

**APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA BASADA EN EL
PROCEDIMIENTO FePIA PARA CARACTERIZAR LA RELACIÓN
ROBUSTEZ-COSTO EN EL PROBLEMA DE PLANEACIÓN DE LA
CAPACIDAD Y LOCALIZACIÓN DE ALMACENES EN CADENAS DE
SUMINISTRO**

RAFAEL DAVID TORDECILLA MADERA

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
ÉNFASIS LOGÍSTICA
CHÍA
2012**

**APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA METODOLOGÍA BASADA EN EL
PROCEDIMIENTO FePIA PARA CARACTERIZAR LA RELACIÓN
ROBUSTEZ-COSTO EN EL PROBLEMA DE PLANEACIÓN DE LA
CAPACIDAD Y LOCALIZACIÓN DE ALMACENES EN CADENAS DE
SUMINISTRO**

RAFAEL DAVID TORDECILLA MADERA

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS**

**Dirigido por:
Ing. MSc. LEONARDO JOSÉ GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
ÉNFASIS LOGÍSTICA
CHÍA
2012**

Notas de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Chía, 15 de febrero de 2012

A mis padres Rafael y Leila quienes siempre me han brindado su apoyo y su cariño, queriendo mostrarme un mundo en el que se pueda pensar, sentir y vivir mejor a pesar de las dificultades. ¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

Quisiera antes que nada agradecer a Dios, sea cual sea la idea que se tenga de él, por brindarme la sabiduría y fortaleza necesarias para cumplir con esta difícil labor. Estos dones son invaluableles.

Fueron muchas las personas que de una u otra forma contribuyeron al logro de los objetivos que me planteé al inicio de esta ardua tarea. Entre ellas y sin duda alguna, MI FAMILIA ocupa el primer lugar. Su apoyo fue y siempre será inconmensurable.

Debo brindarle también mi más sincero agradecimiento a la Universidad de La Sabana y en particular a la Facultad de Ingeniería, por permitirme llevar a cabo mis estudios de maestría a través de la beca que me fue otorgada.

También hubo muchas personas sin cuyo apoyo el alcance de este logro hubiera sido muchísimo más difícil. Entre ellas está el director de este proyecto, Ing. MSc. Leonardo González, la señora Nelly Rojas, quien me acogió en su hogar durante el tiempo que duró la maestría, la doctora María Fernanda Rodríguez, el presbítero Andrés Felipe Suárez, Diana Torres por su constante apoyo y ánimo en la etapa de desarrollo de este proyecto, la directora de la Maestría, MSc. Clementina Cueto, el entonces decano de la Facultad, Mauricio Pardo, la familia Quintero Muñoz, mis compañeros de estudio y todos los docentes que compartieron conmigo un pedacito de su conocimiento.

A TODOS, ¡MUCHÍSIMAS GRACIAS!

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 ROBUSTEZ EN CADENAS DE SUMINISTROS	23
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
3. JUSTIFICACIÓN	28
4. OBJETIVOS	29
5. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS	30
5.1 HIPÓTESIS	30
5.2 SUPUESTOS	30
6. METODOLOGÍA	31
6.1 PROCEDIMIENTO FePIA	32
6.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	33
6.2.1 ETAPA 1: Descripción preliminar de la cadena de suministros según el procedimiento FePIA	34
6.2.1.1 Descripción cualitativa y cuantitativa del requerimiento de robustez	34
6.2.1.2 Descripción cualitativa de las características de desempeño $\varphi_r \in \Phi$	35
6.2.1.3 Descripción cualitativa de los parámetros de perturbación $\pi_s \in \Pi$	36
6.2.2 ETAPA 2. Construcción del modelo experimental	37

6.2.2.1 Subíndices	37
6.2.2.2 Parámetros	38
6.2.2.3 Variables	38
6.2.2.4 Modelo	39
6.2.3 ETAPA 3. Identificación del impacto del parámetro de perturbación π sobre el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r	41
6.2.4 ETAPA 4. Determinación del comportamiento de cada estructura identificada	43
6.2.5 ETAPA 5. Evaluación de la relación robustez-costo	44
7. RESULTADOS	46
7.1 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN LITERAL DEL PROCEDIMIENTO FePIA	46
7.1.1 Nuevas corridas teniendo en cuenta la diferenciación entre estructuras	52
7.1.2 Resultados finales de la aplicación del Procedimiento FePIA	57
7.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	62
7.2.1 ETAPA 1: Descripción preliminar de la cadena de suministros según el procedimiento FePIA	62
7.2.2 ETAPA 2. Construcción del modelo experimental	62
7.2.3 ETAPA 3. Identificación del impacto del parámetro de perturbación π sobre el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r	63
7.2.4 ETAPA 4. Determinación del comportamiento de cada conjunto de estructuras identificado	68
7.2.5 ETAPA 5. Evaluación de la relación robustez-costo	68

