaciones, costo por transportación de producto, así como el costo de mantener inventario en los centros de distribución abiertos.

Optimizar el sistema de inventarios significa que las compañías deben decidir los lugares adecuados para mantener sus productos, por ello es crucial involucrarlos

en los problemas de localización de instalaciones de almacenamiento, como centros de distribución en nuestro caso.

Para encontrar la mejor configuración de red que permita incurrir en el menor costo, se formaliza matemáticamente el problema, obteniéndose un modelo de programación no lineal entera mixta, MINLP (por sus siglas en inglés *Mixed Integer Non Linear Programming*). Este tipo de modelos, por la no linealidad generalmente son no convexos, dificultando la obtención de óptimos globales. Pero la complejidad no sólo recae en la no linealidad de las funciones involucradas, sino también en la presencia simultánea de variables discretas y continuas.

Debido a la mala calidad de las soluciones obtenidas con el modelo nos enfocamos a la búsqueda de una mejor formulación del problema. Se desarrollan dos modelos matemáticos adicionales, ambos modelos de programación lineal entera binaria. Para disminuir la complejidad de los nuevos modelos propuestos, se realiza un preprocesamiento que permite la reducción del número de variables.

Se evalúan los modelos obtenidos con el fin de definir el mejor de ellos, según su comportamiento computacional y su alcance de optimalidad. Las soluciones de cada caso de estudio fueron obtenidas por el método exacto mediante su ingreso a GAMS, *software* de modelación matemática. Una vez hecho esto, se lleva a cabo tres conjuntos de experimentos. Los objetivos de la experimentación son: evaluar la obtención de la mejor configuración de red, analizar la sensibilidad de las soluciones respecto a los parámetros propios de la cadena de suministro, conocer algunas estadísticas del modelo seleccionado y evidenciar la influencia de considerar múltiples plantas en el problema de localización e inventario.

CONTRIBUCIONES: La literatura existente relacionada a la cadena de suministro muestra un avance cada vez mayor respecto a la integración de elementos de la misma, sin embargo no encontramos alguna publicación que contara con todos los elementos que aquí se proponen. Es así que una de las aportaciones del presente

trabajo consiste en la incorporación de elementos que en conjunto no se han tratado en la literatura de cadena de suministro.

Se puede indicar como principal diferencia a los trabajos previos, la consideración de múltiples plantas, agregando a ello restricciones de único abastecimiento. Esto vuelve al problema desafiante respecto a su resolución.

La principal contribución del trabajo consiste entonces, en proponer un modelo novedoso, a un problema complejo, permitiendo la solución exacta de casos de prueba en un tiempo de cómputo razonable.

Firma del asesor: _____

Dra. Ada Margarita Álvarez Socarrás

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se describe el trabajo de tesis, haciendo mención de una breve descripción del problema, objetivo, justificación, así como la hipótesis del mismo.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El manejo de la cadena de suministro, SCM (por sus siglas en inglés *Supply Chain Management*), es el proceso de planear, implementar y controlar las operaciones de la cadena de suministro de manera eficiente. Parte del proceso de planeación en SCM consiste en encontrar la mejor configuración posible de la cadena de suministro. En adición a fijar las instalaciones, áreas como abastecimiento, producción, inventario, distribución y ruteo deben de ser consideradas.

Históricamente, los investigadores se han enfocado hasta hace relativamente poco en el diseño de sistemas de distribución, pero sin considerar la cadena de suministro como un todo. Aunque también es cierto, que se ha manifestado un creciente interés por involucrar cada vez más elementos a la toma de decisiones, integrando decisiones estratégicas, tácticas y operacionales en la planeación de cadena de suministro (ver [33, 2] y sus referencias).

El problema que se propone consiste en diseñar una red de cadena de suministro. Es una extensión del problema clásico de localización de instalaciones

capacitado de dos niveles, con plantas, centros de distribución y minoristas, tal como se muestra en la figura 1.1.

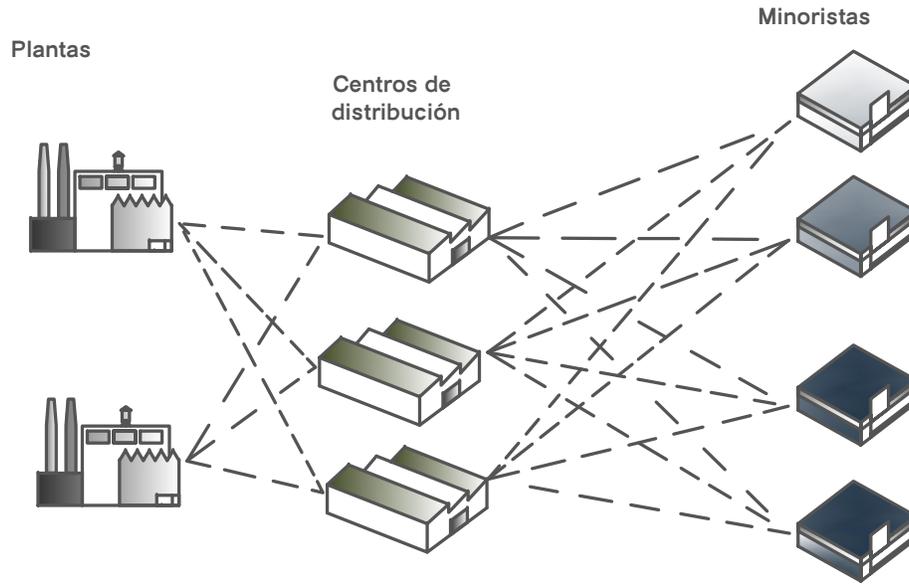


Figura 1.1: Ejemplo de una red de cadena de suministro de dos niveles

Se determinará el número adecuado de centros de distribución a abrir, al igual que su ubicación, teniendo previamente sitios potenciales. También se decidirá la asignación de los minoristas a los centros de distribución seleccionados y de estos a las plantas.

Para que la configuración de la red sea óptima se respetarán las restricciones de capacidad de plantas, asignación única y el nivel de servicio establecido para la satisfacción de la demanda, minimizando los costos ponderados por apertura de instalaciones, transportación e inventario.

En este estudio se considerarán los siguientes supuestos:

La ubicación de las plantas y los minoristas es conocida, así como la capacidad de producción de las primeras. La asignación se realizará de tal manera que cada centro de distribución abierto sea atendido por una sola planta, mientras que cada cliente debe ser abastecido por un solo centro de distribución abierto.

Para el envío de productos, sólo se considera un medio de transporte, conociéndose los costos que genera en ambos niveles de la red. Se involucrarán economías a escala en los envíos de plantas a futuros centros de distribución, modeladas por un costo fijo y un costo variable.

La cadena de suministros es sobre un único producto de naturaleza estocástica. La demanda no abastecida se tomará como pérdida sin penalización, aunque será controlada con el cumplimiento de un nivel de servicio establecido, el cual será medido como la probabilidad de no incurrir en inventario agotado durante el tiempo de entrega de una orden de productos a los centros de distribución abiertos.

La valoración de los inventarios de trabajo y de seguridad sólo se presentará en los centros de distribución. El costo unitario de mantener inventarios será el mismo para todos los centros.

1.2 OBJETIVO

El objetivo de esta tesis consiste en el estudio de un problema común en la industria, involucrando aspectos que en conjunto no han sido tratados en la literatura. Estos aspectos son importantes para el desarrollo de una red de suministro integral que conlleve al mejor desempeño, ofreciendo una ventaja competitiva a la cadena de suministro. Se pueden distinguir los siguientes objetivos particulares:

- Estudio de la aplicación de investigación de operaciones a la toma de decisiones en una cadena de suministro.
- Búsqueda de la mejor formulación matemática del problema propuesto.

- Validación del modelo obtenido.
- Solución de casos de prueba.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Dentro de un mundo cada vez más competitivo y demandante, las empresas deben procurar el uso de sus recursos de manera más eficiente. Para ello, la administración de la cadena de suministro debe considerar la sinergia entre los elementos productivos y la comunicación constante entre sus actores, sin olvidar que su objetivo principal es alcanzar utilidades satisfaciendo a su vez, las necesidades de sus clientes. Dicho objetivo puede verse simplificado en otros más pequeños como por ejemplo de minimizar costo, maximizar ventas, maximizar tasa de retorno o nivel de servicio, etc. Estos objetivos están relacionados a cuatro tipos de decisiones principales: localización, producción, inventario y transportación [19].

La toma de decisiones en la administración de la cadena de suministro están asociadas generalmente, a un determinado nivel de la cadena, por lo que suelen tomarse de manera aislada, sin considerar su influencia en los demás elementos del sistema. Miranda y Garrido [35] expresan que esta situación tiende a propiciar incompatibilidades entre las decisiones, por ejemplo, los problemas de localización de instalaciones, considerados como estratégicos, imponen fuertes implicaciones en relación a los aspectos tácticos y operacionales relacionados directamente con la localización óptima, tales como la logística y producción. La integración de todas las decisiones nos llevaría a mejores resultados, sin embargo, no es viable, dado a la dificultad que implica su resolución.

En el presente trabajo se estudiará el diseño de una red para cadena de suministro, involucrando el problema de localización de instalaciones junto con el problema de inventarios.

La relevancia de las decisiones de localización radica en su implicación en fuertes inversiones monetarias y largos periodos de tiempo. Por otra parte, el control de inventarios pertenece a decisiones operacionales, y por tanto su importancia no es tan obvia. Sin embargo, se ha observado que sí influye de manera crucial en la eficiencia de una unidad productiva, tanto así que filosofías como justo a tiempo y manufactura esbelta tienen como principio la disminución de inventarios. Puede consultarse a mayor detalle el papel que juega el inventario dentro de una cadena de suministro en [5].

El inventario representa capital inmovilizado y acarrea costos relacionados con el equipo de transportación, mantenimiento, equipo de unificación, sistemas de rastreo, costo por aprovisionamiento, entre muchos otros, pero cumplen con la función de amortiguar las variaciones de la demanda teniendo como consecuencia la imposibilidad de prescindir del mismo.

Para optimizar el sistema de inventarios, las compañías deben decidir los lugares adecuados para mantener el inventario, así como la cantidad más adecuada de instalaciones y de producto a mantener. Por ello, el problema de localización de instalaciones y el problema de inventario están estrechamente relacionados y deben ser estudiados de una manera conjunta.

Problemas similares han aparecido en la literatura, sin embargo, sólo abarcan un nivel de la cadena. El problema propuesto al ser de dos niveles y de asignación unitaria se complica sustancialmente, sin embargo vuelve más realista al modelo. Permite una representación más fiel del problema y origina soluciones más adecuadas al contexto de la cadena de suministro, considerando elementos importantes en la decisión de apertura de instalaciones como tiempos y costos reales de entrega de productos. Como se verá en el apartado de experimentación, la configuración de red cambia al agregar esta consideración.

1.4 HIPÓTESIS

En este trabajo de tesis se plantean las siguientes hipótesis:

- El problema de localización de instalaciones e inventario considerando múltiples plantas puede ser resuelto a través de técnicas de optimización, que permitan encontrar la mejor configuración de red al menor costo posible.
- Es posible reducir parcialmente la complejidad al problema por medio de reformulaciones, linealizaciones y preprocesamiento de la información del problema.
- Considerar múltiples plantas al problema de localización e inventario influye en las decisiones de apertura de centros de distribución y como consecuencia en la configuración de red.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo está organizado de la siguiente forma.

- El capítulo dos consiste en la exposición de conceptos generales involucrados con cadena de suministro, el problema de localización de instalaciones y el problema de inventarios. Se muestra la revisión bibliográfica relacionada a esos rubros. También se describe brevemente los algoritmos de solución de modelos de programación no lineal entera mixta y de programación lineal entera mixta, ya que en este trabajo se presentan este tipo de modelos.
- En el capítulo tres, se presenta nuestra modelación matemática del problema, haciendo énfasis en la estimación de los costos totales originados por concepto de distribución de productos, apertura de centros de distribución e inventarios, para ello, primeramente se enunciará la notación utilizada. Se continúa

con el desglose del modelo matemático obtenido, el cual es un modelo de programación no lineal entero mixto. Se finaliza exponiendo las dimensiones del modelo.

- En el capítulo cuarto se explica la metodología de solución abordada, la cual consistió básicamente en la linealización del modelo original y de una reformulación de este último.
- En el capítulo quinto es dedicado a la experimentación. El primero conjunto de experimentos fue diseñado para evaluar la capacidad computacional de los modelos matemáticos formulados, a través de su ingreso a optimizadores comerciales. Se elige como medida de desempeño el tiempo de solución, la optimalidad y el tamaño de caso más grande resuelto. Lo anterior permite seleccionar el mejor modelo.

El objetivo del segundo conjunto de experimentos es verificar la obtención de la mejor configuración de red. El análisis de los resultados conduce a una pequeña variación en los modelos.

En el tercer conjunto de experimentos, se realiza el análisis de sensibilidad de los resultados, en específico dentro de la configuración de red obtenida respecto a la ponderación del inventario y la ponderación del transporte. También se considera la sensibilidad respecto a la variación en el nivel de servicio deseado.

El cuarto conjunto de experimentos nos permite conocer otras estadísticas del modelo seleccionado, el modelo BLP. El objetivo consiste en remarcar su ventaja respecto al tiempo de resolución de los casos y la disminución de elementos manejados.

Finalmente, se muestra la influencia de la inclusión de múltiples plantas sobre la configuración de la red, siendo ésta una de las principales diferencias del problema propuesto con los problemas expuestos en la literatura revisada.

- En el capítulo seis se presentan las conclusiones obtenidas y el trabajo planeado a futuro.

- El trabajo finaliza con los apéndices. El primero consiste en enunciar los parámetros del caso de prueba evaluado dentro del capítulo de experimentación. El siguiente apéndice muestra los resultados por bloques de los casos requeridos para el análisis de sensibilidad.

También se presenta como apéndice, una breve reseña de las herramientas computacionales utilizadas para la optimización del problema propuesto. El primer apartado de este apéndice es dedicado a GAMS (*Sistema General de Modelaje Algebraico*), *software* de modelación donde fueron ingresados los casos de estudio. Se menciona, asimismo, cada uno de los optimizadores seleccionados: AlphaECP (para el modelo no lineal) y CPLEX (para los modelos lineales).

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 CONCEPTOS GENERALES

El concepto de Cadena de suministro puede ser visto como un sistema que involucra el movimiento de productos o servicios desde proveedores hasta consumidores finales. Al hablar de administración de cadena de suministro nos referimos al conjunto de actividades orientadas a la integración eficiente de los actores productivos. La finalidad es que la mercancía sea producida y distribuida en el lugar adecuado, momento adecuado y cantidad adecuada, logrando maximizar utilidades mientras se satisfacen los requerimientos del servicio. Tales actividades pueden englobarse en área de compras, ventas, producción, distribución e inventarios.

La intervención de la investigación de operaciones en la administración de cadena de suministro no ha sido realizada de manera integrada. Se han realizado simplificaciones importantes con el fin de disminuir la dificultad en la resolución de los problemas planteados, por consecuencia suele abordar de manera separada cada una de las áreas involucradas en la administración de cadena de suministro. Es así que la literatura se ha enfocado principalmente en decisiones de localización, producción, inventario y transportación de manera aislada [1].

A continuación explicamos brevemente el problema de localización de instalaciones y el problema de inventarios que son los relacionados directamente a este trabajo de tesis.

2.2 EL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES

El problema de localización (FLP por sus siglas en inglés *Facility Location Problems*) consiste en determinar los sitios adecuados para instalar recursos, suponiendo costos lineales y un conjunto de demandas determinísticas para los clientes considerados.

Los modelos de localización son aplicados a casos específicos, esto es, su estructura (objetivos, restricciones y variables) depende de cada caso en estudio, lo que conlleva a la inexistencia de un modelo genérico que sea apropiado para todas las situaciones. Por ello modelos con distinto objetivo pueden provocar diferentes soluciones para el mismo caso de estudio, razón por la que es necesario ser cautelosos con el contexto del problema. Algunas consideraciones que generan diversidad en los problemas de localización son:

- Espacio de búsqueda: en referencia a la posibilidad de ubicar la nueva instalación en cualquier punto en el plano o si existe lugares potenciales de ubicación. Para el primer caso hablamos de modelos continuos, para el segundo de modelos discretos.
- Capacidad: es decir, si las instalaciones involucradas dentro del problema tienen o no, una cantidad máxima de almacenamiento.
- Tipo de abastecimiento: puede ser de asignación única, lo que significa que cada punto de demanda tiene que ser atendido completamente por una sola instalación, o bien, asignación múltiple si más de una instalación puede satisfacer un mismo punto de demanda.
- Niveles: se dice que un problema es de un nivel, cuando se tiene un conjunto de clientes y un conjunto de ubicaciones potenciales para instalaciones del mismo

tipo. Por otro lado, si se tiene un conjunto de clientes y dos conjuntos distintos de instalaciones, por ejemplo plantas y almacenes, se dice que es de dos niveles.

También se pueden contemplar aspectos como el horizonte de planeación, el número de productos, entre otros. Para un panorama general de los problemas de localización de instalaciones dentro de la administración de cadenas de suministro puede consultarse el trabajo de Melo [33], para un resumen de las distintas metodologías de solución tanto exactas como aproximadas desarrolladas en las últimas décadas puede verse el artículo de Wu *et ál.* [59].

2.3 EL PROBLEMA DE INVENTARIOS

El problema de inventarios consiste en determinar la cantidad y el momento en el que se coloca un pedido de tal forma que sea posible satisfacer la demanda de los clientes al menor costo posible.

Radford [44] menciona que el control de inventarios nace con el desarrollo del modelo de lote económico (EOQ por sus siglas en inglés *Economic Order Quantity*), el cual es propuesto por Ford Harris [24] en el año de 1913. Este modelo de inventarios es esencialmente un balance entre el costo de pedido y el costo del inventario de retención. Es aplicable bajo los supuestos de:

- demanda independiente, conocida y constante,
- entrega inmediata,
- monitoreo de inventario continuo,
- costos invariantes en el tiempo.

Al ser poco probables en la vida real, tales supuestos han provocado críticas al modelo. Una de las causas es la incertidumbre, la cual puede observarse en muchos factores, como por ejemplo: el tiempo de entrega de las órdenes, el tiempo

de producción, los costos y la demanda. En nuestro caso de estudio, se supone la última causa enunciada.

La demanda incierta es muy frecuente e inherente al ámbito competitivo del mercado actual. Para hacer frente a este tipo de demanda, las empresas deben mantener un inventario de seguridad, definido a través de un nivel de servicio que les permita responder a las demandas tan pronto como sea posible a pesar de las fluctuaciones. Una vista general del manejo de inventarios y su modelación puede encontrarse en las publicaciones [25] y [48].

2.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA RELACIONADA

Con mayor frecuencia se han estado considerado interacciones entre las áreas de una cadena de suministro, así como la toma de decisiones conjunta basada en aspectos operacionales, tácticos y estratégicos. Dentro algunos autores que muestran un panorama general de esta tendencia son Andersson *et ál.* [2], Melo *et ál.* [33] y Miranda *et ál.* [36].

Algunas publicaciones que involucran el problema de localización y el problema de inventario, se encuentra [26] donde se incorpora el modelo EOQ y los costos de órdenes en un problema de localización de instalaciones, suponiendo tamaños de lotes fijos y demanda determinista. Los trabajos [15, 11, 35] también presentan versiones similares al modelo FLP con decisiones de inventario basadas en el modelo EOQ, pero suponiendo demandas estocásticas.

Todos los artículos anteriores presentan modelos discretos, es en [14] donde se desarrolla un modelo de localización e inventario con ubicación de los clientes en un espacio continuo.

En la tabla 2.1 se resumen los aspectos principales de los principales artículos revisados. Cada fila representa una característica evaluada, la primera columna indica la etiqueta designada a tal característica, mientras que las siguientes columnas

corresponden a cada uno de los artículos, los cuales son especificados en la primera fila de la tabla. Una estrella (★) es el indicador de que determinada característica se presenta en el artículo en cuestión. La notación utilizada se enuncia a continuación.

Abreviaturas	
Ref	Referencia.
Niv	Niveles en la cadena de suministro.
Mod	Modelo.
P	Plantas.
CD	Centros de distribución.
R	Minoristas.
D	Demanda.
SE	Solución exacta.
SH	Solución heurística.
RL	Relajación lagrangiana.
LT	Tiempo de entrega.
NLP	Modelo de programación no lineal.
MINLP	Modelo de programación no lineal entera mixta.
MILP	Modelo de programación lineal entera mixta.
Características del modelo	
1	Economías a escala.
2	Parámetros estocásticos.
3	Modelo de inventario.
4	Instalaciones capacitadas.
5	Único producto(1) / Multiproducto(V)
6	Nivel de servicio tipo 1.
7	Función objetivo (monobjetivo/multiobjetivo).
8	Monoperiodo.
9	Decisiones a tomar.
10	Esquema de riesgos compartidos (<i>risk pooling</i>).
11	Restricciones de única fuente (<i>single source</i>).
Características de la metodología de solución	
1	Tipo de solución.
2	Tratamiento de incertidumbre.
3	Forma de determinar cotas.