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
8.1 ANÁLISIS DE LAS TABLAS DEL ANEXO A	75
8.2 EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ROBUSTEZ-COSTO	79
8.3 DEFINICIÓN DE UNA NUEVA MÉTRICA DE ROBUSTEZ	86
8.3.1 PASO 1. Definición de los valores extremos de la demanda y del porcentaje de demanda total satisfecha	87
8.3.2 PASO 2. Cálculo de la función de robustez	87
8.3.3 PASO 3. Determinación de la demanda límite	88
8.3.4 PASO 4. Evaluación de la robustez de una estructura	88
9. CONCLUSIONES	90
10. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Procedimiento FePIA vs. Metodología propuesta en la investigación	31
Tabla 2. Aspectos definidos en la Etapa 1	37
Tabla 3. Escenarios de demanda ($d_{k,ESC}^t$) propuestos por Aghezzaf (2005)	42
Tabla 4. Valores de los parámetros $dmin_k^t$ y $dmax_k^t$	43
Tabla 5. Valores de la demanda considerados para las corridas iniciales del modelo	48
Tabla 6. Resultados de las primeras corridas del modelo	49
Tabla 7. Estructuras identificadas en las primeras corridas del modelo	53
Tabla 8. Estructuras por valores de demanda y por periodo	54
Tabla 9. Resultados de las corridas del modelo para cuando se fijan las estructuras 1, 4, 3, 1 y 1 para los periodos 1, 2, 3, 4 y 5	54
Tabla 10. Valores de entrada considerados para Γ	58
Tabla 11. Resultados de las corridas del modelo con estructuras fijas y Γ como variable de entrada	58
Tabla 12. Comparación de los valores de φ_r al variar Γ	59
Tabla 13. Resultados de las primeras corridas con la metodología propuesta	65
Tabla 14. Estructuras que toma la cadena para distintos valores de δ	66
Tabla 15. Estructuras por valores de demanda y por periodo	67
Tabla 16. Conjuntos de estructuras	68
Tabla 17. Estructuras ordenadas según Γ y CSP	81

Tabla 18. Valor de Ω para $\pi = 4,8$	84
Tabla 19. Valor de Ω para $\pi = 5,8$	84
Tabla 20. Valor de Ω para $\pi = 6,9$	85
Tabla 21. Valor de Ω para $\pi = 7,9$	85
Tabla 22. Valor de Ω para $\pi = 9,0$	85
Tabla A1. Resultados al fijar el conjunto de estructuras A	99
Tabla A2. Resultados al fijar el conjunto de estructuras B	100
Tabla A3. Resultados al fijar el conjunto de estructuras C	101
Tabla A4. Resultados al fijar el conjunto de estructuras D	102
Tabla A5. Resultados al fijar el conjunto de estructuras E	103
Tabla A6. Resultados al fijar el conjunto de estructuras F	104
Tabla A7. Resultados al fijar el conjunto de estructuras G	105
Tabla A8. Resultados al fijar el conjunto de estructuras H	106
Tabla A9. Resultados al fijar el conjunto de estructuras I	107
Tabla A10. Resultados al fijar el conjunto de estructuras J	108
Tabla A11. Resultados al fijar el conjunto de estructuras K	109
Tabla A12. Resultados para el costo total ($CTOTAL$)	110
Tabla A13. Resultados para el costo sin penalización (CSP)	110
Tabla A14. Resultados para el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ)	111
Tabla A15. Resultados para la expansión total de la capacidad (φ_1)	111
Tabla A16. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 1)	112

Tabla A17. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 2)	112
Tabla A18. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 3)	113
Tabla A19. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 4)	113
Tabla A20. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 5)	114
Tabla A21. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 1)	114
Tabla A22. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 2)	115
Tabla A23. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 3)	115
Tabla A24. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 4)	116
Tabla A25. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 5)	116

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema de la metodología llevada a cabo	33
Figura 2. Modelo de cadena de suministros utilizado en la presente investigación	35
Figura 3. π vs. φ_1	50
Figura 4. π vs. φ_2 en el periodo 1	50
Figura 5. π vs. φ_2 en el periodo 2	50
Figura 6. π vs. φ_2 en el periodo 3	50
Figura 7. π vs. φ_2 en el periodo 4	50
Figura 8. π vs. φ_2 en el periodo 5	50
Figura 9. π vs. φ_3 en el periodo 1	51
Figura 10. π vs. φ_3 en el periodo 2	51
Figura 11. π vs. φ_3 en el periodo 3	51
Figura 12. π vs. φ_3 en el periodo 4	51
Figura 13. π vs. φ_3 en el periodo 5	51
Figura 14. π vs. φ_4 en el periodo 1	51
Figura 15. π vs. φ_4 en el periodo 2	52
Figura 16. π vs. φ_4 en el periodo 3	52
Figura 17. π vs. φ_4 en el periodo 4	52
Figura 18. π vs. φ_4 en el periodo 5	52

Figura 19. π vs. φ_1	55
Figura 20. π vs. φ_3 en el periodo 1	55
Figura 21. π vs. φ_3 en el periodo 2	55
Figura 22. π vs. φ_3 en el periodo 3	56
Figura 23. π vs. φ_3 en el periodo 4	56
Figura 24. π vs. φ_3 en el periodo 5	56
Figura 25. π vs. φ_4 en el periodo 1	56
Figura 26. π vs. φ_4 en el periodo 2	56
Figura 27. π vs. φ_4 en el periodo 3	56
Figura 28. π vs. φ_4 en el periodo 4	57
Figura 29. π vs. φ_4 en el periodo 5	57
Figura 30. Γ vs. cada φ_r para cuando $\pi = 7,9$	60
Figura 31. Γ vs. φ_1 para todos los valores de π considerados y según la Tabla 8	61
Figura 32. π vs. Γ para cada estructura identificada	69
Figura 33. π vs. CSP para cada estructura identificada	70
Figura 34. Γ vs. CSP para algunos valores de la demanda promedio (π)	70
Figura 35. π vs. φ_1 para cada estructura identificada	71
Figura 36. π vs. φ_3 en el periodo 1	72
Figura 37. π vs. φ_4 en el periodo 1	72
Figura 38. π vs. φ_3 en el periodo 2	72
Figura 39. π vs. φ_4 en el periodo 2	73

Figura 40. π vs. φ_3 en el periodo 3	73
Figura 41. π vs. φ_4 en el periodo 3	73
Figura 42. π vs. φ_3 en el periodo 4	74
Figura 43. π vs. φ_4 en el periodo 4	74
Figura 44. π vs. φ_3 en el periodo 5	74
Figura 45. π vs. φ_4 en el periodo 5	74
Figura 46. Evaluación de la robustez de la estructura D	89

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. TABLAS DE RESULTADOS DE LA ETAPA 4	98

RESUMEN

El presente proyecto establece y evalúa una metodología basada en el procedimiento FePIA para caracterizar la relación robustez-costo en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes en cadenas de suministros.

Inicialmente se definieron los requerimientos de robustez, las características de desempeño y los parámetros de perturbación asociados al sistema estudiado. Luego se construyó un modelo de programación lineal que representara al sistema y con el cual se identificaron ciertas estructuras que adquiriría el mismo. Para cada estructura se determinó el impacto de los parámetros de perturbación sobre los requerimientos de robustez y las características de desempeño. Finalmente, con estos resultados se concluyó que una cadena de suministros más robusta es más costosa, independientemente de la estructura considerada.

Palabras Clave: Robustez, Costo, Cadena de suministros, Programación lineal, Logística

ABSTRACT

This project establishes and evaluates a methodology based on the procedure FePIA to characterize the relationship robustness-cost on capacity planning and warehouse location problem in supply chains.

First, this requires defining robustness requirements, performance features and perturbation parameters associated with the studied system. In order to represent the system, a linear programming model was designed to identify certain structures in supply chain. For each structure, the impact of perturbation parameters on robustness requirement and performance features was identified. Finally, these results let to conclude that a more robust supply chain is more expensive, regardless of the structure under consideration.

Keywords: Robustness, Cost, Supply Chain, Linear Programming, Logistics

INTRODUCCIÓN

En los procesos de planeación de las cadenas de suministro, la incertidumbre es un factor importante que puede influenciar la efectividad de su configuración y coordinación, afectando su desempeño de una manera poco despreciable (Peidro, Mula, & Poler, 2009). Sin embargo, no son abundantes los trabajos que tienen en cuenta este factor. La revisión hecha por Melo, Nickel, & Saldanha-da-Gama (2009) encuentra que el 20% de los artículos revisados tienen en cuenta variables estocásticas, mientras que en la revisión hecha por Mula, Peidro, Diaz-Madronero, & Vicens (2010), el 30% de los trabajos tienen en cuenta la incertidumbre.

Desde este punto de vista, una manera de abordar esta incertidumbre inherente a las cadenas de suministro es considerando el concepto de robustez. Bertsimas, & Sim (2004) definen una solución robusta para un problema como aquella que es inmune a la incertidumbre en los datos. Ali, Maciejewski, Siegel, & Kim (2004) la definen como la preservación de ciertas características deseadas del sistema, a pesar de que se presenten fluctuaciones en el comportamiento de sus partes componentes o del ambiente. Así pues, se dirá que un modelo o sistema es robusto si es capaz de mantener sus características de desempeño en un nivel aceptable ante variaciones inesperadas e inciertas de parámetros asumidos inicialmente como invariables.

Precisamente Ali *et al.* (2004) proponen una metodología llamada por ellos el procedimiento FePIA, el cual es usado a manera de métrica de robustez, es decir, con él se determina cuantitativamente qué tan robusto es un sistema. El presente proyecto está basado esencialmente en el uso de esta metodología para caracterizar la relación robustez-costo en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes para un horizonte de planeación de varios periodos y considerando mercados con demandas inciertas, es decir, el presente proyecto establece y evalúa una metodología basada en el procedimiento FePIA aplicada en el contexto de la toma de las decisiones estratégicas en una cadena de suministros. Así pues, efectivamente el logro de este objetivo es el que le permite al proyecto realizar un verdadero aporte novedoso al conocimiento pues, por un lado, en la literatura no son muchos los trabajos que caracterizan la relación robustez-costo, y por el otro, el procedimiento FePIA jamás ha sido aplicado en el contexto de la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros.

Con este objetivo en mente, inicialmente se hace una descripción de la cadena de suministros enfocándose en conceptos como “requerimientos de robustez”, “características de desempeño” y “parámetros de perturbación”. Estas definiciones básicas dan pie a la construcción de un modelo de programación lineal usado

como herramienta de diseño de la cadena y con el cual se puede identificar cuál es el impacto de los parámetros de perturbación sobre los requerimientos de robustez y sobre las características de desempeño, para una serie de estructuras básicas identificadas en la cadena de suministros. Finalmente, la identificación de tal impacto permite evaluar la relación entre la robustez y el costo y proponer una métrica de robustez basada en el procedimiento FePIA pero adaptada al caso particular de la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES

En la literatura abundan los trabajos que de una u otra manera abordan el tema de cadena de suministros, pero no muchos de ellos brindan una definición formal del mismo. Entre los que sí lo hacen, Bilgen (2009) la define como una estructura integrada que involucra el abastecimiento, la producción, el abastecimiento, la distribución y el control de los bienes. Mula *et al.* (2010) la considera como un proceso integrado en el cual un grupo de varias organizaciones, tales como proveedores, productores, distribuidores y minoristas, trabajan juntos para adquirir materias primas con el objetivo de convertirlas en productos terminados que son distribuidos a los minoristas. Bidhandi, Yusuff, Ahmad, & Bakar (2009) la definen como una red de proveedores, plantas de manufactura, almacenes y canales de distribución organizados para adquirir materias primas, convertirlas en productos terminados y distribuir estos a los clientes.