Ref	[11]	[14]	[41]	[35]	
Niv	1: CD, R	1:CD,C	1:CD,R	1: RW, R	
Mod	MINLP	NLP	MILP	MINLP	
Función	Min costos de ubicación, inventario y distribución.	Min costos de ubicación, inventario, distribución.	Min costos de localización, inventario, transportación.	Min costos de ubicación, inventario y distribución, ponderando los 2 últimos.	
Otro	Motivación: distribución de productos de banco de sangre.	Debido a la gran cantidad de clientes, su localización se representa de manera continua.	Realiza una aproximación de los costos relacionados al inventario.	Se realiza un análisis de sensibilidad ante los cambios en las ponderaciones.	
Características del modelo	1	Transporte	No	No	No
	2	D :dist normal	D :dist uniforme.	D :dist Poisson.	D :dist normal
	3	EOQ	EOQ	Promedio	(Q,R)
	4	No	★	No	★
	5	1	1	1	1
	6	★	★	★	★
	7	Monobjetivo	Monobjetivo	Monobjetivo	Monobjetivo
	8	★	★	★	Det horizonte de planeación.
	9	Localización, inventario	Localización, inventario	Localización, inventario	Localización, inventario
	10	★	No	★	★
	11	★	★	★	★
Metodología	1	SE- RL	SH	SH	SE-RL
	2	Agrupamiento de D.	Agrupamiento de D.	Agrupamiento de la D	Agrupamiento de la D.
	3	B & B	Heurísticas.	–	Subgradiente.

Tabla 2.1: Literatura revisada

Ref	[36]	[43]	[47]	[46]	
Niv	1: CD, Clustering.	1: LN (logistic nodes), R.	1:P, R.	1:CD,C.	
Mod	MINLP	MINLP	MINLP & MILP	MINLP	
Función	Min costos de ubicación, inventario, distribución, flete, clustering.	Min costos de ubicación, inventario y distribución. Con un núm. máx. De aperturas.	Min. los costos de localización, envío, inventario de seguridad y de trabajo,	Min. costos de ubicación, inventario y ruteo.	
Otro	Dif LT para c/CD . Utiliza la estructura <i>hub and spoke (clustering)</i>	Dif LT según LN. En un det horizonte de t con interés bancario.	Se estudian los casos en que la D es proporcional a la media, y cuando el valor de la varianza es 0.	Utiliza el modelo de VR, en lugar de un modelo lineal en la función de costo por transporte.	
Características del modelo.	1	No	No	No	En trans., inv
	2	D :dist normal	D :dist normal	D :dist normal	D :dist normal
	3	(Q,R)	(Q,R)	EOQ	EOQ
	4	★	★	No	No
	5	1	V	1	1
	6	★	★	★	★
	7	Monobjetivo	Monobjetivo	Monobjetivo	Monobjetivo
	8	No	Horizonte de planeación det.	★	★
	9	Localización, flete, inventario, cluster	Localización, inventario	Localización, asignación.	Localización, inventario
	10	No	★	★	★
	11	★	★	★	★
Metodología.	1	SH	SH - Recocido simulado.	Técnicas de generación de columnas.	SE-RL
	2	Agrupamiento de D. programación con restricciones probabilísticas	Agrupamiento de D.	Agrupamiento de D.	Agrupamiento de D.
	3	--	--	--	B & B, heurístico voraz

Tabla 2.1: Literatura revisada (continuación)

Ref	[49]	[42]	[60]	
Niv	1:CD,C	1: CD, C	1:CD, C	
Mod	MINLP	MINLP	MINLP	
Función	Min costos de ubicación, inventario y distribución, ponderando los 2 últimos.	Min costos de ubicación, inventario y distribución	Min costos de ubicación, inventario y distribución, ponderando los 2 últimos.	
Otro	La media de la D es diferente para cada escenario.	La capacidad del CD modelada como una restricción probabilística.	Función objetivo linealizada ingresando restricciones no lineales.	
Características del modelo	1	Transporte	--	Transporte
	2	D :dist normal	D: Poisson	D :dist normal
	3	EOQ	EOQ	EOQ
	4	No	★	No
	5	1	1	1
	6	★	★	★
	7	Monobjetivo	Monobjetivo	Monobjetivo
	8	★	★	★
	9	Localización, inventario.	Localización, inventario.	Localización, inventario.
	10	No	★	★
	11	★	★	★
Metodología	1	SE-RL	SE-RL	SE-RL
	2	Escenarios.	Agrupamiento.	Agrupamiento.
	3	B & B, heurístico voraz.	Heurístico	Heurístico.

Tabla 2.1: Literatura revisada (continuación)

En relación a las características de la cadena de suministro, se puede observar que la diferencia sustancial entre el problema a tratar en esta tesis y lo existente en la literatura es la consideración de múltiples plantas. Como se vio en la tablas anterior, algunos artículos involucran varias opciones de plantas, sin embargo, modelan bajo el supuesto de que los valores de los parámetros correspondientes a éstas, es decir, el tiempo de entrega de órdenes de compra y el costo por transporte, son iguales sin importar a que centro de distribución atienda. Con tal supuesto se vuelve indiferente la selección de una planta respecto de otra, eliminándose así, las decisiones de asignación en el primer nivel de la cadena, y por tanto simplificando considerablemente el problema.

Con referencia a la modelación, más del 80% de los artículos revisados presentan un modelo no lineal entero mixto, causado por involucrar el costo real de inventarios. En [41] se presenta un modelo lineal entero mixto, al desarrollar una aproximación lineal para el inventario de seguridad. En [47] también se presenta un modelo lineal, pero éste fue obtenido al reformular su modelo no lineal inicial. Algoritmos de solución más comunes para estas dos clases de modelos serán mencionados en el siguiente apartado.

En cuanto a los métodos de solución, la literatura no es muy amplia. La relajación lagrangiana es la herramienta más recurrida para la resolución de estos problemas. También se han utilizado técnicas aproximados (heurísticas) como las manejadas en los trabajos [36] y [43].

2.5 MODELOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA

MIXTA

Los modelos de programación lineal entera mixta (**MILP** por sus siglas en inglés *Mixed Integer Linear Programming*), se pueden escribir en su manera general de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{mín } c^T x + d^T y \\
 \text{s.a } & Ax + By \leq b \\
 & x \in X \subseteq \mathbb{R}^n \\
 & y \in Y \subseteq \mathbb{Z}^m \\
 & X, Y \neq \emptyset
 \end{aligned}$$

Si todas las variables son obligadas a tomar el valor de 0 o 1, se tiene un caso especial: un modelo de Programación lineal entera binaria (**BIP** por sus siglas en inglés *Binary Integer Programming*), expresado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } & c^T x + d^T y \\
 \text{s.a } & Ax + By \leq b \\
 & x, y \in \{0, 1\}^m
 \end{aligned}$$

Los métodos para resolver estos modelos están fundamentalmente basados en métodos de ramificación y acotamiento (en inglés *Branch and Bound* o B&B) propuesto originalmente por Land y Doig en 1960 [30] y formalizado por Dakin en el año de 1965 [10] .

El objetivo del algoritmo de B&B es realizar una enumeración de las combinaciones de las variables binarias pero sin la necesidad de examinar todas las combinaciones posibles por medio de un árbol binario. En cada nodo de éste, se resuelve un problema lineal relajado donde un subconjunto de variables están fijas en valores 0 o 1, mientras que el resto puede tomar cualquier valor entre esos

extremos (incluyendo los valores extremos), una reseña completa y sencilla de este algoritmo puede encontrarse en [51]. Para un problema de minimización, la resolución del problema relajado en el nodo raíz es una cota inferior (*lower bound*); si todas las variables binarias de la solución toman valores enteros, se ha encontrado la solución óptima, si no es así, se deberá continuar buscando la solución entera. Para ello se abre una nueva rama del árbol en la cual algunas variables binarias se fijan. Cuando se obtiene una solución entera del problema lineal resultante, se dice que se ha obtenido un cota superior del problema (*upper bound*). Se detiene una ramificación del árbol cuando se encuentra un problema infactible (cuando no es posible encontrar una solución al problema lineal del nodo), cuando la cota superior obtenida es mayor que la cota superior actual ó cuando todas las variables binarias tienen valor 0 o 1. Si al resolver un problema lineal en un nodo determinado se obtiene una solución entera menor que la cota superior vigente, el valor objetivo obtenido es la nueva cota superior del problema. El algoritmo termina cuando no se pueden abrir más ramas del árbol y todos los nodos han sido explorados.

En el peor de los casos, el algoritmo básico de ramificación y acotamiento termina con la enumeración de todos los nodos del árbol. Dos desarrollos importantes que han contribuido a mitigar el crecimiento exponencial en la solución de MILP son: el desarrollo de técnicas de preprocesamiento y la introducción de planos de corte. El preprocesamiento se basa en la utilización de técnicas de eliminación automática de variables y de restricciones, reducción de límites, reformulación de límites, reformulación de restricciones y fijar con antelación algunas variables enteras. Los planos de corte son restricciones extras añadidas al problema, bien en el nodo inicial o dentro de la enumeración, que tiene efecto de reducir la región factible del problema sin comprometer ninguna de las soluciones enteras del mismo.

Entre los desarrollos en MILP se incluyen los métodos de ramificación y precio (*branch and price* [6]) y ramificación y corte (*branch and cut* [4]).

2.6 MODELOS DE PROGRAMACIÓN NO LINEAL ENTERA MIXTA

Los modelos de programación no lineal entera mixta (**MINLP** por sus siglas en inglés *Mixed Integer Non Linear Programming*) se pueden formular de forma general como:

$$\begin{aligned} \text{mín} \quad & f(x, y) \\ \text{s.a:} \quad & g_j(x, y) \leq 0 \quad j \in J \\ & x \in X \subseteq \mathbb{R}^n \\ & y \in Y \subseteq \mathbb{Z}^m \end{aligned}$$

Donde $f(\cdot)$ y $g(\cdot)$ son funciones convexas y diferenciables, X está dado por el conjunto convexo $X = \{x | x^L \leq x \leq x^U, Ax \geq b\}$ y j es el índice de desigualdades. \mathbb{Z}^m denota un conjunto de vectores enteros en \mathbb{R}^n .

Los modelos de programación no lineal entera mixta tienen asociado un dominio combinatorio y un dominio continuo y son clasificados como NP-difíciles [18, 38, 50]. Esto significa que en el peor de los casos, no es posible resolverlos en un tiempo polinomial. Por otro lado, por la no linealidad generalmente son no convexas, lo que significa que existen varias soluciones o soluciones óptimas locales, dificultando la búsqueda de un óptimo global al grado de que tal tarea también se clasifica como NP-difícil.

En el artículo [52] se explican los métodos más empleados y desarrollados para resolver un problema MINLP, que son:

- Ramificación y acotamiento (*branch and bound* - B&B) [23, 39, 7].
- Descomposición generalizada de Benders (*generalized benders decomposition* - GBD) [20].
- Aproximación exterior (*outer approximation* - OA) [12].

- Aproximación exterior con relajación de igualdades (*OA/ER*) [28].
- Aproximación exterior con función de penalidad aumentada (*augmented penalty/ outer approximation / equality relaxation* - AP/OA/ER) [54].
- Planos de corte extendido (*extended cutting plane* - ECP) [58].

Estos algoritmos se basan en la resolución de subproblemas para obtener cotas del problema original.

El método de ramificación y acotamiento, como se mencionó anteriormente, consiste en la relajación continua del problema y la resolución de cada nodo. La diferencia ahora es que en cada nodo se obtiene un problema no lineal.

El método de descomposición generalizada de Benders y el método de las aproximaciones exteriores, iteran entre dos subproblemas. El primero es un NLP con valores fijos de las variables binarias y, por lo tanto, es una cota superior a la solución óptima del problema, y un problema maestro que es una cota inferior a la solución óptima del problema. Los métodos GBD y OA/ER se diferencian en la definición del problema maestro. OA/ER emplea linealizaciones para la función objetivo y restricciones alrededor de la cota superior, mientras que el método GBD emplea acumulación de funciones lagrangianas paramétricas en las variables discretas. Si el problema es convexo, se puede garantizar optimalidad a través de estos métodos.

El método ECP no depende del uso de subproblemas y algoritmos NLP, porque el algoritmo se basa en la resolución de una secuencia de problemas MILP. En este método, las variables discretas y continuas convergen simultáneamente y la función objetivo tiene que definirse como lineal. En [21] y [22] se encuentra un resumen más amplio sobre estos algoritmos para modelos no lineales.

Finalmente, en [27] se puede encontrar una revisión de los métodos de optimización tanto para modelos MILP y MINLP.

CAPÍTULO 3

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se expondrá en primer lugar la estimación de los costos totales originados al configurar la red de cadena de suministro, así como los conjuntos y parámetros definidos para ello. También se explicará el modelo matemático obtenido en la modelación desarrollada para el problema de estudio.

3.1 NOTACIÓN

Antes de desarrollar la estimación de los costos incurridos en la cadena de suministro a tratar, necesitamos introducir la siguiente notación.

3.1.1 CONJUNTOS

La cadena de suministro analizada es de dos niveles (*echelon*, en inglés), los cuales se encuentran definidos por un conjunto de minoristas, un conjunto de centros de distribución y un conjunto de plantas, la notación para éstos es la siguiente:

K : Conjunto de minoristas indexados por k . Dentro de este trabajo se hablará de manera indistinta y con el mismo significado de minoristas y clientes.

J : Conjunto de ubicaciones potenciales para la apertura de centros de distribución indexados por j .

I : Conjunto de plantas indexadas por i .

3.1.2 PARÁMETROS

Los valores de entrada que caracterizan a los elementos de los conjuntos son:

μ_k : Media de la demanda diaria del minorista k .

λ : Cantidad de días trabajados al año.

v_k : Varianza de la demanda diaria del minorista k .

u_j : Costo fijo de localizar un centro de distribución en la ubicación j .

θ : Ponderación del inventario. Refleja la importancia relativa del inventario dentro de la cadena de suministro.

β : Ponderación del transporte asociada a su importancia dentro de la cadena de suministro.

h : Costo unitario anual de mantener inventario en todos centros de distribución.

f_j : Costo fijo de poner una orden en el centros de distribución abierto en la ubicación j .

l_{ij} : Tiempo de entrega de productos de la planta i al centros de distribución j .

g_{ij} : Costo fijo de transportar una orden de la planta i a un centros de distribución ubicado en j .

a_{ij} : Costo unitario de envío de productos de la planta i al centro de distribución ubicado en j .

c_{jk} : Costo unitario de envío de productos del centro de distribución con ubicación j al minorista k .

α : Probabilidad máxima aceptada de escasez de producto en los centros de distribución durante el tiempo de entrega de un pedido.

p_i : Capacidad de producción anual de la planta i .

q_j : Capacidad de almacenamiento anual del centro de distribución ubicado en j .

$z_{1-\alpha}$: Parámetro calculado correspondiente a la probabilidad de abasto en los centros de distribución durante el tiempo de entrega de pedidos. Representa a la variable aleatoria normal estándar .

3.1.3 VARIABLES

Para optimizar los costos totales del problema de localización de instalaciones e inventario, requerimos de dos tipos de variables: variables de decisión, necesarias para definir la configuración de la red; y las variables auxiliares, necesarias para determinar los costos de inventario del sistema.

VARIABLES DE DECISIÓN

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{Si se localiza un centro de distribución en el} \\ & \text{sitio candidato } j, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$Y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del minorista } k \text{ es asignada al centro} \\ & \text{de distribución localizado en el sitio candidato } j, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del centro de distribución localizado} \\ & \text{en el sitio candidato } j \text{ es asignada a la planta } i, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

VARIABLES AUXILIARES

d_j : Demanda media diaria en el centro de distribución j .

s_j : Varianza de la demanda diaria en el centro de distribución j .

D_j : Demanda media anual en el centro de distribución j .

T_j : Tiempo de entrega de una orden al centro de distribución j .

3.2 DETERMINACIÓN DE COSTOS ESPERADOS DEL SISTEMA

A continuación se muestra la deducción de los componentes de los costos generados por el sistema, para mayor claridad de los mismos, primeramente se realizará la deducción considerando un solo centro de distribución, por lo tanto no tendremos en cuenta momentáneamente el índice j en las variables y parámetros definidos anteriormente.

3.2.1 COSTO ESPERADO DE ORDENAR, TRANSPORTAR Y MANTENER INVENTARIO PROMEDIO ANUAL

Cuando la demanda es aleatoria, el costo incurrido es en sí aleatorio, y ya no es obvio cuál debe ser el criterio de optimización. Sin embargo, la mayoría de las técnicas de optimización aplicadas al control de inventarios supone el objetivo de minimizar los costos esperados.

La motivación para optar por el criterio del valor esperado es que los problemas de control de inventarios son, por lo general problemas dinámicos, se forman de manera repetida. La ley de los grandes números en la teoría de la probabilidad establece que el promedio aritmético de muchas observaciones de una variable aleatoria converge hacia el valor esperado de dicha variable. En el contexto del problema de inventarios, si se adopta una regla que minimice los costos esperados, entonces el promedio aritmético de los costos reales incurridos durante muchos periodos también será un mínimo. En [40] se podrá encontrar mayor información al respecto.

A pesar de contar con demanda incierta se utilizará el modelo de cantidad económica de pedido (EOQ) pues autores como Axsater [3] y Zheng [61] han probado que la aproximación es muy buena.

En concordancia con lo anterior y siguiendo el esquema de modelación presentado por Daskin [11], se estimarán los costos esperados anuales provocados por el inventario mantenido en cada centro de distribución. Dichos costos son:

$$fn + \beta n \sum_{i \in I} \left(g_i + \frac{a_i D}{n} \right) Z_i + \frac{\theta h D}{2n} \quad (3.1)$$

El primer término expresa el costo por ordenar, siendo n el número de órdenes realizadas anualmente, el segundo sumando representa el costo total por transportar las órdenes anuales de la planta al centro de distribución, reflejándose con un costo fijo (g_i) y un costo variable (a_i) la intervención de economías a escala. El último término representa el costo por mantener el inventario promedio.

Se puede observar que la expresión anterior está en función del número de órdenes a realizar. Como tal número se desconoce, pero se sabe que debe ser aquel que permita incurrir en el menor de los costos, se procede a encontrar el valor óptimo de n . Para ello se obtendrá la primera derivada con respecto a n y se igualará a cero, de manera que se pueda deducir su valor.

$$f + \beta \sum_{i \in I} \left(g_i + a_i \frac{D}{n} \right) Z_i - \beta n \sum_{i \in I} \left(a_i \frac{D}{n^2} \right) Z_i - \frac{\theta h D}{2n^2} = 0$$

$$\text{despejando } n = \sqrt{\frac{\theta h D}{2 \left(f + \beta \sum_{i \in I} g_i Z_i \right)}}$$

El valor obtenido de n puede ser traducido como el número de órdenes necesarias para igualar el costo por realizar pedidos y el costo por mantener inventarios. Esta forma de optimización es básicamente la misma del modelo económico de lote (*EOQ*), la diferencia aquí radica en que el valor óptimo depende de la configuración de red dada por las variables binarias (necesarias para las decisiones

de localización y asignación). Lo anterior significa que al modificar la red, el valor óptimo del número de órdenes también cambiará.

Después de sustituir n en la ecuación (3.1) y simplificando términos obtenemos lo siguiente:

$$\sqrt{2\theta h D \left(f + \beta \sum_{i \in I} g_i Z_i \right) + \beta \sum_{i \in I} a_i D Z_i}$$

que es la función simplificada del costo por ordenar y transportar producto en el primer nivel de la cadena y por mantener el inventario de trabajo en cada centro de distribución.

3.2.2 COSTO DE INVENTARIO DE SEGURIDAD.

El inventario de seguridad (al cual haremos referencia de aquí en adelante como *ss* por sus siglas en inglés *safety stock*) cumple la función de amortiguador, necesario para lidiar con la posible escasez de producto.

Como se mencionó previamente, se debe garantizar el abastecimiento de la demanda bajo el esquema del nivel de servicio tipo **I**. Esto significa que la cantidad de producto mantenido en el inventario durante el tiempo de reabastecimiento, debe ser mayor o igual a la cantidad de producto demandado durante el mismo intervalo de tiempo.

La demanda de cada minorista se modelará como una variable aleatoria con distribución normal, con media y varianza conocidas. Por otro lado, la demanda abastecida por los futuros centros de distribución a abrir, estará en función de la demanda de los minoristas asignados a cada centro. Es necesario hacer notar que esta forma de modelación hace uso del concepto de riesgos compartidos (*risk pooling*). Este efecto fue propuesto por Eppen [13], el cual establece que el costo originado por el inventario de seguridad puede ser reducido de manera significativa al agrupar la demanda de los clientes. Esto lo demuestra al analizar los requerimientos de productos tanto en un sistema centralizado, como es nuestro caso, y en un sistema

descentralizado. Información más detallada sobre riesgos compartidos es encontrada en el trabajo [45].

Para el periodo de reabastecimiento de productos, se definen los siguientes parámetros en cada centro de distribución.

d' : Demanda real presentada, correspondiente a la demanda de los clientes asociados al centro de distribución.

d^T : Demanda media estimada.

s^T : Varianza estimada de la demanda.

R^T : Punto de reorden (*reorder level*), nivel de inventario que determina el momento en que se debe colocar una orden.