Ahora bien, varios autores (Ghiani, Laporte, & Musmanno, 2004; Min, & Zhou, 2002; Peidro *et al.*, 2009) clasifican los problemas relacionados a cadenas de suministros dividiéndolos en problemas estratégicos, tácticos y operativos. Los primeros están relacionados con decisiones a largo plazo (varios años), los problemas tácticos con decisiones a mediano plazo (desde varios meses hasta dos años) y los últimos con aquellas a corto plazo (días o semanas). El presente trabajo se enfocará en las decisiones de tipo estratégico.

Entre tales decisiones a largo plazo se encuentran las concernientes a la planeación de la capacidad y la localización de almacenes, las cuales están entre las más importantes decisiones de inversión de capital que los administradores de la cadena de suministro deben tomar (Aghezzaf, 2005). Frecuentemente estas decisiones se toman al mismo tiempo que aquellas en las que se asigna la proporción de demanda que será satisfecha por los distintos almacenes (u otras instalaciones). Por ejemplo, si un almacén es reubicado, los clientes que tenía antes son distintos a los que tendrá en su nueva ubicación.

En la literatura relacionada a los problemas de tipo estratégico, se destaca la revisión realizada por Melo *et al.* (2009), en la que se recopilan un conjunto de 139 artículos que de una u otra forma se encuentran relacionados con modelos de localización de instalaciones. Los autores realizan una clasificación básica entre trabajos que consideran un solo periodo de planeación y aquellos que consideran varios periodos, encontrando que el 82% de los artículos hacen parte del primer grupo. Por otro lado, diferencian entre modelos determinísticos y estocásticos,

encontrando que muy pocos trabajos consideran variables estocásticas (aproximadamente el 20%) y en particular, trabajos que combinen tales variables con otros aspectos, por ejemplo, una estructura con más de dos eslabones. Además de esto, según este mismo autor son pocos los trabajos que integran decisiones de tipo estratégico con decisiones de tipo táctico-operativo.

A pesar de este bajo porcentaje de trabajos que tratan con variables estocásticas, es decir, con incertidumbre, en la literatura se encuentran varios autores que tratan el tema de decisiones estratégicas teniendo en cuenta la incertidumbre en las variables. En la revisión hecha por Mula *et al.* (2010), en la que recopila 54 artículos relacionados con modelos de programación matemática para cadenas de suministros, aproximadamente el 30% de ellos incluye incertidumbre, pero sólo uno (Sabri, & Beamon, 2000) mezcla incertidumbre con decisiones estratégicas. La gran mayoría de los trabajos investigados (72%) por Mula *et al.* (2010) modelan la cadena de suministros desde el punto de vista de las decisiones tácticas, haciendo uso tanto de modelos determinísticos como estocásticos.

Por otro lado, Peidro *et al.* (2009) realizan una revisión de 174 artículos en los que se muestran modelos cuantitativos para la planeación de la cadena de suministros bajo condiciones de incertidumbre. Ellos proponen tres formas para clasificar los trabajos investigados: 1) según la fuente de la incertidumbre, 2) según el tipo de problema (estratégico, táctico u operacional), 3) según el enfoque de la modelación (modelos analíticos, de simulación o basados en inteligencia artificial). Con miras a lo que se quiere desarrollar en el presente trabajo, se mencionará que, tomando en cuenta la demanda como fuente de incertidumbre, 24 trabajos (aproximadamente 14%) abordan el problema desde el punto de vista estratégico. De este 14%, aproximadamente el 9% tratan con modelos analíticos, 3% con modelos de simulación, 1% con modelos basados en inteligencia artificial y 1% con modelos híbridos (realizando distintas combinaciones de dos de los enfoques anteriores).

Uno de los aspectos a resaltar en los trabajos mencionados previamente es la poca atención que se le ha dado a la consideración de la incertidumbre (variables estocásticas) en los problemas investigados. Sin embargo, el ambiente de negocios futuro bajo el que opera una cadena de suministros es generalmente desconocido. A lo sumo, se pueden considerar varios escenarios futuros plausibles (Klibi, Martel, & Guitouni, 2010). Blackhurst, Wu, & O'Grady, (2004) consideran como una de las causas de la inherente complejidad de la cadena de suministros a su naturaleza dinámica y a su incertidumbre en la demanda, en las capacidades, en los tiempos de transporte, en los tiempos de manufactura, entre otros. Sin embargo, varios autores consideran que no tener en cuenta la incertidumbre

inherente puede tener efectos negativos en la cadena de suministros. Gupta, & Maranas (2003) comentan que subestimar la incertidumbre y su impacto puede llevar a tomar decisiones de planeación que ni salvaguarden a la compañía en contra de amenazas ni pueda tomar ventaja de las oportunidades que altos niveles de incertidumbre pueda proporcionar. Por ejemplo, no tomar en cuenta las fluctuaciones de la demanda puede llevar ya sea a que la empresa tenga clientes insatisfechos perdiendo participación de mercado, o a tener costos de inventario excesivamente altos. Jung, Blau, Pekny, Reklaitis, & Eversdyk (2004) coinciden en estas afirmaciones, exponiendo que la incertidumbre en la demanda puede tener un impacto dominante en las utilidades y en la satisfacción del cliente, ya que ella puede resultar en exceso o en insuficiencia de la producción, incurriendo en exceso de inventarios (y por tanto en costos innecesarios) o en incapacidad para satisfacer las necesidades del cliente (incurriendo en la potencial pérdida de ellos).

Por otro lado, Santoso, Ahmed, Goetschalckx, & Shapiro, (2005) consideran que, a menos que la cadena de suministros sea diseñada de una manera robusta con respecto a condiciones inciertas de operación, el impacto de las ineficiencias operativas tales como los retrasos y las interrupciones serán más grandes de lo necesario. Este autor introduce un término que será utilizado a lo largo de todo el presente trabajo, el cual es *robustez*. Genin, Lamouri, & Thomas (2008) entienden la robustez como un enfoque que intenta hallar una política de decisión que arroja los resultados más estables, es decir, con baja variabilidad de las medidas de desempeño clave (tales como nivel de servicio o inventario total en la cadena de suministros). Bertsimas, & Sim (2004) comentan que una solución robusta es aquella que es inmune a la incertidumbre en los datos. Klibi *et al.* (2010) enfocan su definición específicamente a cadenas de suministros, afirmando que robustez es la cualidad de una cadena de suministros para permanecer efectiva para todos los posibles futuros plausibles. Ali *et al.* (2004) definen robustez como la preservación de ciertas características deseadas del sistema, a pesar de que se presenten fluctuaciones en el comportamiento de sus partes componentes o del ambiente. Cabe anotar que en el desarrollo de la presente investigación se acogerá la definición de robustez ofrecida por Ali *et al.* (2004).

Ahora bien, los artículos de revisión mencionados en párrafos anteriores no abundan mucho en tal término. Por un lado, Peidro *et al.* (2009) mencionan 3 artículos (aproximadamente 1,7%) que hacen uso de la optimización robusta como enfoque de modelación. Por otro lado, Melo *et al.* (2009) mencionan 2 artículos (aproximadamente 1,4%) que hacen uso de la misma herramienta. Uno de estos artículos mencionados por Peidro *et al.* (2009) y Melo *et al.* (2009) es común a ambos. El autor de tal artículo es Aghezzaf (2005), quien en su trabajo investiga acerca del problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes

para un horizonte de planeación de varios periodos y considerando mercados con demandas inciertas e impredecibles. Básicamente, se trata de diseñar una cadena de suministros de tres eslabones en la que se deben tomar dos tipos de importantes decisiones: 1) la capacidad que debe ser instalada en las plantas de producción en cada periodo y 2) dónde localizar y operar los almacenes. Para el diseño de esta cadena, el autor compara tres modelos: un modelo determinístico, un modelo de optimización robusta y un procedimiento de descomposición que comprende un modelo de optimización robusta mejorado con un algoritmo de relajación Lagrangeana. Los resultados obtenidos por este autor al aplicar su procedimiento de descomposición arrojan un costo que está un 18,8% por encima del obtenido a través de la optimización robusta sin relajación Lagrangeana y sólo un 2,3% por debajo del costo obtenido con el modelo determinístico. Sin embargo, debe aclararse que no se realiza una medición de qué tan robusto es el modelo propuesto.

Tal concepto de optimización robusta fue introducido en el año 1995 por Mulvey, Vanderbei, & Zenios (1995). El desarrollo llevado a cabo por Aghezzaf (2005) se ciñe estrictamente a las ideas establecidas por Mulvey *et al.* (1995). Estos modelos de optimización robusta plantean que para poder llevar a cabo la modelación se deben establecer previamente un conjunto de escenarios $\Omega = \{1, 2, 3, \dots, S\}$, cada uno de ellos con una probabilidad de ocurrencia p_s tal que $\sum_{s \in \Omega} p_s = 1$. Para el caso del trabajo de Aghezzaf (2005), tales escenarios están formados por un conjunto de valores distintos para la demanda para cada uno de ellos y para cada periodo modelado, la cual es considerada como la única fuente de incertidumbre.

Sin embargo, algo que no es aclarado ni en el trabajo de Mulvey *et al.* (1995) ni en el de Aghezzaf (2005) es cómo establecer las probabilidades correspondientes a cada escenario. De hecho, bajo condiciones de profunda incertidumbre la información disponible no es suficiente para estimar una objetiva o subjetiva probabilidad para estos escenarios (Klibi *et al.*, 2010). Además de esto, la cantidad de escenarios posibles es casi infinito (Klibi *et al.*, 2010), lo cual hace que, mientras más escenarios sean considerados en el modelo, mayor sea el tiempo de resolución del modelo matemático, por ser este generalmente NP-Completo y por tanto difícil de resolver, de tal manera que ya que este problema debe ser resuelto para cada escenario s , el tiempo computacional se incrementará dramáticamente cada vez que el número de escenarios se haga más grande (Aghezzaf, 2005).

1.2 ROBUSTEZ EN CADENAS DE SUMINISTROS

Además de los artículos de Mulvey *et al.* (1995) y Aghezzaf (2005) ya mencionados anteriormente y que abordan el tema de la robustez, el primero de manera general y el segundo en el tema específico de cadenas de suministros, existen otros autores que estudian las cadenas de suministro desde el punto de vista de la robustez y no sólo eso, sino que algunos de ellos de alguna manera tienen en cuenta los costos asociados, lo cual es de interés para los objetivos de la presente investigación.