Con ayuda de estos parámetros, el planteamiento de que la probabilidad de desabasto sea menor al límite permitido α se formaliza de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P(d' > R^T) &< \alpha \\ P(d' < R^T) &\geq 1 - \alpha \\ P\left(\frac{d' - d^T}{\sqrt{s^T}} < \frac{R^T - d^T}{\sqrt{s^T}}\right) &\geq 1 - \alpha \end{aligned}$$

Normalizando se obtiene: $P(z < z_\alpha) \geq 1 - \alpha$,

si además sabemos que: $R^T = d^T + ss$,

entonces: $ss = z_{1-\alpha} \sqrt{s^T}$.

Por consiguiente, el costo anual de mantener inventario de seguridad en cada centros de distribución es:

$$\theta \lambda h z_{1-\alpha} \sqrt{s^T}$$

3.2.3 COSTO DE LOCALIZACIÓN.

Éste es simplemente el costo de apertura del centro de distribución seleccionado:

$$uX$$

3.2.4 COSTO CAUSADO POR LA TRANSPORTACIÓN DEL PRODUCTO DENTRO DEL SEGUNDO NIVEL DE LA CADENA

Este costo ponderado corresponde al importe total del envío de la demanda anual cubierta por cada centro de distribución abierto a los clientes que atiende.

$$\beta\lambda \sum_{k \in K} \mu_k c_{jk} Y_k.$$

3.2.5 COSTO TOTAL

Tomando en cuenta los costos anteriores, y generalizando a $|J|$ centros de distribución, el costo total queda expresado de la siguiente manera:

$$\sum_{j \in J} \left(u_j X_j + \beta\lambda \sum_{k \in K} \mu_k c_{jk} Y_{jk} + \sqrt{2\theta h D_j \left(f_j + \beta \sum_{i \in I} g_{ij} Z_{ij} \right)} + \beta \sum_{i \in I} a_{ij} D_j Z_{ij} + \theta \lambda h z_{1-\alpha} \sqrt{s_j T_j} \right) \quad (3.2)$$

3.3 MODELO MATEMÁTICO

OBJETIVO: Minimizar los costos totales ponderados (3.2) incurridos por el concepto de inventario, transporte de productos y apertura de centros de distribución, dentro de la cadena de suministro.

MODELO

$$\begin{aligned} \text{mín.} \quad & \sum_{j \in J} \left(u_j X_j + \beta \lambda \sum_{k \in K} \mu_k c_{jk} Y_{jk} + \sqrt{2\theta h D_j \left(f_j + \beta \sum_{i \in I} g_{ij} Z_{ij} \right)} \right. \\ & \left. + \beta \sum_{i \in I} a_{ij} D_j Z_{ij} + \theta \lambda h z_{1-\alpha} \sqrt{s_j T_j} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

s.a:

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{ij} = X_j \quad \forall j \in J \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in J} q_j Z_{ij} \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$D_j = \lambda \sum_{k \in K} \mu_k Y_{jk} \quad \forall j \in J \quad (3.7)$$

$$D_j \leq q_j X_j \quad \forall j \in J \quad (3.8)$$

$$T_j = \sum_{i \in I} l_{ij} Z_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3.9)$$

$$s_j = \sum_{k \in K} v_k Y_{jk} \quad \forall j \in J \quad (3.10)$$

$$X_j, Y_{jk}, Z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, i \in I, j \in J \quad (3.11)$$

$$T_j, D_j \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

$$s_j \in \mathbb{R} \quad \forall j \in J \quad (3.13)$$

La ecuación (3.4) asegura que cada minorista sea asignado a un único centro de distribución. De manera análoga, en la ecuación (3.5) se restringe que cada centro de distribución abierto sea asignado a una sola planta. Lo anterior, forzosamente necesario por el uso del modelo de lote económico en el manejo de inventarios.

La restricción (3.6) evita que la capacidad de producción de las plantas sea sobrepasada. Toma como referencia la capacidad de los centros de distribución asignados, bajo el supuesto de que son utilizados en su totalidad, sin tener capacidad ociosa.

La restricción (3.7) define la demanda anual a atender por cada centro de distribución como la demanda conjunta de los clientes asociados a éstos, mientras que la restricción (3.8) impide que dicha demanda sobrepase la capacidad soportada por cada centro de distribución.

La expresión (3.9) indica que el tiempo de reabastecimiento en los centros de distribución está en función de la planta que le sea asignada. Lo cual es lógico, bajo el supuesto de que cada planta requiere diferente tiempo de entrega de productos a los distintos centros de distribución, consecuencia de la distancia entre de ellos y del tiempo de producción.

La ecuación (3.10) determina la varianza de la demanda diaria abastecida por cada centro de distribución como la suma de las varianzas en la demanda de sus clientes atendidos. Finalmente las restricciones (3.11)-(3.13) muestran la naturaleza de las variables.

Tanto la restricción (3.7) como la restricción (3.10), al considerar la demanda y varianza conjunta de los clientes adscritos a los centros de distribución, hacen uso del concepto de riesgos compartidos [13]. Lo anterior puede ser traducido como compensación cruzada, es decir, el incremento de demanda de ciertos clientes contrarresta la disminución de otros.

Podemos observar además, que las restricciones son funciones lineales, lo que hace al espacio de soluciones convexo, sin embargo, la función objetivo presenta no linealidades con lo cual se dificulta la obtención de soluciones óptimas. Al tratarse de un modelo de programación no lineal entera mixta, haremos referencia a él más adelante como MINLP.

3.4 DIMENSIONES DEL MODELO

Variables binarias: $|J| \cdot (1 + |K| + |I|)$

Variables enteras: $|J|$

Variables continuas: $|I|$

Número total de restricciones: $|K| + 5 \cdot |J| + |I|$

Observe que las expresiones que indican la cantidad de variables enteras, la cantidad de variables continuas y la cantidad de restricciones son funciones lineales en la cardinalidad de los conjuntos I , J y K . Sin embargo esto no sucede con la expresión que indica el número de variables binarias, lo que significa que entre mayor sea el tamaño de los conjuntos, principalmente el conjunto de centros de distribución, mayores serán las posibilidades de solución.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Los algoritmos de solución de programación no lineal entera mixta garantizan optimalidad global siempre y cuando tanto la función objetivo como las restricciones sean convexas [16]; si éste no es el caso, no se puede garantizar la solución global. Los métodos rigurosos o exactos de optimización global garantizan una aproximación arbitrariamente cercana al óptimo global, al igual que realizan la verificación de que se ha alcanzado dicha aproximación.

Como se verá en el capítulo de experimentación, no fue posible encontrar soluciones óptimas en los casos de pruebas realizadas para el modelo MINLP, a pesar de haber llevado a cabo un preprocesamiento y evaluación de diversos optimizadores. Lo anterior fue incentivo para reformular este modelo a uno lineal, que nos permitiera alcanzar soluciones óptimas y conocer la calidad de las soluciones obtenidas con el modelo MINLP.

4.1 LINEALIZACIÓN DEL MODELO MINLP

Para esta reformulación se utilizaron los mismos conjuntos definidos para el modelo MINLP, es decir: I (plantas), J (centro de distribución), K (minoristas), agregándose además el conjunto denotado como B , correspondiente a la colección de todos los subconjuntos posibles del conjunto K .

A cada elemento de este conjunto se llamó b_1, b_2, \dots, b_n , donde

$$b_n \subseteq K; \quad b_\gamma \cap b_\delta = \emptyset; \quad \forall \gamma \neq \delta;$$

VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables necesarias para este modelo son:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{Si se localiza un centro de distribución en el} \\ & \text{sitio candidato } j, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del centro de distribución localizado} \\ & \text{en el sitio candidato } j \text{ es asignada a la planta } i, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$W_{jb} = \begin{cases} 1 & \text{Si el centro de distribución } j \text{ es usado para} \\ & \text{servir el conjunto de clientes en } b, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$O_{bij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la planta } i \text{ abastece al centro de distribución } j \\ & \text{encargado de servir al conjunto de clientes en } b, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

4.1.1 MODELO MILP

Lo anterior nos permite reformular el modelo original (3.3) - (3.13) a un modelo de programación lineal entera mixta. Se hará referencia a él como MILP en capítulos posteriores.

FUNCIÓN OBJETIVO: Linealización del costo total del sistema, función 3.2.

$$\begin{aligned} \text{mín.} \sum_{j \in J} \left(u_j X_j + \beta \lambda \sum_{b \in B} \sum_{k \in b} \mu_k c_{jk} W_{jb} + \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \left(\sqrt{2\theta h \lambda \sum_{k \in b} \mu_k (f_j + \beta g_{ij})} \right. \right. \\ \left. \left. + \beta \lambda \sum_{k \in b} \mu_k a_{ij} + \theta h z_\alpha \sqrt{\sum_{k \in b} v_k l_{ij}} \right) O_{bij} \right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Nótese que siguen existiendo términos no lineales, sin embargo ahora sólo involucran parámetros y no variables. Para evitar confusiones, tales términos son sustituidos por el parámetro T_{bij} que representará el costo generado por la distribución en el primer nivel de la cadena y por mantener inventario.

$$T_{bij} = \sqrt{2\theta h \lambda \sum_{k \in b} \mu_k (f_j + \beta g_{ij})} + \beta \lambda \sum_{k \in b} \mu_k a_{ij} + \theta h z_\alpha \sqrt{\sum_{k \in b} v_k l_{ij}}$$

La función (4.1) queda expresada de la siguiente manera:

$$\text{mín.} \sum_{j \in J} \left(u_j X_j + \beta \lambda \sum_{b \in B} \sum_{k \in b} \mu_k c_{jk} W_{jb} + \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} T_{bij} O_{bij} \right) \quad (4.2)$$

RESTRICCIONES

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in b | b \in B} W_{jb} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{ij} = X_j \quad \forall j \in J \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in J} q_j Z_{ij} \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (4.5)$$

$$\sum_{k \in b | b \in B} \mu_k \lambda W_{jb} \leq q_j X_j \quad \forall j \in J \quad (4.6)$$

$$O_{bij} \geq W_{jb} + Z_{ij} - 1 \quad \forall b \in B, i \in I, j \in J \quad (4.7)$$

$$X_j, W_{jb}, Z_{ij}, O_{bij} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, i \in I, j \in J \quad (4.8)$$

La restricción (4.3) fuerza a asignar a los minoristas a un único subconjunto y a un único centro de distribución. La expresión (4.4) representa asignación única de todos los centros de distribución abiertos a plantas. Las restricciones (4.5) y (4.6) evitan sobrepasar la capacidad de plantas y centro de distribución, respectivamente.

La variable O_{bij} puede ser vista como el indicador de activación de arcos entre ambos niveles de la cadena, mostrando tal función en la restricción (4.7) al relacionar los enlaces de plantas a centros de distribución ($Z_{ij} = 1$) y de éstos a clientes ($W_{jb} = 1$). Para finalizar, la restricción (4.8) establece la naturaleza de las variables de decisión.

4.1.2 DIMENSIONES DEL MODELO

Variables binarias: $|J| \cdot (1 + 2^{|K|} + |I| \cdot (1 + 2^{|K|}))$

Restricciones: $|K| + |I| \cdot (1 + |J| \cdot (2^{|K|})) + 2 \cdot |J|$

La expresión $2^{|K|}$ corresponde a la cardinalidad del conjunto potencia del conjunto de clientes K , el cual provoca que el número de restricciones y variables crezcan de manera exponencial. Para aminorar un poco el número de elementos, se elimina de manera previa aquellos subconjuntos b imposibles de satisfacer. Lo anterior significa que se descarta el conjunto vacío y los conjuntos de clientes con demandas mayores a la soportada por el centro de distribución de mayor capacidad.

Como se apreciará en el capítulo de experimentación, a pesar de la simplificación de subconjuntos, la resolución de manera exacta sólo pudo realizarse con casos pequeños, de pocos elementos en sus conjuntos. Lo anterior motivó la búsqueda de una mejor modelación que permitiera la solución de casos más grandes. La nueva modelación se muestra en la siguiente sección.

4.2 REFORMULACIÓN DEL MODELO MILP

La tercera formulación del problema surgió de la necesidad de recurrir a un preprocesamiento. Con esto se pretende simplificar el manejo de la información a manera de facilitar la resolución del modelo al ingresarlo al optimizador.

En ocasiones, dependiendo de los valores de algunos parámetros, es posible deducir cuándo algunas condiciones son imposibles de ocurrir dentro de la resolución de un modelo, permitiéndonos fijar con antelación el valor de algunas variables. En nuestro caso, esto sucede al generar los subconjuntos posibles de clientes.

Se procedió a considerar únicamente aquellos subconjuntos de clientes pertenecientes al conjunto B que pueden ser realmente atendidos. A diferencia del preprocesamiento del modelo anterior, se decidió además, asignar los subconjuntos factibles a cada uno de los centros de distribución con la capacidad de abastecerlos. Obviamente, para un subconjunto, la consideración de ser atendido o no por un centro de distribución en específico depende de si la cantidad de producto que demanda es menor que la capacidad de atención de la instalación en cuestión. Teniendo en cuenta esto, el número de elementos a tratar disminuye sustancialmente.

Con lo anterior definimos un nuevo concepto: estrella. Este concepto consiste en un subconjunto de clientes asignado a alguno de los centros de distribución con la suficiente capacidad para soportar la demanda conjunta de los clientes que lo integra.

CONJUNTOS

En la reformulación del modelo MILP, intervienen los siguientes conjuntos:

K : Conjunto de minoristas indexados por k .

J : Conjunto de ubicaciones potenciales para un centro de distribución, indexados por j .

I : Conjunto de plantas indexadas por i .

r : Subconjunto de clientes asignados a un centro de distribución en específico, también se le hará referencia por el nombre de estrella.

R : Conjunto de todas las posibles estrellas.

VARIABLE DE DECISIÓN

En este modelo la decisión a tomar consiste sólo en escoger estrellas y asignarlas a una planta.

$$E_{ir} = \begin{cases} 1 & \text{Si la planta } i \text{ abastece a la estrella } r, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

EJEMPLO

Supongamos un caso conformado por 2 plantas, 7 centros de distribución y 9 clientes. Supongamos además, que la demanda de los clientes es alta y la capacidad de almacenamiento de los centros es pequeña y únicamente son posibles tres estrellas (representadas gráficamente por nubes en la figura 4.1). Las estrellas se integran de la siguiente manera:

1. Estrella 1: formado por los clientes 4, 8, 9 y centro 1.
2. Estrella 2: formado por los clientes 1, 2, 3, 7 y centro 6.
3. Estrella 3: formado por los clientes 5, 6 y centro 5.

La solución óptima se muestra en la figura 4.1. Las estrellas 1 y 2 son asignadas a la planta 1, la estrella 3 es asignada a la planta 2. Este es un caso trivial, ya que solamente se designó a cada estrella una planta. Para casos estudiados

posteriormente, se tienen más de una estrella, se escogerán aquellas que permitan selección única de centro de distribución y asignación única de centros y plantas.

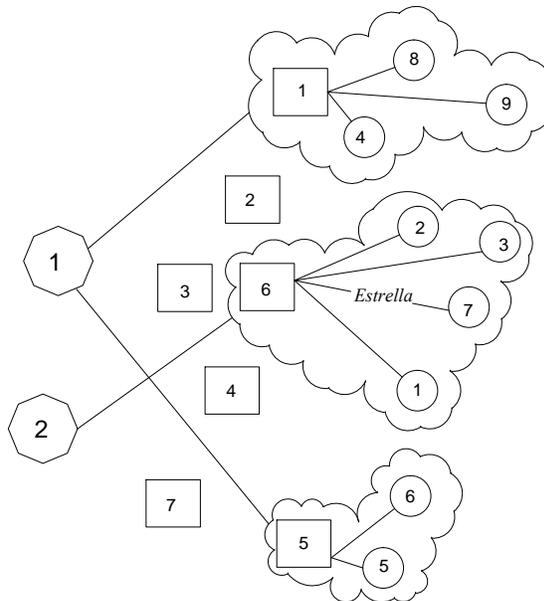


Figura 4.1: Asignación de estrellas

4.2.1 MODELO BLP

El modelo obtenido es un modelo de programación lineal entera binaria, haremos referencia a él como BLP.

FUNCIÓN OBJETIVO: Minimizar los costos totales ponderados generados al seleccionar estrellas y asignarlas a plantas.

$$\text{mín.} \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} C_{ir} E_{ir} \quad (4.9)$$

Donde C_{ir} es el costo de asignación planta-estrella, está en función de los elementos definidos por la estrella y por la planta en cuestión, volviéndose un parámetro y linealizando a su vez la función objetivo. Incluye el costo de instalación de centros de distribución, inventario y transporte de productos dentro de los dos niveles de la cadena.

$$C_{ir} = u_{j_r} + \beta\lambda \sum_{k \in r | r \in R} \mu_k c_{j_r k} + \sqrt{2\theta h D_{j_r} \left(f_{j_r} + \beta \sum_{i \in I} g_{ij_r} \right)} + \beta a_{ij_r} D_{j_r} + \theta \lambda h z_\alpha \sqrt{s_j T_j}$$

RESTRICCIONES

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in r | r \in R} E_{ir} \geq 1 \quad \forall k \in K \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in r | r \in R} E_{ir} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (4.11)$$

$$\sum_{r \in R} q_r E_{ir} \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (4.12)$$

$$E_{ir} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (4.13)$$

Donde:

j_r : Centro de distribución que atiende a la estrella r .

q_r : Capacidad de producción del centro de distribución asociado a la estrella r .

La restricción (4.10) obliga que los clientes sean asociados al menos a una estrella. La restricción (4.11) evita que los centros de distribución sean asignados a más de una estrella seleccionada, caso contrario significaría duplicidad en el costo de instalación del centro de distribución, pues tal ya se encuentra involucrado en C_{ir} . Por otra parte, la ausencia de esta condición también provocará sobredemanda en los centros de distribución, recordemos que cada estrella ya se encuentra designada a un centro, según la demanda de uno y la capacidad del otro por lo que, al seleccionar estrellas atendidas por un mismo centro, sus demandas conjuntas podrían sobrepasar la capacidad de ese centro. La desigualdad (4.12) evita que la capacidad

del centro atendidos por cada planta exceda su capacidad de producción. Por último, la restricción (4.13) expresa la naturaleza binaria de la variable de asignación.

4.2.2 DIMENSIONES DEL MODELO

Variables binarias: $|J| \cdot |I| \cdot (2^{|K|} - 1)$

Restricciones: $|K| + |I| + |J|$

El número máximo de estrellas es la cantidad de subconjuntos no vacíos posibles de clientes por la cardinalidad del conjunto J .

$$|J| \cdot (2^{|K|} - 1)$$

Como se verá en el capítulo de experimentación, generalmente esta cifra nunca es alcanzada, disminuyendo incluso en un 98%. Es necesario hacer notar que el porcentaje de disminución depende de la cardinalidad de los conjuntos involucrados, es decir, la cantidad de clientes y de centros de distribución, así como de la proporción entre las capacidades de los centros y la demanda de los clientes.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo, primeramente se evaluarán los modelos formulados para encontrar el más conveniente, ya sea por tiempo computacional, alcance de optimalidad o por el tamaño de caso que logra resolver. Una vez encontrado el mejor modelo, se realiza un análisis de las soluciones obtenidas para un grupo de casos.

En la tercera sección se explica el experimento que permitió evaluar la influencia de la ponderación dada al inventario y el transporte, así como el nivel de servicio deseado en el diseño real de la cadena de suministro, es decir, se realiza un análisis de sensibilidad.

En la cuarta sección se enuncian algunas estadísticas del modelo seleccionado. Se finaliza con una evaluación de casos para mostrar la influencia de la consideración de múltiples plantas en la configuración de red.

5.1 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS FORMULADOS

La evaluación de los modelos consistió en la resolución de casos de prueba bajo los tres distintos modelos, ingresándolos a optimizadores comerciales. La generación de los casos fue realizada a través de un programa codificado en C++. A continuación se explica la forma de generación de los datos.

5.1.1 GENERACIÓN DE CASOS DE PRUEBA

CONJUNTOS

Los casos de prueba están determinados por el tamaño de sus conjuntos, es decir, el número de plantas, centros de distribución potenciales y clientes. Se determinó variar estos valores de la siguiente forma:

Plantas: $3 \leq |I| \leq 6$

Centros de distribución: $3 \leq |J| \leq 7$

Clientes: $4 \leq |K| \leq 12$

PARÁMETROS

Los valores de los parámetros fueron determinados tratando de seguir situaciones reales, otros fueron elegidos en forma aleatoria cuidando la factibilidad del problema.

Recordemos que los minoristas tienen una demanda incierta μ_k , la cual fue modelada como una variable aleatoria con distribución normal en un intervalo de 5 a 60 unidades, mientras que la varianza v_k se definió en un rango de 1 a 6 unidades.

Referente a los centros de distribución, estos tienen una capacidad fija q_j definida de manera aleatoria de la siguiente manera: $\max_k \{\mu_k \lambda\} \leq q_j \leq 0.5 \sum_{k \in K} \mu_k \lambda$.¹ Lo anterior significa que, para cada centro de distribución se definió una capacidad que permitiera tener la posibilidad de atender al cliente con mayor demanda hasta incluso la mitad de la demanda total anual. Dado que la generación de los valores fue aleatoria, lo anterior no asegura que la suma de las capacidades de los centros potenciales puedan atender la demanda total, cuando esto no sucede se incrementa la capacidad de cada centro en un 20 %, es decir, $q_j = 1.20q_j$. La capacidad, además nos permite establecer el costo por localizar los centros u_j en la siguiente relación:

¹ λ : Representa la cantidad de días laborados en el año.