Inicialmente, se dirá que de acuerdo a la clasificación dada anteriormente para los problemas relacionados con cadena de suministros dividiéndolos en problemas estratégicos, tácticos y operativos, cada uno de los artículos investigados aborda el problema de robustez en cadenas de suministros desde uno de estos enfoques de acuerdo a la parte de la cadena que sea objeto de estudio. Es así como Goetschalckx, & Cordova (2004); Chen, Yuan, Chang, Lee, & Ciou (2006); Aghezzaf (2005); Yu, & Li (2000); Bertsimas, & Thiele (2004); Pishvaei, Rabbani, & Torabi (2011); Komoto, Tomiyama, Silvester, & Brezet (2009); Yang, Wen, & Wang (2009); Chen, Yuan, & Lee (2007); Pan, & Nagi (2010); y List, Wood, Nozick, Turnquist, Jones, Kjeldgaard, & Lawton (2003) abordan la robustez desde el punto de vista estratégico; Genin *et al.* (2008) y Van Landeghem, & Vanmaele (2002) la abordan desde el punto de vista táctico; y Sungur, Ordoñez, & Dessouky (2008) y Chiang, Russell, Xu, & Zepeda (2009) abordan la robustez desde el punto de vista operativo. Algunos, sin embargo, realizan un híbrido entre 2 de estos tipos de problemas. Entre ellos se encuentran por un lado, Gutiérrez, Kouvelis, & Kurawarwala (1996) y Azaron, Brown, Tarim, & Modarres (2008), cuyo problema estudiado es estratégico-táctico. Por otro lado están Chen, & Lee (2004) y Li, & Marlin (2009), quienes lo abordan desde el punto de vista táctico-operativo.

Por otro lado, se encontraron varios autores además de Mulvey *et al.* (1995) y Aghezzaf (2005) que hacen uso de modelos de optimización robusta. Ellos son Sungur *et al.* (2008); Yu *et al.* (2000); Bertsimas, & Thiele (2004); Azaron *et al.* (2008); Pan *et al.* (2010); y List *et al.* (2003). La argumentación de varios de los autores consultados es que esta es una variación de la programación estocástica debido a la asignación de probabilidades, aunque realmente el tratamiento que se le da posteriormente es el de un modelo lineal típico, aclarando que el problema puede llegar a ser NP-completo como se comentó anteriormente.

Sin embargo, no todos los trabajos consultados abordan la robustez desde el punto de vista de la optimización robusta. Por ejemplo, otros modelos considerados por los autores son principalmente modelos de programación lineal o

entera mixta (Bertsimas, & Sim, 2004; Chen *et al.*, 2007; Genin *et al.*, 2008; Gutiérrez *et al.*, 1996; Pishvae *et al.*, 2011); modelos multi-objetivo (Chen *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2006; Chiang *et al.*, 2009; Komoto *et al.*, 2009) y modelos de simulación discreta (Chiang *et al.*, 2009; Komoto *et al.*, 2009; Van Landeghem *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2009). En menor medida se hace uso de optimización estocástica (Goetschalckx *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2009) y programación dinámica (Bertsimas, & Thiele, 2004). Además de esto, dos de los trabajos considerados abordan el tema desde 2 enfoques distintos. Uno de ellos es el realizado por Bertsimas, & Thiele (2004), quienes comparan los resultados de un modelo de optimización robusta para una cadena de suministros con los resultados de un modelo de programación dinámica, obteniendo que el primero se desempeña mejor que el segundo medidos con base en distintos parámetros relacionados con costo. El otro trabajo que aborda el tema desde 2 enfoques distintos es el de Komoto *et al.* (2009), quienes realizan una combinación entre un modelo multi-objetivo y uno de simulación discreta para evaluar el desempeño de las operaciones de la cadena de suministros de fabricantes de equipos originales.

Por otra parte, algunos de los trabajos consultados no tienen como objetivo principal mostrar la formulación de cierto modelo, sino realizar una propuesta heurística o meta-heurística para resolver los modelos que utilizan en sus trabajos (Aghezzaf, 2005; Azaron *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007; Chiang *et al.*, 2009; Goetschalckx *et al.*, 2004; Gutiérrez *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2010), obteniendo como conclusión general que su algoritmo propuesto se desempeña adecuadamente.

Además de lo anterior, cabe decir que todos los artículos considerados mencionan de una u otra manera el término robustez, sin embargo, en términos generales el enfoque de cada autor es distinto, aunque entre unos pocos se presentan algunas semejanzas. Por un lado, se tiene aquellos autores que no ofrecen ningún tipo de definición de robustez, sino que se limitan a utilizar el término sin preocuparse por aclararlo. Además de las mencionadas en páginas anteriores, entre los que sí dan alguna definición se encontró que la de Van Landeghem *et al.* (2002) coincide con la de Genin *et al.* (2008), la cual es tomada de Lee, & Yu (1997). Se destacan también aquellos autores que de alguna manera en su definición incluyen el término “incertidumbre” o “fluctuaciones en los datos”. Estos son Bertsimas, & Sim (2004); Bertsimas, & Thiele (2004); Pishvae *et al.*, 2011; Sungur *et al.* (2008) y Yang *et al.* (2009).

Otro aspecto a tener en cuenta en cuanto a la robustez, es aquel que tiene que ver con la medida que de ella se haga en cada artículo, así como el establecimiento de una relación entre la robustez y el costo. Así, mientras Aghezzaf (2005);

Goetschalckx *et al.* (2004); Gutiérrez *et al.* (1996); Li *et al.* (2009); Yu *et al.* (2000); Bertsimas, & Thiele (2004); List *et al.* (2003) y Pishvaei *et al.* (2011) ni miden la robustez ni establecen una relación entre la robustez y el costo; Sungur *et al.* (2008); Bertsimas, & Sim (2004) y Genin *et al.* (2008) sí abordan ambos aspectos. Otros artículos como Chen *et al.* (2004); Chen *et al.* (2006); Chen *et al.* (2007); Azaron *et al.* (2008); Chiang *et al.*, 2009; Komoto *et al.* (2009); Van Landeghem *et al.* (2002); y Yang *et al.* (2009) sólo miden la robustez pero no establecen relación entre esta y el costo.

Finalmente, de los trabajos que sí establecen una relación entre la robustez y el costo, se destaca el de Bertsimas, & Sim (2004), que miden la robustez como la probabilidad de violar las restricciones de un modelo de programación lineal y asumen una solución robusta como aquella que es inmune a incertidumbre en los datos. Se encuentra de manera general que mientras más robustez haya, más costosa es la gestión. También se debe mencionar el trabajo de Sungur *et al.* (2008), quienes miden la robustez en el marco del *Vehicle Routing Problem* (VRP) a través de la demanda insatisfecha y definiendo una solución robusta como aquella que es buena para todas las posibles incertidumbres en los datos. Su objetivo realmente no es establecer una relación entre la robustez y el costo, pero al final muestran una tabla en la que comparan tal demanda insatisfecha con un *ratio* que cuantifica el costo relativo extra de la solución robusta respecto al costo de una solución determinística.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

No es común en la literatura sobre cadenas de suministro encontrar problemas relacionados con robustez en los que se realice una caracterización de la relación existente entre este parámetro y el costo, es decir, trabajos en los que se compare qué tan robusto es el sistema diseñado frente al costo que esa robustez genera. Algunos de ellos se enfocan en la proposición de algoritmos para agilizar el proceso de resolución de un modelo de optimización robusta, como el caso de Gutiérrez *et al.* (1996), Santoso *et al.* (2005) y otros mencionados en el capítulo anterior. Otros, toman la robustez y el costo como parámetros relevantes en sus estudios, pero su objetivo no es encontrar alguna relación entre ellos (Chen *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2009; Sungur *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2000). Por otro lado, trabajos como el de Ben-Tal, & Nemirovski (2000) ni siquiera tocan el tema de los costos, sino que se enfocan sólo en la optimización robusta.

Sin embargo, como se mencionó en el capítulo anterior, fueron hallados tres artículos que efectivamente establecen alguna relación entre la robustez y el costo. Por un lado está Bertsimas, & Sim (2004), quienes haciendo uso de la optimización robusta realizan una comparación entre la robustez y el costo. Tal comparación es realizada asumiendo la robustez como la probabilidad de violar las restricciones de un modelo de programación lineal y sus propuestas son puestas a prueba a través del clásico problema de la mochila, de un problema de optimización de portafolio y de un problema tomado de la librería *Netlib*, del que no se menciona qué tipo de problema es.

Por otro lado se tiene a Sungur *et al.* (2008), quienes presentan un modelo de optimización robusta para resolver el problema del VRP con demandas inciertas en el que la medida de la robustez se establece a través de la demanda insatisfecha. Finalmente, se encontró que Genin *et al.* (2008) toman un modelo de programación lineal para la planeación táctica de cadenas de suministros, en el que se incluye la toma de decisiones sobre productos fabricados y enviados, manejo de inventarios, operadores contratados, entre otras. En tal investigación se utiliza el diseño de experimentos para estudiar la influencia de diferentes políticas sobre la robustez y el costo en un caso real para una empresa de automóviles.

Cabe entonces resaltar en este punto que, si bien Bertsimas, & Sim (2004) caracterizan la relación robustez-costo, esto se hace en el marco de la optimización robusta y con base en modelos que no corresponden a una cadena de suministros tal como se pretende en el presente proyecto. Además, Sungur *et al.* (2008) miden la robustez generada a través de la aplicación de la optimización robusta en un VRP y en el que el costo no es más que una medida de desempeño en la que no se abunda

mucho. Esto quiere decir que en esta investigación se aborda un problema de tipo operativo y no estratégico, como se pretende en el presente trabajo. Finalmente, Genin *et al.* (2008) abordan un problema de tipo táctico en el que la evaluación se hace a través de diseño de experimentos, el cual es un enfoque diferente al de la presente investigación.

Teniendo en cuenta entonces estas consideraciones, surgen las siguientes dos preguntas de investigación:

- ¿Es posible aplicar una metodología para modelar una cadena de suministros con demandas inciertas desde el punto de vista de la toma de decisiones estratégicas, de tal manera que el sistema pueda ser medido al mismo tiempo con base en qué tan robusto es y en qué tan costoso es?
- ¿Qué relación existe entre la robustez y el costo en un marco distinto al de la optimización robusta y en un modelo de toma de decisiones estratégicas en cadenas de suministros?

3. JUSTIFICACIÓN

Los trabajos acerca de optimización robusta presentados por Mulvey *et al.* (1995) y Aghezzaf (2005) se enfocan principalmente en encontrar el costo (u otra variable) mínimo para problemas diversos. Los primeros, que fueron quienes introdujeron ese modelo, muestran su aplicación a problemas tan diversos como el problema clásico de la dieta, un problema de ampliación de capacidad de centrales eléctricas o el diseño de una estructura de tal manera que su peso total sea mínimo. Por otro lado, como se comentó anteriormente, Aghezzaf (2005) presenta un modelo de cadena de suministros con el objetivo de minimizar el costo total. Nótese que a pesar de que ambos artículos hablan de robustez, ninguno se preocupa por medir qué tan robusto es el sistema diseñado.

Partiendo de este supuesto, en la literatura se encontró un artículo que ha sido citado en 46 ocasiones según ISI Web of Science, el cual propone una metodología que consiste en una descripción matemática de una métrica para la medición de la robustez en la asignación de recursos con respecto a características deseadas de desempeño del sistema en contra de perturbaciones que puedan afectar tales características (Ali *et al.*, 2004). Esta metodología es llamada por los mismos autores “el procedimiento FePIA”, lo cual es una sigla que significa *Features, Perturbation, Impact* y *Analysis*. En el capítulo correspondiente a la metodología con la que se desarrolló la presente investigación, se explicará cada uno de estos con mayores detalles. Ahora bien, el procedimiento FePIA ha sido diseñado para ser aplicado en sistemas distribuidos de computadores y así mismo son la mayoría de los trabajos que citan tal artículo.