$[0.45q_j]$. Donde la función $\lceil a \rceil$ devuelve el mínimo número entero no inferior a a , es decir $\min\{v \in \mathbb{Z} \mid a \leq v\}$. Por otro lado, cada centro cuenta con un costo fijo por colocar una orden f_j , este valor es un entero entre el rango de $[40, 150]$.

Los costos de transportación de productos también se establecieron de manera aleatoria con probabilidad uniforme. Para el costo fijo g_{ij} dentro del primer nivel de la cadena se definió un valor entero en el rango de $[25, 70]$ y para el costo variable a_{ij} en el intervalo de $[2, 12]$, para el segundo nivel de la cadena se definió un costo unitario c_{jk} en el rango de $[1, 7]$.

En relación a las plantas, cada una cuentan con una capacidad de producción p_i definida en el intervalo $\left[\left(1.5 \sum_{k \in K} \mu_k \lambda\right) / |I|, \sum_{k \in K} \mu_k \lambda \right]$. Si la capacidad de producción total no es suficiente para abastecer la demanda total, las capacidades de todas las plantas se incrementa al doble es decir: $p_i = 2p_i$. En la tabla 5.1 se indican los valores de los demás parámetros utilizados.

Parámetro	Valor
Transporte (β)	1
Inventario (θ)	1
Nivel de servicio ($z_{1-\alpha}$)	1.645
Días trabajados (λ)	360
Cto. Por mantener inventario (h)	1

Tabla 5.1: Valores de los parámetros utilizados en la evaluación de los modelos.

5.1.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la evaluación de los modelos se utilizó GAMS 22.8, *software* de modelación algebraica con interface a varias librerías de optimización. En el apéndice C.1 se podrá encontrar una reseña de dicho modelador.

Se escogieron ocho casos de pruebas evaluados en los tres modelos matemáticos presentados. La experimentación se realizó en una terminal con procesador sun fire

V440, conectado a 4 procesadores de 1602 Hhz, ultra sparc III con 1 MB de cache y memoria de 8 GB.

Los optimizadores de modelos no lineales son sensibles a los valores de los parámetros algorítmicos, tales como número de iteraciones, tiempo límite para la solución de los subproblemas, valores iniciales, criterio de parada, etc. En ocasiones es difícil encontrar soluciones factibles, incluso en casos que lo son. Por lo que fue necesario experimentación previa que nos pudiera indicar el mejor optimizador para el modelo MINLP, así como el mejor valor de los parámetros implicados. Tal experimentación consistió esencialmente de un preprocesamiento. La importancia de dicha etapa en los modelos no lineales se explica a detalle en [53] y [9].

Para la solución de nuestro modelo no lineal entero mixto, fue seleccionado GAMS/AlphaECP, debido a que mostró mejor desempeño respecto de DICOPT, optimizador del cual también se tiene acceso. AlphaECP es una implementación del método extendido de planos cortantes, asegura optimalidad global en problemas MINLP convexos y pseudo convexos. Para los modelos MILP y BLP, se utilizó el optimizador Cplex 11.1.1. Se presentan las características de ambos optimizadores en el apéndice C.

En la tabla 5.2 se resumen los resultados obtenidos de la evaluación de los modelos. En la primera columna se indica el tamaño del caso de prueba, siendo el primer número la cantidad de plantas, el siguiente es la cantidad de centros de distribución potenciales y el último es el número de minoristas a atender. El número entre paréntesis es la semilla utilizada para generar los parámetros aleatorios.

Para cada modelación se expresa el valor de la función objetivo, indicado en la columna con etiqueta F.O., y el estatus de la solución indicado en la columna con etiqueta E.S. Si en el estatus de una solución aparece la palabra “entera” significa que se logró encontrar una solución entera factible, pero no óptima.

Para el problema original MINLP, el valor de la función objetivo de todos los casos evaluados, es mayor que los valores de las soluciones de los demás modelos,

debido a que la solución óptima no es alcanzada. Aún con preprocesamiento, el modelo MINLP sólo logra obtener soluciones factibles que alcanzan una diferencia de hasta 30 % con respecto a la soluciones óptimas. Presenta además, dos casos que los clasifica como infactible, a pesar de no serlo (caso 2-7-9(164) y el caso 3-8-20(65)).

CASO	MINLP		MILP		BLP (Estrella)	
	F.O.	E.S.	F.O.	E.S.	F.O.	E.S.
2-3-4(4)	\$2 916 073.08	entera	\$2 001 845.04	óptima	\$2 001 845.04	óptima
3-4-6(5)	\$3 102 717.23	entera	\$2 837 904.29	óptima	\$2 837 904.29	óptima
3-4-6(346)	\$3 418 570.79	entera	\$2 926 014.43	óptima	\$2 926 014.43	óptima
5-6-8(100)	\$6 726 553.06	entera	\$5 561 617.07	óptima	\$5 561 617.07	óptima
2-7-9(164)	–	infactible	\$7 030 462.35	óptima	\$7 030 462.35	óptima
4-12-8(536)	\$9 855 572.17	entera	\$4 422 474.79	óptima	\$4 422 474.79	óptima
5-6-10(100)	\$7 662 481.56	entera	\$6 247 786.70	óptima	\$6 247 786.70	óptima
6-7-12(5)	\$7 124 274.82	entera	–	–	\$6 605 868.49	óptima

Tabla 5.2: Valor objetivo para los casos de prueba

Los modelos MILP y BLP, por otro lado, alcanzan valores óptimos, sin embargo sólo el modelo BLP, es capaz de resolver todas los casos de prueba. Recordemos que el conjunto de clientes produce un crecimiento exponencial en el número de variables y en el número de restricciones y por tanto, para más de 10 clientes, el modelo MILP se vuelve computacionalmente intratable.

En la tabla 5.3 se presenta el número de elementos: variables binarias y restricciones, para cada caso de prueba en los tres modelos. Para el modelo BLP se indica el máximo posible de variables y el número que realmente se presenta al aplicar el preprocesamiento, obsérvese que conforme crece el tamaño de los conjuntos, se logra una disminución importante en el número de variables.

CASO	MINLP		MILP		BLP (Estrella)		
	VB	R	VB	R	Máx VB	VBP	R
2-3-4(4)	21	21	153	108	90	70	9
3-4-6(5)	40	29	1 040	785	756	360	13
3-4-6(346)	40	29	1 040	785	756	438	13
5-6-8(100)	84	43	9 252	7 705	7 650	1 425	19
2-7-9(164)	84	46	10 773	7 193	7 154	1 102	18
4-12-8(536)	156	72	15 420	12 324	12 240	2 604	24
5-6-10(100)	96	45	36 900	30 747	30 690	10 741.5	21
6-7-12(5)	133	53	20 0753	172 064	171 990	60 196.5	25

Abreviaturas: VB.: Variables binarias, R.: Restricciones, VBP.: VB presentadas

Tabla 5.3: Número de elementos en los casos de prueba

La tabla 5.4 resume los tiempos de cómputo necesarios para cada uno de modelos. Se especifican dos tiempos, el primero titulado como T hace referencia al tiempo necesario para el preproceso, compilación y ejecución del modelo, el segundo es el tiempo de optimización. Las unidades se encuentran expresadas en segundos salvo que indique lo contrario.

CASO	MINLP		MILP		BLP	
	T	Solver	T	Solver	T	Solver
2-3-4(4)	0.11	318	0.15	0.15	0.09	0.05
3-4-6(5)	0.24	5 835	0.05	1.79	0.08	0.05
3-4-6(346)	0.21	1 379	0.05	2.47	0.09	0.08
5-6-8(100)	0.30	1 580	0.18	443.56	2.18	0.89
2-7-9(164)	0.08	4 571	0.32	92.06	11.57	0.43
4-12-8(536)	0.39	7 565	0.30	348.25	9.13	0.19
5-6-10(100)	0.30	4 926	1.03	16 h	33.91	2.08
6-7-12(5)	0.05	711	–	–	2 h	3.23

Tabla 5.4: Tiempo computacional de los casos evaluados

Mientras que el tiempo requerido por el preprocesamiento, compilación y ejecución en los modelos MINLP y MILP es prácticamente despreciable, para el modelo BLP incrementa de manera considerable conforme incrementa el tamaño del caso de prueba, lo cual es causado por el incremento exponencial del número de estrellas. Es importante hacer mención que esto también es resultado de haber realizado el preprocesamiento, es decir, la eliminación de subconjuntos infactibles en el modelador. GAMS tiene integradas funciones especiales para el manejo de conjuntos, que lenguajes como C o Pascal no cuentan, facilitando enormemente la programación, pero a un costo elevado en cuanto a tiempo de ejecución. El preprocesamiento necesario para el modelo lineal binario es un ejemplo de lo anterior.

5.1.3 CONCLUSIÓN

Se seleccionó el modelo BLP, dado que su ventaja es evidente frente a los otros dos modelos, tanto en el logro de optimalidad, el tiempo de solución y porque permite resolver casos de tamaños mayores que los modelos anteriores.

Para aminorar el tiempo de cómputo, se decidió programar el preprocesamiento en C++, en el cual se eliminan los subconjuntos de clientes infactibles y se calculan los parámetros de cada estrella (media y varianza de la demanda y costo por asignarlos a las plantas). Una vez obtenidos los elementos factibles se ingresa el caso a GAMS.

5.2 EVALUACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE RED

A continuación se comprueba la obtención de la mejor configuración de red. Para ello, inicialmente se analizan los resultados de casos de pruebas evaluados en el modelo BLP. Dicho análisis conduce a una pequeña modificación en los modelos que será explicada en el apartado final de la sección.

5.2.1 EJEMPLO DE UN CASO DE PRUEBA EVALUADO EN EL MODELO BLP

Primeramente se analizará la solución obtenida para un caso de prueba evaluado en el modelo seleccionado, el modelo BLP. En la figura 5.1 se muestra el caso analizado, se forma de dos plantas, siete centros de distribución y nueve clientes, representados gráficamente por octágonos, cuadrados y círculos, respectivamente.

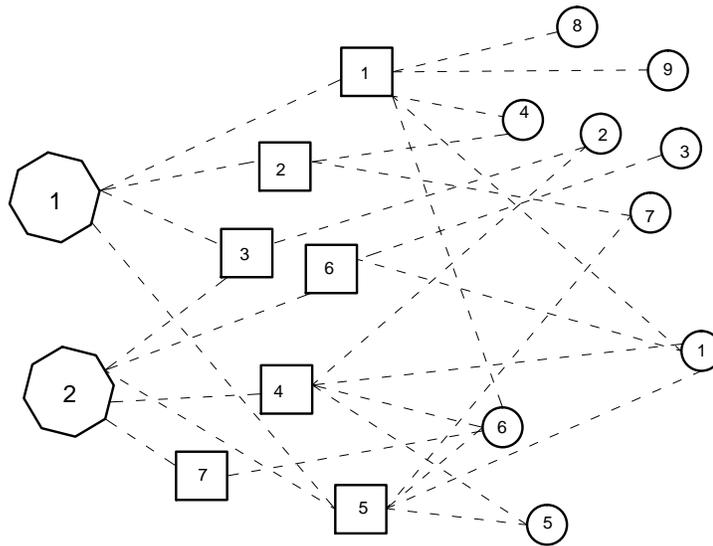


Figura 5.1: Caso de prueba analizado

Se desea encontrar el número óptimo de centros de distribución a abrir, de manera que la demanda sea atendida en su totalidad con un 95% de probabilidad, lo que implica un valor de 1.65 para el parámetro $z_{1-\alpha}$. También se desea seleccionar la mejor asignación (líneas discontinuas) entre los niveles de la cadena. En el apéndice A se muestran los datos requeridos para obtener la solución de este ejemplo.

El valor obtenido de la función objetivo es de \$7 030 462.36 e involucra la apertura de cuatro centros de distribución: el número 2, 4, 5 y 6. Cada uno tiene asignado un conjunto de clientes, la suma de la demanda media de éstos conforman la demanda atendida por cada centro, este parámetro aparece en la tercera columna

de la tabla 5.5. Por ejemplo, la demanda atendida por el centro de distribución 2, se forma de la suma de las demandas anuales de los clientes 4, 8 y 9. Obsérvese que el porcentaje de utilización es alta para 3 de los 4 centros de distribución abiertos.

CD (j)	Clientes (k)	Capacidad del CD	Demanda atendida	% de capacidad utilizada
2	4, 8, 9	41 133	40 680	98.89 %
4	1, 6	36 687	34 920	95.18 %
5	5	36 657	23 760	64.81 %
6	2, 3, 7	48 880	48 600	99.42 %

Tabla 5.5: Asignación en el segundo nivel de la cadena

La tabla 5.6 muestra las asignaciones realizadas en el primer nivel de la cadena. Los parámetros a analizar son:

- Capacidad anual de producción de las plantas seleccionadas.
- Demanda máxima a atender: determinada por la capacidad de almacenamiento de cada centro de distribución asignado a la planta.
- Demanda real atendida: la demanda de los clientes adscritos a los centros de distribución abastecidos por la planta.
- Capacidad ociosa: excedente de producto en la planta, es la diferencia entre la capacidad de producción de la planta y la cantidad real de producto demandado.
- Capacidad utilizada (%): el interés en este parámetro es descubrir el porcentaje de utilización de la capacidad en las plantas. Se distinguieron dos tipos: la primera (estimada) es con referencia a la demanda máxima posible, la segunda (real) hace alusión a la demanda real a atendida.

Plantas <i>i</i>	CD <i>j</i>	Capacidad de producción	Demanda máxima a atender	Demanda real abastecida	Capacidad ociosa	Capacidad utilizada	
						(estimada)	(real)
1	4, 5	76 273	73 344	58 680	17 593	96.16 %	76.93 %
2	2, 6	99 910	90 013	89 280	10 630	90.09 %	89.36 %
Promedio:						93.13 %	83.15 %

Tabla 5.6: Asignación en el primer nivel de la cadena

Nótese que existe una diferencia promedio de 10 % entre la capacidad estimada y la capacidad real utilizada. Además, el total de la capacidad ociosa es de 28 223, que es una cantidad importante.

5.2.2 MODIFICANDO LOS MODELOS PROPUESTOS

Tratando de disminuir las cifras mostradas en el apartado anterior, se decidió probar una modificación a la restricción que impide sobrepasar la capacidad de plantas. La finalidad es considerar dentro de la selección de centros y la asignación de los mismos a plantas, la demanda de los clientes asignados y no la capacidad máxima de los centros.

MODELO BLP

Para el modelo BLP (4.10)-(4.13) se modifica la restricción (4.12). Con la introducción del parámetro δ_r , que representa la demanda de los clientes asignados a la estrella r , la restricción modificada queda expresada de la siguiente manera:

$$\sum_{r \in R} E_{ir} \delta_r \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (5.1)$$

Al resolver el caso de prueba 2-7-9 (figura 5.1) con la restricción modificada, se obtiene una función objetivo con el valor de \$6 651 657.44. Las tablas 5.7 y 5.8 muestran la solución obtenida, desglosada de manera separada para el segundo y primer nivel de cadena respectivamente.

CD (j)	Clientes (k)	Capacidad del CD	Demanda atendida	% de capacidad utilizada
1	5, 8	58 389	45 000	77.07 %
2	1, 4, 9	41 133	35 280	85.77 %
5	6	36 657	19 080	52.05 %
6	2, 3, 7	48 880	48 600	99.43 %

Tabla 5.7: Configuración en el segundo nivel de la cadena obtenida con el modelo BLP modificado

El número de centros de distribución abiertos es el mismo, sin embargo son diferentes los centros seleccionados, como consecuencia la configuración de red también es diferente a la configuración obtenida con la solución anterior. A pesar de obtener un mejor diseño de red (por implicar un menor costo) la capacidad utilizada de los centros abiertos es en promedio menor a la capacidad utilizada con la configuración previa. Caso contrario en las plantas, las cuales incrementa su porcentaje de uso, aunque en un porcentaje bajo.

Plantas i	CD j	Capacidad de producción	Demanda máxima a atender	Demanda real abastecida	Capacidad Ociosa	Capacidad utilizada (estimada)	Capacidad utilizada (real)
1	5, 6	76 273	85 537	67 680	8 593	112.15 %	88.73 %
2	1, 2	99 910	99 522	80 280	19 630	99.61 %	80.35 %
Promedio						105.88 %	84.54 %

Tabla 5.8: Asignación en el primer nivel de la cadena con el modelo modificado

Se puede observar en la tabla 5.8 que la capacidad de la planta 1 es, en teoría, sobrepasada al abastecer los centros 5 y 6 en un 12.15 %, razón por la que es considerada como una solución infactible para el modelo BLP original. Debido a que las capacidades de los centros no son aprovechadas en su totalidad, los centros 5 y 6 en realidad representan un 88.73 % de la capacidad de producción de la planta, lo que convierte a la solución como factible y óptima. Es necesario hacer notar que no existe cambio en la cantidad de producto sobrante en las plantas, teniendo un total de 28 223, al igual que la configuración anterior, esto debido a que son las mismas

plantas seleccionadas abasteciendo la misma cantidad de demanda. A pesar de esto el porcentaje de uso de cada planta es un poco mayor. La figura 5.2 muestra las configuraciones obtenidas.

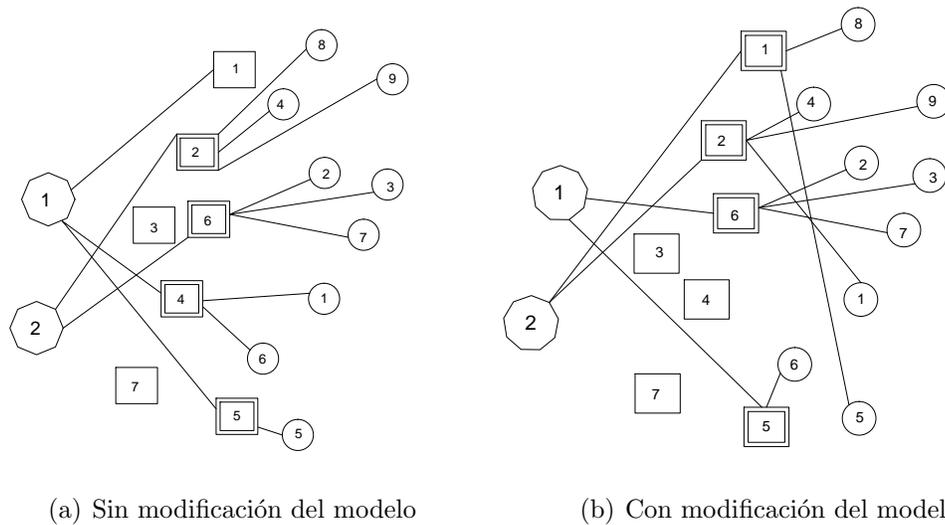


Figura 5.2: Configuración de red para el caso 279

En la tabla 5.9 se presentan los resultados obtenidos al evaluar los casos del experimento anterior con el modelo BLP original y con la restricción de capacidad de plantas modificada. La primera columna indica el caso de estudio, expresándose la cantidad de plantas, centros de distribución, clientes y la semilla de generador de parámetros aleatorios, respectivamente. En la segunda columna, se muestra para cada caso el valor de la función objetivo, la primera fila corresponde a la función objetivo obtenida en el modelo BLP original, la segunda fila corresponde al valor obtenido con el modelo modificado. La última columna indica la configuración de red resultante expresada por arcos.² El primer valor, corresponde a la planta, el segundo al centro de distribución, seguido por los clientes que toman la notación de “k” más el número del cliente.

²Entiéndase por arcos a los enlaces entre una planta a un centro de distribución y de éste a un conjunto de clientes

CASO	FO	CONFIGURACIÓN DE RED
2-3-4(4)	\$2,001,845.04	(1, 3, k2, k3, k4)(2, 2, k1)
	\$2,001,845.04	(1, 3, k2, k3, k4)(2, 2, k1)
3-4-6(5)	\$2,837,904.29	(1, 2, k4) (1, 1, k5, k6) (2, 3, k1, k2, k3)
	\$2,837,904.29	(1, 2, k4) (1, 1, k5, k6) (2, 3, k1, k2, k3)
3-4-6(346)	\$2,926,014.44	(1, 2, k2, k3, k4) (2, 3, k1, k5, k6)
	\$2,926,014.44	(1, 2, k2, k3, k4) (2, 3, k1, k5, k6)
5-6-8(100)	\$5,561,617.07	(1, 6, k8) (2, 5, k6, k7) (3, 4, k1, k4, k5) (4, 2, k2, k3)
	\$5,402,643.54	(2, 5, k6, k7) (3, 4, k1, k4, k5) (4, 2, k2, k3) (4, 6, k8)
2-7-9(164)	\$7,030,462.36	(1, 5, k5) (1, 4, k1, k6) (2, 6, k2, k3, k7) (2, 2, k4, k8, k9)
	\$6,651,657.44	(1, 5, k6) (1, 6, k2, k3, k7) (2, 1, k5, k8) (2, 2, k1, k4, k9)
4-12-8(536)	\$4,422,474.80	(1, 10, k1) (1, 8, k2, k6) (2, 3, k3, k5) (3, 6, k8) (4, 2, k4, k7)
	\$4,193,184.15	(1,8,k1, k2) (2, 3, k3, k5) (2, 5, k7) (3, 6, k8) (4, 2, k4, k6)
5-6-10(100)	\$6,247,786.71	(2, 1, k1, k2, k6) (2, 6, k4, k8, k9) (3, 4, k3, k7) (4, 2, k5, k10)
	\$6,247,786.71	(2, 1, k1, k2, k6) (2, 6, k4, k8, k9) (3, 4, k3, k7) (4, 2, k5, k10)
6-7-12(5)	\$6,605,868.49	(1, 1, k1) (1, 7, k10, k12) (2, 3, k4, k11) (4, 2, k6) (4, 6, k2, k3, k9) (6, 5, k5, k7, k8)
	\$6,503,990.15	(1,7,k3.k10.) (2, 3, k2, k5, k11) (4, 2, k6, k8) (4, 6,k1, k9) (6, 4, k7) (6, 5, k4, k12)

Tabla 5.9: Comparación entre soluciones

No en todos los casos la restricción modificada implica una diferente configuración, sin embargo las veces en que sí afecta, lo hace mejorando el valor de la función objetivo. Para nuestros casos de prueba, la mitad de ellos mostraron mejor configuración de red (casos resaltados en la tabla 5.9).

MODELO MINLP

La modificación en el modelo MINLP únicamente requiere sustituir en la restricción (3.6) el parámetro q_j por D_j , que representa la demanda atendida por el centro de distribución j . Ésta es definida como la suma de la demanda de los clientes adscritos al centro j , restricción (3.7) del modelo MINLP. La restricción modificada

adquiere la siguiente forma:

$$\sum_{j \in J} D_j Z_{ij} \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (5.2)$$

El problema en la restricción (5.2) consiste en que la función se vuelve no lineal. Se presenta la multiplicación de las variables D_j y Z_{ij} lo que agrega aún más complejidad al modelo MINLP.

MODELO MILP

Para este modelo, la modificación presenta el mismo inconveniente que el modelo MINLP. Obsérvese que la restricción modificada (5.3), también es una función no lineal. Con esto se pierde el objetivo original de esta modelación, que fue linealizar el modelo inicial.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in b | b \in B} \mu_k \lambda W_{jb} Z_{ij} \leq p_i \quad \forall i \in I \quad (5.3)$$

5.2.3 CONCLUSIÓN

La modificación a la restricción de capacidad de plantas, para considerar la demanda que realmente provee a los centros de distribución, más allá de evitar sobrantes en la capacidad de producción de las plantas seleccionadas, lo que nos permite es ampliar el espacio de búsqueda de las soluciones. Permite acceder a posibles configuraciones (asignaciones planta-centros-clientes) mejores, que son descartadas por considerar una capacidad que generalmente no es alcanzada. Aunque se continúa teniendo capacidad ociosa en las plantas, está es en menor porcentaje, lo cual en realidad es conveniente para lidiar con la fluctuaciones de la demanda, además de que su existencia no se encuentra penalizada por algún costo.

Ingresar la modificación a los modelo MINLP y MILP complican su estructura, sólo el modelo BLP mantiene la linealidad en las restricciones. Con este argumento, aunado a los expuestos previamente (optimalidad, tamaño de casos resueltos y tiempo de cómputo requerido) se decide optar por el modelo BLP modificado.

5.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

De acuerdo a las características propias de la cadena de suministro, tales como naturaleza del producto, demanda, calidad, entre otras muchas, el tomador de decisiones puede asignar distintos valores a las ponderaciones de inventario y del transporte, así como el nivel de servicio que desea lograr. Pero existe una interrogante a contestar: ¿Influye la ponderación del inventario, transporte y nivel de servicio en la configuración de red de la cadena de suministro? Para contestar esta pregunta se decidió realizar un diseño de experimentos factorial.

5.3.1 DISEÑO FACTORIAL

Los diseños factoriales permiten estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son válidas sobre toda la extensión de las condiciones experimentales [37]. Un nivel o tratamiento se refiere a los valores escogidos en un rango del factor a manipular, para nuestro caso, se fijaron valores para los factores de estudio, tales valores se muestran en la tabla 5.10. Los valores de 0.67 y 2.05 corresponden al 75 % y 98 % de probabilidad deseada de abasto a los clientes.

Factores	Niveles			
Transporte (β)	0.001	0.04	0.5	1
Inventario (θ)	0.003	0.1	0.8	1
Nivel de servicio (ns)	0.67	2.05		

Tabla 5.10: Factores y niveles para el análisis de sensibilidad

El diseño factorial se basa en el análisis de varianza, donde su objetivo es probar que las medias de los tratamientos son iguales, es decir, que un cambio en el factor manipulable (β , θ , ns) no causa ningún efecto en la variable de respuesta (configuración de red), lo anterior comprueba la hipótesis nula [29]. Caso contrario

con la hipótesis alterna, que comprueba la existencia de cambios en la variable de respuesta a causa de la variación de los tratamientos.

Se optó por un diseño factorial completo, el cual no tiene limitaciones en factores ni niveles y su eficacia relativa es superior a los diseños unifactoriales y bifactoriales. Además de que se basa en efectos fijos, como nuestro caso, sin embargo las conclusiones sólo se aplican a los niveles del factor considerado y no en toda la población de niveles del factor, como es el caso del modelo de efectos aleatorios.

Los casos de estudio sobre los cuales se realizará el análisis de sensibilidad, se integran de 3 o 5 plantas, 6 u 8 centros de distribución y de 10 o 15 minoristas. La tabla 5.11 muestra los 6 casos de pruebas (bloques) seleccionados.

La primera columna muestra el identificador asignado a cada caso, mientras que en la segunda columna aparece el tamaño de cada conjunto, siendo el primer valor el correspondiente al número de plantas, el segundo al número de centro de distribución y el último al número de minoristas. Para cada bloque se realizaron 3 réplicas, entendiéndose por réplicas a distintos casos de prueba del mismo tamaño. Se obtuvieron un total de 576 casos de prueba. La generación de los parámetros siguió la misma mecánica mostrada en el apartado 5.1.1.

ID	Elementos
<i>A</i>	3, 6, 10
<i>B</i>	5, 8, 10
<i>C</i>	3, 8, 10
<i>D</i>	3, 6, 15
<i>E</i>	5, 8, 15
<i>F</i>	3, 8, 15

Tabla 5.11: Casos evaluados en diseño factorial

5.3.2 RESULTADOS

La configuración de red, que es nuestro resultado de interés, está definida por el número de centros abiertos y la asignación resultante en ambos niveles de la cadena de suministro. Después de haber analizado los resultados obtenidos, descubrimos que el número de centros de distribución prácticamente permanece invariable en cada ejecución. Lo anterior no refleja realmente la influencia de los parámetros entre cada

caso. Lo que sí se altera es la elección de los centros de distribución a abrir y como consecuencia las asignaciones, provocando un cambio en el costo total obtenido.

En algunas ocasiones, se obtuvo la misma configuración de red, pero con el valor de la función objetivo diferente, dado que éste representa un costo ponderado. Una vez obtenida la configuración de red, fue necesario calcular los costos reales de la configuración. Se fijó un valor unitario a los tres factores, a manera de hacer comparables los costos independientemente de los cambios en los factores. De esta forma, nuestra variable de respuesta es el porcentaje de variación en los costos totales respecto a la mejor configuración, la de menor costo, obtenida en cada caso de estudio.

La ejecución de estos casos de prueba fue realizada en una PC con procesador Intel con 2.49 GHz y 3.5 GB RAM, bajo Windows 2002. En la tabla 5.12 se muestran los efectos producidos por la variación de los parámetros dentro de un solo grupo, de tres plantas, seis centros de distribución y diez clientes (grupo A). Las primeras tres columnas corresponden a los parámetros variados. Las siguientes columnas corresponde a las réplicas realizadas (R1, R2, R3), se muestra para cada una el porcentaje de cambio en los costos respecto al valor de la función objetivo de la mejor configuración y el número de centros de distribución a abiertos. Resultados de los demás casos se encuentra en el apéndice B.1.

Se puede observar que entre mayor sea la importancia otorgada al inventario (θ) menor es la variación de los costos de la red, por otro lado, al incrementar la importancia del transporte (β) disminuye los costos y se incrementa el número de los centros de distribución a abrir. Las filas resaltadas son aquellas en las cuales los valores de los parámetros manipulados originan la mejor configuración de red para las tres réplicas.

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	11.38 %	3	53.95 %	3	7.85 %	3
0.003	0.001	2.05	11.38 %	3	53.95 %	3	9.15 %	3
0.003	0.04	0.67	11.38 %	3	3.87 %	4	7.85 %	3
0.003	0.04	2.05	11.38 %	3	3.87 %	4	7.85 %	3
0.003	0.5	0.67	0 %	4	0 %	4	7.85 %	3
0.003	0.5	2.05	0 %	4	0 %	4	7.85 %	3
0.003	1	0.67	0 %	4	0 %	4	3.80 %	4
0.003	1	2.05	0 %	4	0 %	4	3.80 %	4
0.1	0.001	0.67	11.38 %	3	65.15 %	3	17.94 %	3
0.1	0.001	2.05	11.38 %	3	65.15 %	3	51.84 %	3
0.1	0.04	0.67	11.38 %	3	3.87 %	4	7.85 %	3
0.1	0.04	2.05	11.38 %	3	3.87 %	4	9.15 %	3
0.1	0.5	0.67	0 %	4	0 %	4	7.85 %	3
0.1	0.5	2.05	0 %	4	0 %	4	7.85 %	3
0.1	1	0.67	0 %	4	0 %	4	3.80 %	4
0.1	1	2.05	0 %	4	0 %	4	0 %	3
0.8	0.001	0.67	38.31 %	3	65.15 %	3	24.15 %	3
0.8	0.001	2.05	54.83 %	3	65.15 %	3	24.15 %	3
0.8	0.04	0.67	11.38 %	3	3.87 %	4	13.13 %	3
0.8	0.04	2.05	22.97 %	3	3.87 %	4	15.82 %	3
0.8	0.5	0.67	0 %	4	0 %	4	0 %	3
0.8	0.5	2.05	0 %	4	0 %	4	0 %	3
0.8	1	0.67	0 %	4	0 %	4	0 %	3
0.8	1	2.05	0 %	4	0 %	4	0 %	3
1	0.001	0.67	38.31 %	3	65.15 %	3	24.15 %	3
1	0.001	2.05	54.83 %	3	65.15 %	3	24.15 %	3
1	0.04	0.67	11.38 %	3	3.87 %	4	13.13 %	3
1	0.04	2.05	22.97 %	3	23.78 %	4	15.82 %	3
1	0.5	0.67	0 %	4	0 %	4	0 %	3
1	0.5	2.05	0 %	4	0 %	4	0 %	3
1	1	0.67	0 %	4	0 %	4	0 %	3
1	1	2.05	0 %	4	0 %	4	0 %	3

Tabla 5.12: Variación de parámetros en el grupo A

5.3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las respuestas de cada caso se ingresaron en *minitab*[®], *software* especial de análisis estadístico, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.13. La primera columna corresponde al factor o a la interacción de éstos bajo estudio, la segunda columna indica los grados libertad de cada uno. La columna etiquetada como SC sec es la suma de los cuadrados secuenciales de un predictor, mide el incremento de la regresión de suma de cuadrados cuando el predictor se agrega a un modelo que incluye sólo los predictores indicados antes de él [34]. En la columna MC ajust aparece el valor del cuadrado medio. El valor F es utilizado para probar la hipótesis nula y el valor P indica si una relación observada es o no estadísticamente significativa, por ejemplo, si se escogió un nivel de significancia de 1 % y si P es menor o igual a este porcentaje, la asociación es significativa.

Al observar las columnas de suma de cuadrados (SC sec. y SC ajust.) es palpable que los cambios considerables se presentan en la fuente de bloques, beta, theta y la interacción entre theta y beta, siendo el segundo de estos últimos el más notorio e influyente en los resultados.

Seleccionando un nivel de significancia de 1 % se concluye que sólo la ponderación de transporte, como la ponderación del inventario son influyentes significativamente en la configuración de red. En cuanto el valor de la interacción de betha-theta, el valor 0 en la columna P, indica evidencia de que el efecto de algún de los factores depende del nivel de otro factor, por tanto no son independientes entre sí.

Como se puede apreciar en la tabla 5.13, el nivel de servicio establecido no tiene influencia significativa en las soluciones óptimas del modelo. Dentro de los costos, el nivel de servicio afecta únicamente al inventario de seguridad, por tanto, el no tener influencia significativa, implica que la variación, incluso una variación grande (75 % - 98 %) no influye en la configuración de red, debido a que se logra un diseño satisfactorio con relación al cubrimiento de la demanda. También significa que

Análisis de varianza, utilizando SC ajustada para pruebas						
Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
Bloques	17	2.03324	2.03324	0.1196	7.62	0
theta	3	1.234	1.234	0.41133	26.21	0
beta	3	29.5314	29.5314	9.8438	627.25	0
ns	1	0.08776	0.08776	0.08776	5.59	0.018
theta-beta	9	2.28918	2.28918	0.25435	16.21	0
theta-ns	3	0.03672	0.03672	0.01224	0.78	0.505
beta-ns	3	0.0942	0.0942	0.0314	2	0.113
theta-beta-ns	9	0.17471	0.17471	0.01941	1.24	0.27
Error	527	8.27047	8.27047	0.01569		
Total	575	43.75169				
S = 0.125274 R-cuad. = 81.10 % R-cuad.(ajustado) = 79.38 %						

Tabla 5.13: Análisis de varianza para el modelo factorial de efectos fijos

el inventario de seguridad es lo suficientemente grande para abastecer la demanda durante el tiempo de reabastecimiento de productos.

Como se mencionó anteriormente, los bloques (cada caso de estudio) tienen influencia significativa en las soluciones obtenidas, lo cual es de esperarse, ya que dependiendo del número de instalaciones disponibles en cada caso (planta, instalaciones y minoristas) será la el diseño de la cadena de suministro de estudio.

Las gráficas de efectos principales son simplemente gráficas de los promedios de respuesta marginal a los niveles de los factores. Las líneas graficadas son las uniones de los medias de respuesta para cada nivel del factor, con ellas se representa el efecto de cada factor para cada respuesta. Por ejemplo, la figura 5.3 muestra las gráficas de efectos principales, una por cada factor de estudio. En el eje de las abscisas se muestran los niveles de cada factor y en el eje de las ordenadas los valores de la variable de respuesta, es decir, el cambio porcentual en los costos de la configuración de red. Los puntos de las líneas son los promedios de los factores analizados.

Se observa que la ponderación del transporte β tiene el mayor efecto en los cambios de los costos totales. Al presentar una pendiente negativa, podemos concluir que entre mayor sea la ponderación asignada al transporte menor es la diferencia del costo de la red de distribución obtenida con dicho valor respecto a la mejor configuración lograda. Lo anterior sólo se presenta en el intervalo comprendido entre los valores 0.001 y 0.5, ya que de 0.5 a 1 se logra la mejor configuración posible de red (donde la pendiente es igual a 0).

Para el caso de la ponderación del inventario θ se aprecia una influencia significativa, pero no tan marcada como β y únicamente con valores menores a 0.8. La línea de este factor presenta una pendiente positiva, lo que significa que conforme se incrementa la importancia del inventario se incurre en costos más elevados. La gráfica del nivel de servicio, por otro lado, corrobora la inexistencia de su influencia en los costo, la línea tiene una pendiente cercana a cero.

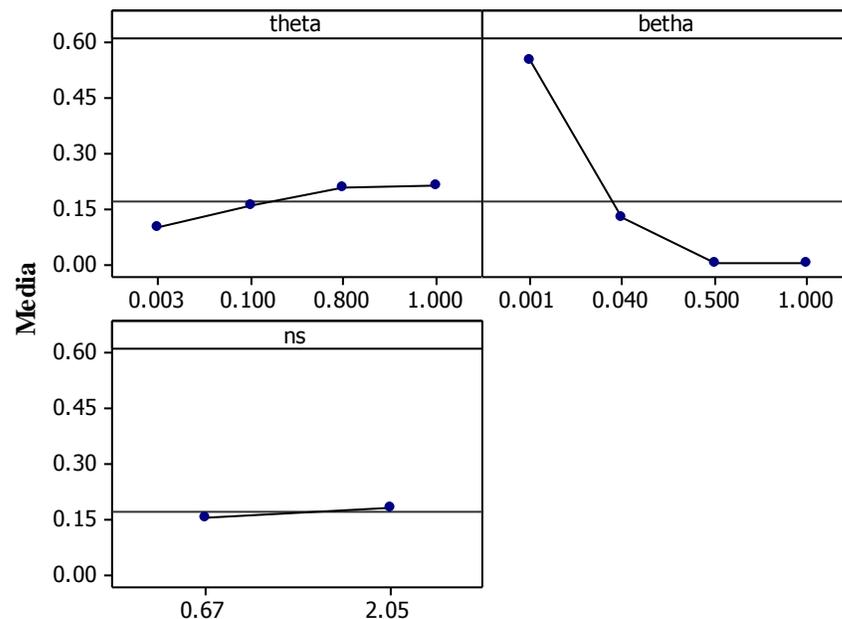


Figura 5.3: Gráfica de efectos principales

En un análisis estadístico, las gráficas de interacción muestran el impacto que ocasiona el cambio de la configuración de un factor con otro factor. Debido a

que una interacción puede aumentar o disminuir los efectos principales, evaluar las interacciones es extremadamente importante, ya que también nos permite encontrar las combinaciones de mejor rendimiento para las variables de respuesta.

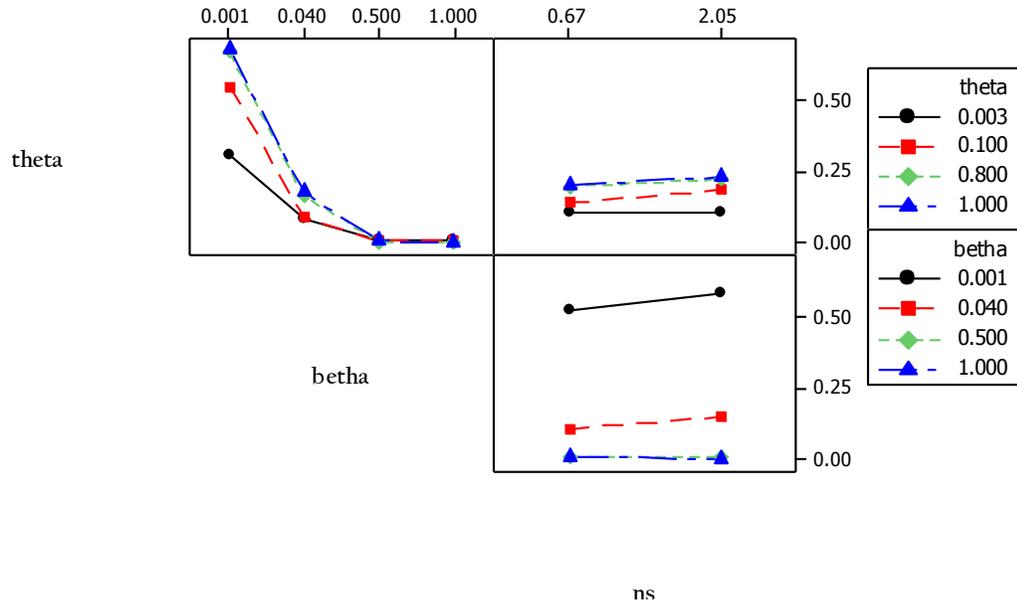


Figura 5.4: Gráfica de interacciones

La figura 5.4 muestra que no hay interacción entre el nivel de servicio e inventario (ns-theta) así como tampoco existe interacción entre el nivel de servicio y el transporte (ns-beta), pues las líneas no se cruzan en ningún momento. En relación a la combinación de transporte e inventario (beta-theta), la interacción es pequeña y sólo para los dos valores más altos de los niveles.

5.3.4 COMPROBACIÓN DE IDONEIDAD DEL ANÁLISIS

El modelo utilizado por el diseño factorial trabaja bajo el supuesto de que los errores son independientes y normalmente distribuidos con media cero y varianza constante. Por ello en este apartado se comprobará el cumplimiento de tales supuestos.

La comprobación de la idoneidad (o adecuación) del modelo se puede realizar a través de los residuos. Los residuos o errores son la diferencia entre el valor observado

y el valor previsto por el modelo. Si las hipótesis relativas al modelo son ciertas, los residuos variarán aleatoriamente y por lo tanto no deben tener algún patrón, ni deben estar relacionados con alguna otra variable, incluyendo la respuesta. Si, por el contrario, descubrimos que los residuos presentan tendencias sistemáticas inexplicadas, tendremos que sospechar de la validez del modelo.

El histograma de residuos de la figura 5.5 se comprueba la suposición de normalidad del modelo estadístico en nuestro análisis de sensibilidad, mostrando que los errores son independientes con media cero.

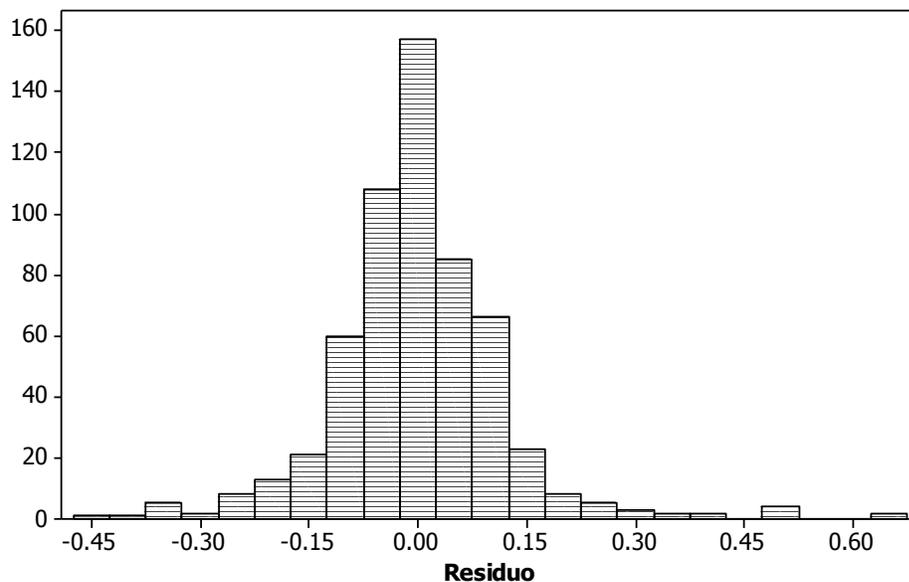


Figura 5.5: Histograma de residuos

Otra comprobación sencilla del modelo consiste en graficar los residuos contra los valores ajustados. Esta gráfica revela el comportamiento de la varianza de las observaciones. La figura 5.6 presenta la gráfica de residuos contra valores ajustados, nótese que no se distingue ningún patrón. Con lo anterior se comprueba la idoneidad del análisis estadístico en el problema de estudio.

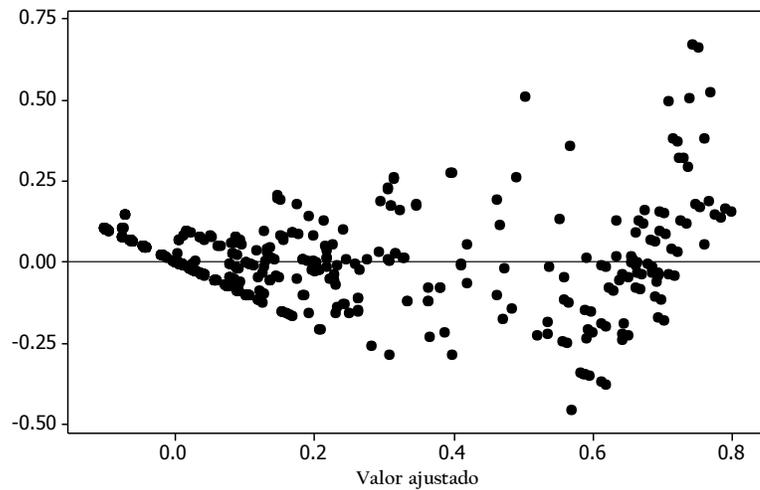


Figura 5.6: Residuos contra valores ajustados

5.4 OTRAS ESTADÍSTICAS PARA EL MODELO BLP MODIFICADO

Con el fin de conocer el comportamiento computacional del modelo BLP modificado teniendo un mayor rango de tamaños de los casos, se incrementó la cantidad de grupos evaluados. En la tabla 5.14 se indica el identificador y cantidad de elementos de los conjuntos de los nuevos casos. De nuevo el primer valor corresponde al número de plantas, el segundo al número de centros de distribución y el último al número de minoristas. Se realizaron tres réplicas en cada grupo.

ID	Elementos
G	5, 8, 13
H	6, 9, 14
I	3, 7, 12
J	3, 6, 20
K	5, 8, 20
L	3, 8, 20
M	5, 6, 20

Tabla 5.14: Casos evaluados

La tabla 5.15 muestra el tiempo promedio (expresado en segundos) necesitado para el preprocesamiento (generación de estrellas factibles), lectura de datos, compilación y ejecución del modelo, en la columna T. El tiempo de solver, es el tiempo promedio requerido por el optimizador para resolver los casos de prueba.

Ambos tiempos se consideran aceptables. El siguiente par de columnas indican el número de estrellas promedio en cada bloque, primero el máximo posible seguido por la cantidad promedio presentada. La última columna corresponde al porcentaje promedio de disminución de estrellas causado por el preprocesamiento.

Caso	Tiempo promedio		Núm. Estrellas		Disminución
	T	solver	potenciales	factibles	
A	4.95	0.13	3 072	874	71.55 %
B	6.63	0.36	4 096	1 336	67.38 %
C	8.49	0.67	4 096	1 594	61.08 %
D	96.96	11.33	98 304	6 219	93.67 %
E	49.85	12.44	131 072	9 015	93.12 %
F	67.34	38.72	131 072	4 881	96.28 %
G	9.65	0.71	32 768	1 746	94.67 %
H	135.18	8.79	73 728	9 965	86.48 %
I	28.40	1.78	458 752	5 468	98.81 %
J	2 688.61	1 867.82	3 145 728	61 085	98.06 %
K	1 776.68	793.48	4 194 304	59 545	98.58 %
L	659.95	98.45	4 194 304	53 704	98.72 %
M	3 296.90	1 450.39	3 145 728	37 906	98.80 %

Tabla 5.15: Estadísticas del modelo BLP modificado

Se puede comprobar la ventaja del preprocesamiento, obsérvese que en todos los bloques el tiempo promedio de preprocesamiento es mayor que el tiempo de optimización (figura 5.4), pero esta etapa disminuye en gran medida la cantidad de estrellas en el modelo. También se aprecia que entre más grande sea un caso a resolver, mayor es la disminución de elementos. Por lo tanto se concluye como aceptable la relación costo-beneficio del preprocesamiento.

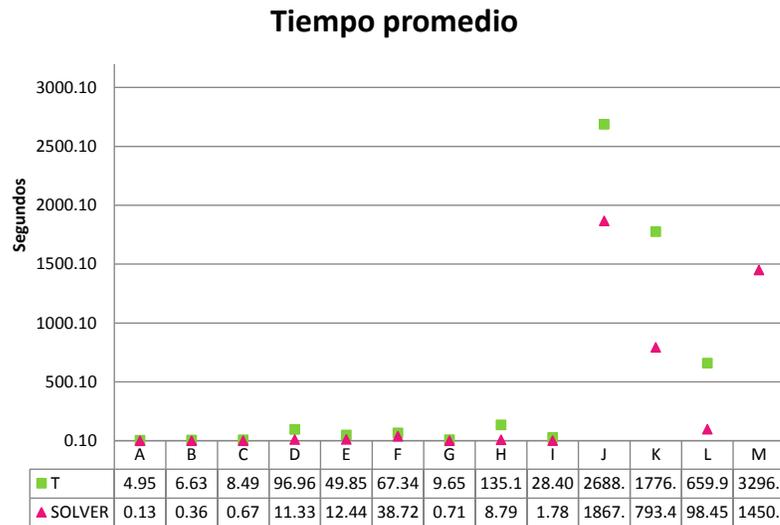


Figura 5.7: Tiempo promedio para cada grupo

5.5 EFECTO DE MÚLTIPLES PLANTAS

En la literatura revisada sobre el tema de localización e inventario, sólo se pudieron encontrar problemas que involucran un solo nivel de la cadena, considerando un solo tipo de fuente de suministro a los puntos de demanda. Algunos autores sí consideran varias opciones de suministro, en específico plantas y centros de distribución, pero modelan bajo el supuesto que los valores de los parámetros definidos para las plantas son iguales. Lo anterior equivale a suponer la existencia de una única planta, lo cual es una simplificación importante al problema y un supuesto poco probable en la vida real.

Debido a que la consideración de múltiples plantas es una de las características que diferencia a nuestro problema propuesto, a continuación se corrobora la influencia de involucrar este supuesto a la toma de decisiones en el problema de localización e inventario.

Para realizar una comparación de las configuraciones de red obtenidas al considerar y omitir múltiples plantas, se resolvieron nuevamente los 13 grupos

de prueba expuestos en las tablas 5.11 y 5.14. En esta ocasión los costos por transportación de producto de plantas a centros de distribución tendrán el mismo valor entre sí, sin importar a qué centro atienda. De igual forma se manejan los tiempos de entrega de productos de planta a centros.

A manera de ejemplificación, en la tabla 5.16 se resumen los resultados para los bloques A, B y C, tanto los obtenidos en el apartado 5.4, como los obtenidos al modificar los parámetros definidos para las plantas, como se acaba de explicar. Los resultados de los bloques D a M se encuentran en el apéndice B.2.

La primera columna de la tabla 5.16 indica el bloque en cuestión, la segunda columna indica el identificador del caso de prueba, definido por el número de réplica más la letra M o U. La letra M refiere al caso de prueba con múltiples plantas, mientras que la letra U refiere al mismo caso de prueba, pero considerando solo una planta. En las columnas tercera y cuarta, se indican cuántos y cuáles centros de distribución fueron seleccionados después de la optimización. En la última columna se expresa la configuración de red por medio de arcos, indicando la planta y el centro de distribución seleccionados, primer y segundo valor respectivamente, así como el conjunto de clientes asignados, expresados con la notación “k” más el número del cliente.

Con los resultados de la tabla 5.16 y del apéndice B.2, se puede observar que generalmente, para un caso que considera solo una planta, el número de centros de distribución a abrir permanece constante en relación al mismo caso considerando múltiples plantas. Sin embargo, los centros seleccionados, en la mayoría de los casos, sí cambia y como consecuencia la configuración de red también.

Lo anterior pone de manifiesto la influencia de las simplificaciones y supuestos definidos al momento de modelar. Suponer una buena aproximación del resultado al simplificar el problema a solo un nivel de la cadena de suministro, no suele brindar la mejor configuración de red. La importancia de ello radica en los tipos de decisiones involucradas en el problema. Por un lado, la apertura de instalaciones involucra

Bloque	ID	Núm.	Centros seleccionados	Configuración de red
A	1M	4	4,6,1,2	(1,4,k8)(1,6,k5,k7,k10)(2,1,k2,k9) (3,2,k1,k3,k4,k6)
	1U	5	3,5,4,1,6	(1,3,k2,k5)(1,5,k6)(1,4,k1,k3,k8)(1,1,k4,k9) (1,6,k7,k10)
	2M	4	6,3,1,5	(1,6,k2,k3,k5)(2,k3,k1,k6)(2,k1,k4,k7,k9) (2,k5,k8,k10)
	2U	4	6,3,1,2	(1,6,k2,k3,k5)(1,3,k6,k8)(1,1,k1,k7,k9) (1,2,k4,k10)
	3M	4	4,3,1,5	(1,4,k6)(2,3,k2,k3,k7,k8)(2,1,k10) (3,5,k1,k4,k5,k9)
	3U	4	5,1,4,6	(1,5,k1,k4)(1,1,k2,k7)(1,4,k3,k6,k9) (1,6,k5,k8,k10)
B	1M	4	2,5,1,6	(2,2,k3,k6)(3,5,k2,k9,k10)(5,1,k1,k5,k7) (5,6,k4,k8)
	1U	4	6,2,1,7	(1,6,k5)(1,2,k4,k6)(1,1,k1,k7,k8) (1,7,k2,k3,k9,k10)
	2M	3	6,4,8	(2,6,k1,k3,k4,k5,k7)(3,k4,k6,k10) (5,k8,k2,k8,k9)
	2U	5	6,5,1,2,4	(1,6,k4)(1,5,k7)(1,1,k5,k8)(1,2,k1,k2,k3,k9) (1,4,k6,k10)
	3M	4	8,1,5,4	(1,8,k6)(3,1,k1,k2,k5)(4,5,k3,k4,k8,k9) (4,4,k7,k10)
	3U	5	1,8,4,5,7	(1,1,k1,k2,k5)(1,8,k6)(1,4,k7)(1,5,k3,k8,k9) (1,7,k4,k10)
C	1M	4	2,4,8,3	(1,2,k6,k8)(1,4,k10)(2,8,k2,k4,k5,k7,k9) (3,3,k1,k3)
	1U	3	6,4,1	(1,6,k3)(1,4,k2,k4,k6,k7,k8) (1,1,k1,k5,k9,k10)
	2M	4	6,2,8,7	(1,6,k5)(1,2,k3,k6,k7,k8,k9,k10)(2,8,k2) (3,7,k1,k4)
	2U	3	7,5,2	(1,7,k1,k4)(1,5,k2,k5) (1,2,k3,k6,k7,k8,k9,k10)
	3M	5	5,8,3,1,6	(1,5,k3,k6,k7)(2,8,k2,k4)(2,3,k9) (2,1,k1,k8,k10)(3,6,k5)
	3U	6	4,6,5,8,3,7	(1,4,k1)(1,6,k5)(1,5,k2,k3,k6)(1,8,k4,k8) (1,3,k9)(1,7,k7,k10)

Tabla 5.16: Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques A a C

grandes cantidades de dinero, por otro lado, la asignación entre los elementos involucran aspectos operacionales y por tanto costos repetitivos, por ejemplo los costos relacionados a la política de inventario y a la distribución. Fijar de manera errónea estos aspectos, significa incurrir repetidamente en un costo no óptimo y al proyectar el dinero en el tiempo, este costo se incrementa significativamente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La administración de una cadena de suministro involucra grandes cantidades de información, para ejemplificar esta afirmación podemos mencionar las características de las demandas, características de los actores productivos, costos, política de inventarios, distribución, etcétera. Desde el punto de vista de optimización matemática, la incorporación de mayor cantidad de información y consideraciones, complican la ejecución de las técnicas matemáticas usadas como apoyo a la toma de decisiones en la administración cadena de suministro. A pesar de observarse, cada vez más, un notable incremento de la integración de decisiones en esta área de aplicación, aún se requiere de mucha investigación que permita la ayuda a la toma de decisiones en el proceso de planeación en una cadena de suministro.

Es así, que la importancia del trabajo presentado consiste en la integración de elementos que en conjunto no se han tratado en la literatura relacionada, siendo un problema más complicado, principalmente debido a la consideración de dos niveles de la cadena de suministro analizada y por la asignación única involucrada en los mismos. Estas consideraciones no son triviales y como se pudo comprobar en la experimentación, omitir opciones de plantas al problema influye en la decisión de apertura de centros y por lo mismo en la configuración de la cadena de suministro.

Por otro lado, al incluir los costos reales de inventario, se involucraron forzosamente términos no lineales, lo que hace al problema aún más difícil de resolver, si se desea trabajar directamente con el modelo original obtenido. Para evitar la problemática propia de los modelos no lineales, se decidió linealizar el

modelo original, sin embargo, el modelo resultante (MILP) presenta el inconveniente de incrementar de manera exponencial el número de las variables y de restricciones. Gracias a la tercera modelación y junto con el preprocesamiento realizado, se lograron resultados óptimos en un tiempo razonable de cómputo, lo que muestra el valor de dedicar tiempo a la modelación.

Aunque generalmente las linealizaciones no suelen ser obvias y sí muy tardadas, pueden dar mejores resultados a largo plazo, principalmente si se desea alcanzar optimalidad y trabajar no sólo con casos de tamaño pequeño. Sin embargo, es necesario hacer hincapié en lo delicado de hacer una linealización. Se puede caer en el error de no estar realmente modelando el problema original o modelar sólo una parte del problema. Lo anterior sucedió en este trabajo de investigación, pues se obtuvo una modelación (no reportada en este documento) que era inconsistente en el cumplimiento de las características del problema. Esto fue detectado sólo después de mucha experimentación, ya que el modelo obtenido era una simplificación del problema original, por lo que en muchos casos de prueba sí se cumplía con los requerimientos especificados del mismo.

En relación a la linealización, también es necesario mencionar que los modelos lineales presentados, son correctos sólo bajo el supuesto de atención de demanda desde una sola fuente de abastecimiento. Considerar supuestos tales como partición de la demanda o la entrega de productos desde varias fuentes de abastecimiento, romperían la estructura de los modelos lineales expuestos.

Con respecto al análisis de sensibilidad, la influencia significativa de la ponderación del transporte e inventario confirma la importancia de considerar decisiones operacionales dentro de la toma de decisiones estratégicas (apertura de centros de distribución en nuestro caso) pues, son influyentes en la configuración de red resultante.

Como se observó en los resultados, los porcentajes de cambio en los costos debido a la variación de los parámetros son considerables. Si recordamos que el

problema de localización e inventario involucra grandes cantidades monetarias y su efecto es perdurable en el tiempo, no es trivial poner atención al fijar estos valores. Además, al ser la interacción de las ponderaciones del transporte e inventarios significativa, no sólo es relevante conocer qué factor es más importante, sino también en qué magnitud lo es. Es así, que la modelación de preferencias es trascendental. Se debe buscar siempre asignar los pesos o ponderaciones de la manera más fiable y representativamente posible del esquema de preferencias del tomador de decisiones, que recordemos son basadas en las características propias de la cadena de suministro en cuestión.

Las áreas de oportunidad de este trabajo son variadas, en principio, desde el punto de vista de cadena de suministro, se pueden agregar diversos elementos como alternativas en la transportación de productos, incremento de actores productivos y demás consideraciones enunciadas en el capítulo de antecedentes. Desde el punto de vista de las metodología de solución, éstas dependerán del modelo matemático seleccionado.

El modelo BLP modificado, fue seleccionado en este trabajo por su ventaja frente a los demás en relación a la calidad de las soluciones encontradas y al tiempo de cómputo requerido, al resolverlos de manera exacta. Sin embargo, es evidente que ésta forma de solución no es la mejor idea cuando se trata de casos de prueba de grandes tamaños. Tanto el modelo original, MINLP, como el primer modelo lineal, MILP, pueden ser buenas opciones dependiendo de la técnica de optimización seleccionada. Aunque si se desea evitar la sobre estimación del porcentaje de utilización de los centros de distribución, los modelos modificados son sumamente complejos, pues ambos son no lineales y el logro de optimalidad está sujeto a la convexidad de las funciones, lo cual también se presenta como trabajo futuro, pues no se comprueba en esta tesis.

En los tres modelos propuestos, al ser de tipo combinatorio, las técnicas de descomposición y los métodos aproximados son candidatos inmediatos. Para el modelo no lineal, la relajación lagrangiana es una herramienta muy utilizada en la

literatura de problemas similares. No obstante, no existe garantía de la conveniencia de aplicar la relajación lagrangiana al problema propuesto, ya que éste presenta una mayor complejidad que lo abordado en la literatura. En cuanto a los modelos lineales se propone generación de columnas, debido a que suelen usarse en problemas con un número exponencial de variables, tal como sucede en los modelos MILP y BLP.

APÉNDICE A

DATOS DE CASO DE ESTUDIO

En este apartado, se desglosan los parámetros del caso de estudio seleccionado, en la sección 5.2.1, para ejemplificar las soluciones obtenidas con el modelo lineal binario propuesto.

Plantas	Capacidad
1	76 273
2	99 910

Tabla A.1: Capacidad de plantas

Minoristas	Media	Varianza
1	44	1.01
2	17	1.687
3	69	5.899
4	22	5.862
5	66	1.028
6	53	2.89
7	49	1.942
8	59	4.275
9	32	3.574

Tabla A.2: Características de las demandas de los minoristas

CD	Costo de apertura	Costo por ordenar	Capacidad
1	28 688	149	58 389
2	25 192	292	41 133
3	27 627	142	57 227
4	25 782	234	36 687
5	10 990	182	36 657
6	15 341	221	48 880
7	26 024	236	39 771

Tabla A.3: Parámetros correspondientes a los centros de distribución

$j \backslash i$	l_{ij}		g_{ij}		a_{ij}	
	1	2	1	2	1	2
1	4	3	75	70	52	41
2	3	4	53	89	60	15
3	3	4	75	54	52	42
4	1	2	60	87	44	63
5	3	1	88	58	38	65
6	4	4	86	73	33	35
7	4	3	81	55	45	42

$j \backslash k$	c_{jk}						
	1	2	3	4	5	6	7
1	12	11	18	27	10	14	14
2	16	28	27	14	26	18	26
3	14	28	13	28	23	15	19
4	14	21	17	16	22	10	28
5	17	24	26	29	18	13	25
6	14	10	11	12	23	16	16
7	27	12	23	23	16	28	23

Abreviaturas: l_{ij} : Tiempo de entrega, f_j : Costo fijo de envío. Costo unitario de envío: a_{ij} y c_{jk}

Tabla A.4: Parámetros definidos por los centros de distribución, al tener enlace con plantas y minoritas

APÉNDICE B

RESULTADOS DE BLOQUES EVALUADOS

En este apéndice se presentan los resultados obtenidos en los bloques evaluados. En primer lugar se exponen los resultados requeridos en el análisis de sensibilidad y posteriormente los resultados requeridos para verificar la influencia de múltiples plantas en la configuración de red.

B.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se presentan los porcentajes de cambio en los costos, ocasionados al variar los parámetros β , θ y ns durante el análisis de sensibilidad. Estos resultados son presentados por grupos (o tamaños) de casos. Cada tabla indica el valor de cada parámetro y los efectos en las réplicas de cada caso.

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	31.00 %	3	34.32 %	3	40.79 %	3
0.003	0.001	2.05	31.00 %	3	34.32 %	3	40.79 %	3
0.003	0.04	0.67	7.00 %	4	10.08 %	3	19.08 %	4
0.003	0.04	2.05	7.00 %	4	10.08 %	3	19.08 %	4
0.003	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	4	0.88 %	4
0.003	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
0.003	1	0.67	0.00 %	4	0.19 %	4	0.88 %	4
0.003	1	2.05	0.00 %	4	0.19 %	4	0.00 %	4

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.1	0.001	0.67	36.00 %	3	34.32 %	3	92.77 %	3
0.1	0.001	2.05	76.00 %	3	67.20 %	3	124.32 %	3
0.1	0.04	0.67	7.00 %	4	10.08 %	3	19.08 %	4
0.1	0.04	2.05	7.00 %	4	10.08 %	3	19.08 %	4
0.1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
0.1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
0.1	1	0.67	0.00 %	4	0.19 %	4	0.00 %	4
0.1	1	2.05	0.00 %	4	0.19 %	4	0.00 %	4
0.8	0.001	0.67	66.00 %	3	67.20 %	3	81.49 %	3
0.8	0.001	2.05	66.00 %	3	67.20 %	3	95.70 %	3
0.8	0.04	0.67	9.00 %	4	34.32 %	3	19.97 %	4
0.8	0.04	2.05	33.00 %	3	34.32 %	3	48.58 %	4
0.8	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
0.8	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
0.8	1	0.67	0.00 %	4	0.19 %	4	0.00 %	4
0.8	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
1	0.001	0.67	66.00 %	3	67.20 %	3	95.70 %	3
1	0.001	2.05	66.00 %	3	67.20 %	3	95.70 %	3
1	0.04	0.67	11.00 %	4	34.32 %	3	22.92 %	4
1	0.04	2.05	23.00 %	4	34.32 %	3	48.58 %	4
1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4
1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.63 %	4	0.00 %	4
1	1	0.67	0.00 %	4	0.19 %	4	0.00 %	4
1	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	4	0.00 %	4

Tabla B.1: Variación de parámetros en el grupo B

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	67.00 %	3	57.12 %	3	48.60 %	3
0.003	0.001	2.05	67.00 %	3	57.12 %	3	48.60 %	3
0.003	0.04	0.67	26.00 %	3	16.52 %	4	11.29 %	3
0.003	0.04	2.05	26.00 %	3	16.52 %	4	11.29 %	3
0.003	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.003	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.003	1	0.67	2.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.003	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.1	0.001	0.67	68.00 %	3	29.85 %	3	58.73 %	3
0.1	0.001	2.05	104.00 %	3	40.16 %	3	58.59 %	3
0.1	0.04	0.67	26.00 %	3	16.52 %	4	11.29 %	3
0.1	0.04	2.05	26.00 %	3	16.52 %	4	11.29 %	3
0.1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.1	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.1	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.8	0.001	0.67	92.00 %	3	63.85 %	3	58.59 %	3
0.8	0.001	2.05	92.00 %	3	52.00 %	4	58.59 %	3
0.8	0.04	0.67	26.00 %	3	16.52 %	4	13.23 %	3
0.8	0.04	2.05	2.00 %	4	28.12 %	4	17.06 %	3
0.8	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.8	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.8	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
0.8	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
1	0.001	0.67	92.00 %	3	63.85 %	3	58.59 %	3
1	0.001	2.05	92.00 %	3	52.00 %	4	58.59 %	3
1	0.04	0.67	20.00 %	3	18.89 %	4	17.06 %	3
1	0.04	2.05	2.00 %	4	28.12 %	4	17.06 %	3
1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	3.08 %	3
1	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4
1	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	5	0.00 %	4

Tabla B.2: Variación de parámetros en el grupo C

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	18.00 %	4	0.00 %	6	11.06 %	5
0.003	0.001	2.05	18.00 %	4	0.00 %	6	11.77 %	5
0.003	0.04	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	11.06 %	5
0.003	0.04	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	11.06 %	5
0.003	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.003	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.003	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.003	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.1	0.001	0.67	28.00 %	4	13.02 %	6	35.45 %	5
0.1	0.001	2.05	31.00 %	4	35.54 %	6	35.45 %	5
0.1	0.04	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	11.06 %	5
0.1	0.04	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	11.77 %	5
0.1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.1	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.1	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.8	0.001	0.67	31.00 %	4	44.67 %	6	42.08 %	5
0.8	0.001	2.05	24.00 %	4	44.67 %	6	42.08 %	5
0.8	0.04	0.67	2.00 %	4	0.00 %	6	14.18 %	5
0.8	0.04	2.05	7.00 %	4	3.10 %	6	35.45 %	5
0.8	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.8	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.8	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
0.8	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
1	0.001	0.67	31.00 %	4	44.67 %	6	42.08 %	5
1	0.001	2.05	24.00 %	4	44.67 %	6	42.08 %	5
1	0.04	0.67	3.00 %	4	0.00 %	6	14.18 %	5
1	0.04	2.05	7.00 %	4	3.10 %	6	35.45 %	5
1	0.5	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
1	0.5	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
1	1	0.67	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6
1	1	2.05	0.00 %	4	0.00 %	6	0.00 %	6

Tabla B.3: Variación de parámetros en el grupo D

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	24.00 %	5	34.36 %	4	21.77 %	5
0.003	0.001	2.05	24.00 %	5	34.36 %	4	21.77 %	5
0.003	0.04	0.67	8.00 %	5	7.82 %	5	10.00 %	5
0.003	0.04	2.05	8.00 %	5	7.82 %	5	10.00 %	5
0.003	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
0.003	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
0.003	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
0.003	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
0.1	0.001	0.67	29.00 %	5	45.32 %	4	75.41 %	5
0.1	0.001	2.05	63.00 %	5	45.32 %	4	75.41 %	5
0.1	0.04	0.67	8.00 %	5	7.82 %	5	10.00 %	5
0.1	0.04	2.05	10.00 %	5	15.19 %	4	10.00 %	5
0.1	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
0.1	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
0.1	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
0.1	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
0.8	0.001	0.67	109.00 %	5	79.42 %	4	75.41 %	5
0.8	0.001	2.05	141.00 %	5	79.42 %	4	75.41 %	5
0.8	0.04	0.67	8.00 %	5	15.19 %	4	23.34 %	5
0.8	0.04	2.05	9.00 %	5	17.27 %	4	25.73 %	5
0.8	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
0.8	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.76 %	5
0.8	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
0.8	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	6
1	0.001	0.67	109.00 %	5	79.42 %	4	75.41 %	5
1	0.001	2.05	141.00 %	5	79.42 %	4	75.41 %	5
1	0.04	0.67	8.00 %	5	15.19 %	4	23.34 %	5
1	0.04	2.05	28.00 %	5	17.27 %	4	25.73 %	5
1	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5
1	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.76 %	5
1	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.60 %	6
1	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.83 %	5

Tabla B.4: Variación de parámetros en el grupo E

θ	β	ns	R1		R2		R3	
			%	CD	%	CD	%	CD
0.003	0.001	0.67	30.00 %	5	15.60 %	5	52.74 %	6
0.003	0.001	2.05	30.00 %	5	15.60 %	5	52.74 %	6
0.003	0.04	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.003	0.04	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.003	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.003	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.003	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.003	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.1	0.001	0.67	52.00 %	5	47.74 %	5	101.55 %	6
0.1	0.001	2.05	120.00 %	5	60.86 %	5	83.59 %	6
0.1	0.04	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.1	0.04	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.13 %	7
0.1	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.1	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.1	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.1	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.8	0.001	0.67	105.00 %	5	60.86 %	5	85.17 %	6
0.8	0.001	2.05	114.00 %	5	60.86 %	5	85.17 %	6
0.8	0.04	0.67	20.00 %	5	2.04 %	5	0.13 %	7
0.8	0.04	2.05	24.00 %	5	10.58 %	5	16.34 %	6
0.8	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.8	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.8	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
0.8	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
1	0.001	0.67	103.00 %	5	60.86 %	5	85.17 %	6
1	0.001	2.05	129.00 %	5	60.86 %	5	85.17 %	6
1	0.04	0.67	20.00 %	5	2.04 %	5	0.13 %	7
1	0.04	2.05	32.00 %	5	12.70 %	5	25.80 %	6
1	0.5	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
1	0.5	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.13 %	7
1	1	0.67	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7
1	1	2.05	0.00 %	6	0.00 %	5	0.00 %	7

Tabla B.5: Variación de parámetros en el grupo F

B.2 ANÁLISIS DE EFECTOS DE MÚLTIPLES PLANTAS

En esta sección se muestran los centros de distribución seleccionados y la configuración de red obtenida al optimizar los los bloques D a M tanto para una y varias opciones de plantas. Cada bloque consta de tres réplicas, siendo una réplica un distinto caso de prueba. Se hace referencia a cada caso con el identificador definido por el número de réplica más la letra M o U, dependiendo si supone múltiples plantas o solo una planta, respectivamente.

Bloque	ID	Núm.	Centros seleccionados	Configuración de red
D	1M	6	6,5,2,4,3,1	(1,6,k2,k6)(1,5,k9)(1,2,k1,k7,k10) (2,4,k3,k4,k8)(2,3,k5,k11,k12) (2,1,k13,k14,k15)
	1U	6	6,4,5,3,2,1	(1,6,k2,k6)(1,4,k3,k4,k8)(1,5,k9)(1,3,k5,k10) (1,2,k1,k7,k11,k12)(1,1,k13,k14,k15)
	2M	5	5,4,2,6,1	(2,5,k1,k2,k8)(3,4,k9)(3,2,k4,k10,k11,k12) (3,6,k5,k6,k13,k14)(3,1,k3,k7,k15)
	2U	4	1,5,4,3	(1,1,k2,k6)(1,5,k1,k3,k7,k12) (1,4,k5,k9,k10,k11,k13)(1,3,k4,k8,k14,k15)
	3M	6	5,1,4,2,3,6	(1,5,k2,k4,k12)(2,1,k7,k9)(3,4,k8) (3,3,k13) (3,2,k3,k10,k11)(3,6,k1,k5,k6,k14,k15)
	3U	6	4,1,2,5,3,6	(1,4,k8)(1,1,k7,k10)(1,2,k3,k9,k11)(1,3,k13) (1,5,k2,k4,k12)(1,6,k1,k5,k6,k14,k15)
E	1M	5	1,6,3,2,8	(1,1,k2,k5)(1,6,k1,k9)(3,3,k4,k11,k14,k15) (4,2,k3,k6,k7,k8,k12)(5,8,k10,k13)
	1U	4	3,2,1,4	(1,3,k2,k4,k10)(1,2,k3,k6,k7,k8,k12) (1,1,k1,k11,k14)(1,4,k5,k9,k13,k15)
	2M	6	5,4,2,1,3,6	(1,5,k6)(1,4,k3,k7,k14)(3,3,k2,k4,k5,k9,k15) (2,2,k1)(2,1,k8,k11,k13)(5,6,k10,k12)
	2U	5	2,6,7,8,3	(1,2,k1)(1,6,k2,k10)(1,7,k3,k6,k7,k12) (1,8,k8,k11,k13)(1,3,k4,k5,k9,k14,k15)
	3M	7	5,8,3,4,2,7,1	(1,5,k8,k9,k10)(1,8,k6,k13)(2,3,k2,k7) (2,4,k4,k11)(3,2,k1,k12,k15)(4,7,k3,k5) (5,1,k14)
	3U	7	3,7,4,5,8,1,6	(1,3,k8)(1,7,k1,k2,k3,k9)(1,4,k4,k11) (1,5,k5,k10,k12)(1,8,k6,k13)(1,1,k14) (1,6,k7,k15)

Tabla B.6: Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques D y E

Bloque	ID	Núm.	Centros seleccionados	Configuración de red
F	1M	6	4,2,5,3,6,7	(1,4,k3,k6)(2,2,k1,k4,k7,k9)(2,5,k2,k5,k10) (3,3,k8)(3,6,k12,k13,k14)(3,7,k11,k15)
	1U	6	4,3,2,7,6,5	(1,4,k3,k6)(1,3,k5,k7)(1,2,k1,k4,k8,k9) (1,7,k11)(1,6,k12,k13,k14)(1,5,k2,k10,k15)
	2M	6	1,3,7,2,6,4	(1,1,k5)(2,3,k3,k4)(2,7,k2,k8,k9)(3,6,k1) (2,2,k11,k14)(3,4,k6,k7,k10,k12,k13,k15)
	2U	6	6,2,7,5,8,1	(1,6,k1)(1,2,k5)(1,7,k2,k4,k7,k11) (1,5,k3,k9,k12,k13) (1,8,k6,k10,k14)(1,1,k8,k15)
	3M	4	1,6,8,2	(1,1,k1,k2,k3)(1,6,k4,k7,k10,k12) (1,8,k5,k8,k9,k13,k14)(2,2,k6,k11,k15)
	3U	5	4,1,3,5,7	(1,4,k1,k5,k6,k8)(1,1,k3,k12)(1,3,k7,k13) (1,5,k10,k14)(1,7,k2,k4,k9,k11,k15)
G	1M	5	8,2,4,7,6	(1,8,k2,k8,k13)(2,2,k10) (3,4,k1,k4,k5,k6,k7,k11)(3,7,k3,k12)(4,6,k9)
	1U	6	5,7,2,4,1,3	(1,5,k8)(1,7,k4,k9)(1,2,k10)(1,3,k13) (1,4,k1,k2,k5,k6,k7,k11)(1,1,k3,k12)
	2M	5	1,4,8,5,3	(1,1,k9,k10,k11)(3,4,k2,k4)(3,8,k3,k7,k8) (5,5,k6,k12)(5,3,k1,k5,k13)
	2U	5	7,2,1,4,3	(1,7,k1,k2)(1,2,k3,k7,k8)(1,1,k6,k11) (1,4,k4,k12)(1,3,k5,k9,k10,k13)
	3M	6	6,2,5,4,1,8	(1,6,k11)(3,2,k3,k7,k8)(3,5,k4,k9) (3,4,k1,k6,k10)(4,1,k5,k13)(5,8,k2,k12)
	3U	6	2,5,4,6,8,1	(1,2,k3,k7,k8)(1,5,k4,k9)(1,4,k1,k6,k10) (1,6,k11)(1,8,k2,k12)(1,1,k5,k13)
H	1M	4	2,1,5,4	(2,2,k5,k6,k11,k13)(5,1,k3,k8,k10) (5,5,k2,k4,k9,k12)(6,4,k1,k7,k14)
	1U	4	1,5,3,4	(1,1,k3,k8,k10)(1,5,k4,k5,k6,k9,k11) (1,3,k2,k12,k13)(1,4,k1,k7,k14)
	2M	6	8,5,7,4,3,6	(1,8,k3,k9)(1,5,k4,k8,k10,k11)(3,7,k5,k7) (4,4,k12)(5,3,k1,k6,k13)(6,6,k2,k14)
	2U	5	2,5,4,1,6	(1,2,k5,k10)(1,5,k3,k4,k11)(1,4,k8,k12) (1,1,k2,k7,k9,k13)(1,6,k1,k6,k14)
	3M	5	5,4,3,9,8	(3,5,k1,k6)(3,4,k2,k4,k12)(4,3,k3,k9) (5,9,k5,k7,k11,k13)(6,8,k8,k10,k14)
	3U	6	6,5,3,1,9,8	(1,6,k1,k5)(1,5,k2,k6)(1,3,k3,k9)(1,1,k4,k12) (1,9,k7,k11,k13)(1,8,k8,k10,k14)

Tabla B.7: Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques F a H

Bloque	ID	Núm.	Centros seleccionados	Configuración de red
I	1M	5	4,3,7,2,6	(1,4,k3,k5)(1,3,k2,k6,k7)(1,7,k4,k10)(2,2,k9) (3,6,k1,k8,k11,k12)
	1U	5	3,4,5,7,1	(1,3,k2,k7)(1,4,k5,k6,k8)(1,5,k9)(1,7,k4,k10) (1,1,k1,k3,k11,k12)
	2M	4	1,2,7,3	(1,1,k4,k5)(2,2,k9)(2,7,k3,k6,k7,k11) (3,3,k1,k2,k8,k10,k12)
	2U	5	5,1,6,2,3	(1,5,k7)(1,1,k4,k5,k8)(1,6,k2,k9,k10) (1,2,k1,k3,k11)(1,3,k6,k12)
	3M	5	5,4,7,3,2	(1,5,k8)(2,4,k1,k5,k7)(2,7,k3,k6,k9,k10,k11) (3,3,k2,k4)(3,2,k12)
	3U	5	1,6,5,7,2	(1,1,k2)(1,6,k6,k7)(1,5,k3,k4,k8) (1,7,k1,k5,k9,k10,k11)(1,2,k12)
J	1M	6	2,3,6,4,1,5	(1,2,k4,k5,k15,k18)(2,3,k2,k14,k16,k17) (2,6,k11,k13,k20)(3,4,k1,k3,k9,k10) (3,1,k6,k7,k12)(3,5,k8,k19)
	1U	6	4,1,3,2,5,6	(1,4,k1,k3,k9,k10)(1,1,k6,k7,k12) (1,3,k2,k14,k16,k17)(1,2,k4,k5,k15,k18) (1,5,k8,k19) (1,6,k11,k13,k20)
	2M	6	5,6,4,1,3,2	(1,5,k5,k10,k19)(2,6,k2,k4,k8) (2,4,k7,k9,k11,k17)(3,1,k6,k14,k15) (3,3,k12,k13,k16,k18)(3,k,k1,k3,k20)
	2U	6	6,1,4,3,5,2	(1,6,k2,k4,k8)(1,1,k6,k14,k15) (1,4,k7,k9,k11,k17) (1,3,k12,k13,k16,k18)(1,5,k5,k10,k19)
	3M	6	4,1,2,3,5,6	(1,4,k10)(2,1,k9,k13,k14)(2,2,k1,k7,k8,k19) (3,3,k5,k11,k12,k16)(3,5,k6,k15,k17,k18) (3,6,k2,k3,k4,k20)
	3U	6	4,1,3,5,2,6	(1,4,k6,k10)(1,1,k13,k14)(1,3,k5,k11,k12,k16) (1,5,k8,k9,k15,k17,k18)(1,2,k1,k7,k19) (1,6,k2,k3,k4,k20)
K	1M	6	4,5,2,7,1,6	(1,4,k2,k10,k11,k16,k19)(2,5,k7,k14,k15) (3,2,k1,k6,k8,k12)(4,7,k17,k20)(5,1,k4,k5,k9) (5,6,k3,k13,k18)
	1U	6	1,2,5,6,4,7	(1,1,k1,k4,k9)(1,2,k6,k8,k12)(1,5,k5,k7,k14) (1,6,k3,k13,k15,k16,k18) (1,4,k2,k10,k11,k19)(1,7,k17,k20)
	2M	7	4,1,6,2,8,7,3	(1,4,k9,k17)(1,1,k5,k7,k10,k12,k15,k19) (2,6,k4,k6,k18,k20)(3,2,k3,k11) (3,8,k1,k13) (3,7,k8,k14,k16)(4,k3,k2)

Tabla B.8: Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques I a K

Bloque	ID	Núm.	Centros seleccionados	Configuración de red
K	2U	8	3,5,2,8,7,4,1,6	(1,3,k2)(1,5,k5)(1,2,k11)(1,8,k1,k13) (1,7,k7,k14,k16)(1,1,k3,k8,k10,k12,k15,k19) (1,4,k17)(1,6,k4,k6,k9,k18,k20)
	3M	8	5,2,4,3,7,1,6,8	(1,5,k6,k15)(1,2,k5,k7,k16)(5,k8,k18) (1,4,k1,k9,k12,k17)(1,3,k4,k8,k19) (3,k7,k2,k13)(4,k1,k3,k11,k14,k20) (5,k6,k10)
	3U	7	6,5,2,4,8,3,1	(1,6,k8,k12)(1,5,k6,k15)(1,2,k1,k7,k16) (1,8,k10,k14,k18)(1,3,k4,k5,k19) (1,1,k3,k11,k13,k20) (1,4,k2,k9,k17)
L	1M	8	4,7,6,1,2,3,5,8	(1,4,k1,k10,k12)(1,7,k4,k5,k8,k16) (1,6,k13,k15,k19)(2,k1,k6)(2,k2,k9) (2,k3,k3,k17)(2,k5,k7,k18) (3,k8,k2,k11,k14,k20)
	1U	8	8,3,4,7,1,5,6,2	(1,8,k2)(1,3,k3)(1,4,k1,k10,k12) (1,1,k9,k11,k14,k17)(1,5,k7,k18) (1,6,k13,k15,k19) (1,2,k6,k20)(1,7,k4,k5,k8,k16)
	2M	6	8,1,4,7,3,2	(2,8,k3,k17)(2,1,k4,k10,k13,k15,k19) (3,7,k1,k5,k6,k7,k9,k12,k16) (3,3,k2,k14,k18)(3,4,k11) (3,2,k8,k20)
	2U	5	7,8,3,4,2	(1,7,k4,k5,k7,k9,k10,k12,k16)(1,2,k6,k8,k20) (1,8,k1,k3,k13,k15,k17)(1,3,k2,k14,k18) (1,4,k11,k19)
	3M	6	5,2,3,7,8,4	(1,5,k2,k12)(2,2,k3,k7,k9,k14)(2,8,k5,k20) (2,3,k4,k6,k8,k13,k15)(2,7,k10,k11,k18) (3,4,k1,k16,k17,k19)
	3U	7	8,5,3,6,7,4,2	(1,8,k2,k5,k11)(1,5,k6,k12)(1,3,k4,k8,k15) (1,6,k3,k13,k17)(1,7,k10,k18) (1,4,k1,k9,k16,k19)(1,2,k7,k14,k20)
M	1M	6	5,4,1,3,6,2	(1,5,k4,k5,k6,k7,k18)(1,4,k13,k16,k19) (1,1,k3,k12,k20)(2,3,k1,k8,k11) (2,6,k2,k9,k10,k14)(3,k2,k15,k17)
	1U	6	5,3,6,2,4,1	(1,5,k1,k5,k6,k7)(1,3,k8,k11) (1,6,k2,k4,k9,k10,k12,k14,k15)(1,2,k17,k18) (1,4,k13,k16,k19)(1,1,k3,k20)
	2M	6	5,2,6,1,3,4	(1,5,k1,k5,k9)(1,2,k12,k17,k18) (2,6,k8,k10,k11,k13,k16)(2,1,k3,k7,k20) (5,3,k6,k14,k15)(5,4,k2,k4,k19)
	2U	6	5,1,3,6,2,4	(1,5,k1,k5,k9)(1,1,k3,k7,k11,k13) (1,3,k4,k14)(1,6,k8,k10,k15,k16) (1,2,k6,k12,k17)(1,4,k2,k18,k19,k20)
	3M	5	6,4,5,1,3	(1,4,k1,k4,k9,k11)(1,6,k2,k10) (2,5,k3,k5,k14,k17,k18)(4,1,k6,k8,k12,k13,k16) (5,3,k7,k15,k19,k20)
	3U	5	6,4,1,5,3	(1,1,k6,k8,k12,k13,k16) (1,6,k2,k10)(1,4,k1,k4,k9,k11) (1,5,k3,k5,k14,k17,k18) (1,3,k7,k15,k19,k20)

Tabla B.9: Efecto de considerar y omitir plantas en los bloques K a M

APÉNDICE C

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

A continuación se hará una breve reseña de las herramientas computacionales utilizadas en el desarrollo de la tesis, el modelados GAMS y los optimizadores seleccionados para la resolución de los modelos. AlphaECP para el modelo no lineal y CPLEX para el modelo lineal.

C.1 GAMS

GAMS (*General Algebraic Modeling System*) es un sistema de alto nivel para la modelación de problemas de programación matemática y optimización. Consiste de un lenguaje compilador integrado a un grupo de optimizadores de alto rendimiento. Fue desarrollado por el Banco Mundial en 1988, la versión más reciente es la 23.8.2, cuenta con optimizadores de modelos lineales, no lineales, enteros, etc. Incluye entre MINOS, CONOPT, CPLEX, DICOPT, ALPHAECP entre muchos otros.

Entre las características más importantes de GAMS cabe destacar:

1. Su capacidad para pasar de resolver problemas de pequeña dimensión (docenas de variables y restricciones) a problemas mayores (miles de variables y restricciones) sin variar el código sustancialmente. El manejo eficiente de sus índices permite escribir de manera compacta restricciones similares mediante una sola restricción.

2. Separa el proceso de modelado del proceso de resolución del problema. Así, el usuario de GAMS debe ser capaz de conseguir una formulación consistente del problema, y una vez que la expresa en la notación de GAMS, este lenguaje hace uso de alguno de los optimizadores disponibles para obtener su solución.
3. La forma en que GAMS representa un problema de optimización coincide con la descripción matemática de ese problema, lo que lo vuelve ágil al leer.
4. Proporciona los mecanismos necesarios para resolver problemas de optimización con estructuras similares, como son aquellos que se derivan de las técnicas de descomposición.

Las partes más habituales que podremos encontrar en un programa GAMS son las siguientes:

- Cabecera del programa. Es una parte opcional pero recomendable para la documentación del programa. Aquí se colocan ciertos comentarios descriptivos del programa, título, autores del mismo, información relativa a la versión etc.
- Opciones de programación. Los programadores activan o desactivan ciertas opciones generales de GAMS a su conveniencia. Estas opciones pueden especificar la forma en la que se enseñan los resultados, iteraciones máximas para los algoritmos, declaración de símbolos especiales de comentarios, etc.
- Declaración de elementos tales como conjuntos, datos (parámetros, tablas, escalares) y variables, a las cuales se les puede asignar valores iniciales y cotas. También se debe declarar la función objetivo y restricciones del modelo.
- Declaración de modelo. Normalmente a cada programa GAMS le va a corresponder un modelo. Sin embargo, podemos considerar varios modelos dentro de un programa. Cada modelo está definido por el tipo de variables y funciones que involucra dentro del mismo. La tabla C.1 indica los tipos de modelos que GAMS puede resolver, junto con su identificador en el modelador.

- Lanzamiento del programa de optimización. Esta parte puede ser muy sencilla si solamente queremos lanzar el programa que resuelve el caso una vez. En otras ocasiones podemos querer realizar varias llamadas a diferentes optimizadores con diferentes modelos, realizando operaciones intermedias con los datos o los valores iniciales de las variables, incluyendo ciclos y condiciones. Esto puede valer para implementar complejos algoritmos de optimización.
- Informes de resultados. En este caso podemos optar por tener los informes que GAMS prepara de forma automática o bien podemos darle instrucciones para preparar nuestros propios informes en el archivo de salida o en diversos archivos a nuestra conveniencia.
- Cuenta con una librería de modelos junto con una base de datos. Estos modelos abarcan diferentes áreas de aplicación, sectores así como modelos de la literatura clásica.

El orden anterior de los parte de un programa no importa, puede ser alterado pero es necesario tener presente que cualquier entidad (variable, parámetro, ...) debe ser declarada antes de ser usada.

MODELOS	IDENTIFICADOR
Modelo lineal	LP
Modelo no lineal	NLP
Modelo lineal mixto	MIP
Modelo no lineal mixto	MINLP
Modelo lineal mixto relajado	rMIP
Modelo no-lineal mixto relajado	rMINLP
Modelo no-lineal con discontinuidades en la derivada	DNLP
Modelo mixto de complementariedad	MCP
Sistema no-lineal restringido	CNS

Tabla C.1: Tipos de modelos que GAMS puede resolver

Entre las fuentes de información sobre este lenguaje de programación cabe destacar el manual de GAMS [32], el cual es su segundo capítulo ofrece un resumen

con las características principales para empezar a programar en este lenguaje. En la página de internet www.gams.com se puede tener asesoría sobre características avanzadas, soporte técnico y documentación de librerías soportadas por GAMS. También es muy valiosa la inscripción en gamsworld@googlegroups.com, foro que permite el intercambio de ideas e información sobre dudas y aplicaciones de GAMS, aparte de ser una fuente de comunicación constante entre desarrolladores del *software*, científicos y estudiantes del diversas áreas de estudio.

C.2 GAMS/CPLEX

GAMS/Cplex es un optimizador de GAMS que permite a los usuarios combinar el alto nivel de modelación de GAMS con el poder de los optimizadores de Cplex. Los optimizadores de Cplex están diseñados para solucionar problemas grandes y complicados rápidamente y con una mínima intervención del usuario. Provee acceso (con la licencia apropiada) a los algoritmos de solución de Cplex para problemas de programación lineal, cuadrática y entera-mixta. Dado que hay una gran variedad de opciones de solución, GAMS/Cplex calcula y fija automáticamente la mayoría de las opciones por defecto en los mejores valores para los problemas específicos, los cuales pueden ser modificados por el usuarios, si así se desea, refiérase a [17], para encontrar más información al respecto.

Cplex resuelve modelos lineales usando muchos algoritmos alternativos, la mayoría se resuelven de mejor manera usando el algoritmo dual simplex. Aunque ciertos tipos de problemas son mejor resueltos al usar el algoritmo primal simplex, el optimizador para redes, el algoritmo de barrera o el algoritmo de exploración. Si se activa la opción de paralelo en Cplex, es posible resolver el modelo por diversos algoritmos y regresar el resultado de algoritmo que termine primero.

Para problemas con variables enteras, Cplex usa el algoritmo de ramificación y corte, el cual involucra una serie de subproblemas lineales. Dado que un solo problema entero mixto genera muchos subproblemas, incluso un problema entero

mixto pequeño puede ser muy costoso computacionalmente y requerir cantidades significativas de memoria física.

C.3 GAMS/ALPHAECP

GAMS cuenta con varios optimizadores no lineales (AlphaECP, BARON, Bonmin, Couenne, DICOPT, KNITRO, LindoAPI, OQNLP, SBB y SCIP). Definir el mejor método y por tanto el mejor optimizador para un problema concreto depende de las características del problema, en especial el tipo de no linealidad y el número de variables enteras, ya que puede impactar significativamente en las capacidades del optimizador. Una descripción breve y comparativa entre los optimizadores más recientes para MINLP se encuentra en [8] y de manera más extensa en [31].

Para la solución de nuestro modelo no lineal entero mixto, fue seleccionado GAMS/AlphaECP, debido a que fue el que mejor desempeño mostró respecto de DICOPT, optimizador del cual también se tiene acceso.

El optimizador AlphaECP es una implementación del método extendido de planos cortantes [54] en lenguaje C, desarrollado por el grupo de investigación de T. Westerlund en el laboratorio de Diseño de Procesos e Ingeniería de Sistemas en la Universidad de Abo Akedemi, Finlandia [55], [57]. Asegura optimalidad global en problemas MINLPs convexos y pseudo convexos.

La idea general del algoritmo es resolver una secuencia de problemas lineales enteros (MILP) agregando cortes. El algoritmo de GAMS/AlphaECP permite llamar a optimizadores lineales junto con las soluciones de los modelos lineales para mejorar el desempeño de AlphaECP en la búsqueda de soluciones factibles y exactas. Además, los planos cortantes pueden ser reducidos en cada iteración, lo que mejora la capacidad del algoritmo para resolver problemas no convexos y refrenar el crecimiento del tamaño de los problemas lineales intermedios.

Para el uso de GAMS/AlphaECP se requiere de licencia y adicionalmente la licencia del solver MIP requerido para resolver los subproblemas intermedios, al igual que la licencia del optimizador NLP, si es utilizado alguno.

Entre las opciones a manipular en el optimizador se encuentran: el número máximo de iteraciones, optimizador utilizado en cada subproblema (lineal y/o no lineal), criterios de eliminación de cortes, estrategias de optimalidad, entre otras que pueden ser estudiadas a detalle en [56].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMBROSIO, D. y S. M. GRAZIA, «Distribution network design: new problem and related models», *European Journal of Operation Research*, **165**(3), págs. 610–624, 2005.
- [2] ANDERSSON, H., A. HOFF, M. CHRISTIANSEN, G. HASLE y A. LOKKETANGEN, «Industrial aspects and literature survey: combined inventory management and routing», *Computers and Operation Research*, **37**(2), págs. 1515–1536, 2010.
- [3] AXSATER, S., «Using the deterministic EOQ formula in stochastic inventory Control», *Management Science*, **42**(6), págs. 830–834, 1996.
- [4] BALAS, E., S. CERIA y G. CORNUEJOLS, «A lift and project cutting plane algorithm for mixed 0-1 programs», *Mathematical Programming*, **58**(1), págs. 295–324, 1993.
- [5] BALLOU, R., *Business logistic, supply chain management*, quinta edición, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [6] BARNHART, C., E. L. JOHNSON, G. L. NEMHAUSER, M. SAVELSBERGH y P. H. VANCE, «Branch and price: column generation for solving huge integer programs», *Operation Research*, **46**(3), págs. 316–329, 1998.
- [7] BORCHERS, B. y J. E. MITCHELL, «An improved branch and bound algorithm for mixed integer nonlinear programming», *Computers and Operation Research*, **21**(1), págs. 359–367, 1994.

-
- [8] BUSSIECK, M. R. y S. VIGERSK, «MINLP solver software», *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 2011.
- [9] COBOS, D., *Modelos de optimización entera mixta no lineal en sistemas de transporte de gas natural*, Tesis de Maestría, UANL, San Nicolás de los Garza, N.L, Noviembre 2003.
- [10] DAKIN, R. J., «A tree search algorithm for mixed integer programming problems», *Computer Journal*, **8**(1), págs. 250–255, 1965.
- [11] DASKIN, M., C. COULLARD y Z. J. SHEN, «An inventory location model: formulation, solution. Algorithm and computational results», *Annals of Operations Research*, **110**(1), págs. 83–106, 2002.
- [12] DURAN, M. A. y I. E. GROSSMAN, «An outer approximation algorithm for a class of mixed integer nonlinear programs», *Mathematical Programming*, **36**(1), págs. 307–339, 1986.
- [13] EPPEN, G., «Effects of centralization on expected cost in a multi echelon newsboy problem», *Management Science*, **25**(5), págs. 498–501, 1979.
- [14] ERLEBACHER, S. J. y R. D. MELLER, «The interaction of location and inventory in designing distribution system», *IIE Transaction*, **32**(2), págs. 155–166, 2000.
- [15] Ettl, M., G. FEIGIN, G. LIN y D. YAO, «A supply network model with base stock control and service requirement», *Operation Research*, **1**(2), págs. 216–232, 2000.
- [16] FLOUDAS, C. A., *Nonlinear and mixed integer optimization*, Oxford University Press, New York, 1995.
- [17] GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, *Cplex*, 2010.
- [18] GAREY, M. R. y D. S. JHONSON, *Computers and intractability: a guide to the theory of NP completeness*, W. H. Freeman, New York, 1979.

- [19] GARRIDO, R., «Modelación de sistemas de distribución de carga», *Revista de Ingeniería Industrial. Ediciones Universidad Católica de Chile*, **1**(3), págs. 999–624, 2001.
- [20] GEOFFRION, A. M., «Generalized benders decomposition», *Journal of Optimization Theory and Applications*, **10**(4), págs. 237–260, 1972.
- [21] GROSSMAN, I., «Review of nonlinear mixed integer and disjunctive programming techniques», *Optimization and Engineering*, **3**(3), págs. 227–252, 2002.
- [22] GROSSMANN, I. E. y Z. KRAVANJA, «Mixed integer nonlinear programming: A survey of algorithms and applications», en *Large scale optimization with applications, part II: optimal design and control, The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, tomo 93, Springer Verlag, Berlin, págs. 73–100, 1997.
- [23] GRUPTA, O. K. y R. V., «Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming», *Management Science*, **31**(12), págs. 1533–1546, 1985.
- [24] HARRIS, F. W., «How many parts to make at once», *The Magazine of Management*, **10**(2), págs. 135–136, 1913.
- [25] HILLIER, F., M. HILLER y G. LIEBERMAN, *Introduction to management science*, 8ª edición, McGraw Hill, New York, 2005.
- [26] JAYARAMAN, V., «Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design», *International Journal of Physical distribution & Logistic Management*, **18**(5), págs. 471–494, 1998.
- [27] JOHNSON, E. L. y M. W. P. NEMHAUSER E. L. ANS SAVELSBERGH, «Progress in linear programming based branch and bound algorithms», *INFORMS Journal of Computing*, 2000.
- [28] KOCIS, G. R. y I. E. GROSSMANN, «Relaxation strategy for the structural optimization of process flowsheets», *Industrial and Engineering Chemical Research*, **26**(1), págs. 1869–1987, 1987.

-
- [29] KUEHL, R. O., *Diseños de experimentos*, Ed. International Thomson Editores, New York, 2001.
- [30] LAND, A. H. y A. DOIG, «An automatic method for solving discrete programming problems», *Econometrica*, **28**(3), págs. 497–520, 1960.
- [31] LASTUSILTA, T., *GAMS MINLP solver comparisons and some improvements to the AlphaECP algorithm*, Tesis Doctoral, Abo Akademic University, 2011.
- [32] MCCARL, B. A., *GAMS user guide. Version 23.3*, GAMS Development Corporation, Octubre 2009.
- [33] MELO, M., S. NICKEL y F. SALDANHA DA GAMA, «Facility location and supply chain management. A review», *European Journal of Operation Research*, **196**(2), págs. 401–412, 2009.
- [34] Minitab Inc, State College, Pa, USA, *Minitab StatGuide. Version 15*, 2007.
- [35] MIRANDA, P. A. y R. A. GARRIDO, «Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **40**(3), págs. 183–207, 2004.
- [36] MIRANDA, P. A., R. A. GARRIDO y J. A. CERONI, «E-work based collaborative optimization approach for strategic logistic network design problem», *Computers and Industrial Engineering*, **57**(1), págs. 3–13, 2009.
- [37] MONTGOMERY, D. C., *Diseño y análisis de experimentos*, segunda edición, Grupo Editorial Iberoamericana, México, D.F, 2000.
- [38] MURTY, K. G. y S. N. KABADI, «Some NP-complete problems in quadratic and nonlinear programming», *Mathematical Programming*, **39**(1), págs. 117–129, 1987.
- [39] NABAR, S. y L. SCHRAGE, «Modeling and solving nonlinear integer programming problems», *Informe técnico*, Annual AIChE Meeting, Chicago, 1991.

- [40] NAHMIA, S., *Análisis de la producción y las operaciones*, primera edición, CECSA, México, 1999.
- [41] NOZICK, L. y M. TURNQUIST, «Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers», *European Journal of Operational Research*, **129**(2), págs. 362–371, 2001.
- [42] OZSEN, L., M. S. DASKIN y C. COULLARD, «Facility location modeling and inventory management with multisourcing», *Transportation Science*, **43**(4), págs. 455–472, 2009.
- [43] QIN, J., F. SHI, L. X. MIAO y G. J. TAN, «Optimal model and algorithm for multi commodity logistics network design considering stochastic demand and inventory control», *Systems Engineering, Theory and Practice*, **29**(4), págs. 176–183, 2009.
- [44] RADFORD, N. H., *Administración de operaciones y producción: calidad total y respuesta sensible rápida*, 8ª edición, McGraw Hill, Colombia, 2005.
- [45] SCHMITT, A. J., L. V. SNYDER y Z. J. SHEN, «Centralization versus decentralization: risk pooling, risk diversification, and supply uncertainty in a one warehouse multiple retailer system», *Working paper*, 2011.
- [46] SHEN, J. Z. M. y L. QI, «Incorporating inventory and routing cost in strategic location models», *European Journal of Operation Research*, **179**(2), págs. 372–389, 2007.
- [47] SHEN, Z. J. M., C. COULLARD y M. S. DASKIN, «A joint location inventory model», *Transportation Science*, **37**(1), págs. 40–55, 2003.
- [48] SIMCHI LEVI, D. y P. KAMINSKY, *Designing and managing the supply chain*, 8ª edición, McGraw Hill, Boston, 2007.
- [49] SNYDER, L. V., M. DASKIN y C. P. TEO, «The stochastic location model with risk pooling», *European Journal of Operation Research*, **179**(3), págs. 1221–1238, 2007.

- [50] VAVASIS, S. A., «Complexity issues in global optimization: a survey», en *Handbook of Global Optimization*, Kluwer Academic Press, págs. 27–41, 1995.
- [51] VECCHIETTI, A., *Técnica de optimización basadas en lógica para problemas discretos/continuos en ingeniería de procesos*, Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Litoral, 2000.
- [52] VECCHIETTI, A. y G. I.E., «Modeling issues and implementation of language for disjunctive programming», *Computers and Chemical Engineering*, **29**(1), págs. 2143–2155, 2000.
- [53] VILLALOBOS, Y., *Pre-procesamiento de un problema de optimización de redes de gas natural*, Tesis de Maestría, UANL, 2002.
- [54] VISWANATHAN, J. y I. E. GROSSMANN, «A combined penalty function and outer approximation method for MINLP optimization», *Computers and Chemical Engineering*, **14**(7), págs. 769–782, 1990.
- [55] WESTERLUND, T. y P. F., «An extended cutting plane method for solving convex MINLP problems», *Optimization and Engineering*, 2002.
- [56] WESTERLUND, T. y P. F., *Alpha*, GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2010.
- [57] WESTERLUND, T. y K. LUNDQUIST, «AlphaECP. Version 5.04. An interactive MINLP solver based on the extended cutting plane method», *Informe técnico*, Abo Akademi University, 2003.
- [58] WESTERLUND, T. y F. PETTERSSON, «A cutting plane method for solving convex MINLP problems», *Eng Computers and Chemical Engineering*, **19**(1), págs. S131–S136, 1995.
- [59] WU, L. Y., X. S. ZHANG y J. L. ZHANG, «Capacitated facility location problem with general setup cost», *Computers and Operations Research*, **33**(5), págs. 1226–1241, 2006.

-
- [60] YOU, F. y I. GROSSMANN, «Mixed integer nonlinear programming models and algorithms for large scale supply chain design with stochastic inventory management», *Industrial and Engineering Chemical Research*, **47**(1), págs. 7802–7817, 2008.
- [61] ZHENG, Y., «On properties of stochastic inventory system», *Management Science*, **38**(1), págs. 87–103, 1992.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Hernández González Nelly Monserrat

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

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MODELACIÓN DE UN PROBLEMA DE
LOCALIZACIÓN E INVENTARIO PARA UNA
CADENA DE SUMINISTRO

Nací en la ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Soy graduada de la carrera de Ingeniería Industrial para la Dirección por parte de la Universidad Anáhuac. Ingresé en el 2010 al Posgrado de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica donde se desarrolló este trabajo de investigación.