Como puede observarse, por un lado, los modelos de optimización robusta se encargan de minimizar alguna variable sin determinar qué tan robusto es el sistema modelado. Por otro lado, la metodología para la medida de la robustez propuesta por Ali *et al.* (2004) no ha sido aplicada a cadenas de suministros y tampoco tiene en cuenta el costo en que se pueda incurrir al modelar sistemas más robustos. Así pues, al combinar los conceptos de robustez y de costo en un mismo modelo, el cual será utilizado para la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros, los resultados de la presente investigación serán un aporte novedoso al estado del conocimiento, contribuyendo a que eventualmente ellos sean utilizados para modelar, en el mundo real, cadenas de suministros que requieran tener un nivel adecuado de robustez según sus necesidades particulares, sin incurrir en costos excesivos debidos al mismo nivel de robustez.

4. OBJETIVOS

General. Establecer y evaluar una metodología basada en el procedimiento FePIA para caracterizar la relación robustez-costo en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes para un horizonte de planeación de varios periodos y considerando mercados con demandas inciertas

Específicos.

- Determinar la manera en la que el procedimiento FePIA puede ser aplicado a la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros, describiendo sus requerimientos de robustez, sus características de desempeño y los parámetros de perturbación que pueden afectar a tales características
- Determinar cuantitativamente el impacto de los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño y los requerimientos de robustez a través de un modelo de programación lineal, considerando varias estructuras identificadas a través de la misma herramienta
- Evaluar la relación robustez-costo para las estructuras identificadas

5. HIPÓTESIS Y SUPUESTOS

5.1 HIPÓTESIS

Como se comentó anteriormente, los artículos de Aghezzaf (2005) y Ali *et al.* (2004) miden cada uno de ellos sólo costo o robustez, respectivamente. Esto hace que no se cuente con un indicador de robustez-costo para un problema como el descrito. Teniendo esto en cuenta, se plantea la siguiente hipótesis:

La metodología propuesta para la medición de la robustez en el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes para un horizonte de planeación de varios periodos y considerando mercados con demandas inciertas, permite encontrar que la relación entre la robustez y el costo es directamente proporcional.

5.2 SUPUESTOS

La metodología propuesta permite determinar qué tan robusto es un sistema, es decir, hasta qué punto pueden variar ciertas perturbaciones que afectan un sistema de tal manera que se preserven sus características de desempeño (Ali *et al.*, 2004).

6. METODOLOGÍA

La metodología propuesta por Ali *et al.* (2004), llamada por los mismos autores el “Procedimiento FePIA”, fue inicialmente seguida de manera exacta en el desarrollo del presente proyecto pero aplicada en el contexto de una cadena de suministros a través de un modelo de programación lineal. Sin embargo, como consecuencia de la aplicación “literal” de tal procedimiento se obtuvieron unos resultados que desde el punto de vista logístico no guardaban coherencia con lo que se esperaba encontrar con base en lo mostrado por Ali *et al.* (2004). Para más detalles de los resultados obtenidos en la aplicación de esta metodología se invita a leer el Capítulo 7, “Resultados”.

Por este motivo se propuso una nueva metodología aun basada en el procedimiento FePIA pero ligeramente distinta a la propuesta originalmente por Ali *et al.* (2004). En la Tabla 1 se muestra una breve comparación de los pasos presentados originalmente por tal autor con los pasos propuestos en la metodología llevada a cabo en la presente investigación.

PROCEDIMIENTO FePIA	METODOLOGÍA PROPUESTA
Descripción de los requerimientos de robustez y las características de desempeño	Este paso fue conservado
Descripción de los parámetros de perturbación	Este paso fue conservado
Identificar el impacto que tienen los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño a través de una función matemática. Originalmente este paso supone varias cosas que fueron cambiadas en total o en parte: <ul style="list-style-type: none"> Las características de desempeño son cuantitativas El impacto de los parámetros de perturbación se identifica únicamente sobre las características de desempeño El establecimiento de una función matemática explícita hace parte de los objetivos de este paso 	En este paso se modificó lo propuesto en el procedimiento FePIA. Tales cambios fueron: <ul style="list-style-type: none"> Se incluyó en el análisis una característica cualitativa: “Estructura de la cadena de suministros en cada periodo t” No solo se identificó el impacto de los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño sino también sobre el requerimiento de robustez No fue establecida una función matemática que mostrara tales relaciones, sino que a partir de la identificación de las estructuras se construyeron gráficas en las cuales se establecieron empíricamente las relaciones entre las variables consideradas
Establecer la más pequeña variación en los valores de los parámetros de perturbación que causarán que alguna de las características de desempeño viole el requerimiento de robustez	Se descartó este paso tal cual como se definía originalmente. En vez de esto se hizo uso de las gráficas arrojadas en el paso anterior para determinar la robustez del sistema y además, como un aporte original, la evaluación de la relación robustez-costos

Tabla 1. Procedimiento FePIA vs. Metodología propuesta en la investigación

6.1 PROCEDIMIENTO FePIA

Inicialmente se describirán brevemente los pasos de este procedimiento para luego ahondar en la metodología seguida en el desarrollo del presente trabajo.

Según Ali *et al.* (2004), este es un procedimiento diseñado para obtener una métrica de robustez para un sistema cualquiera, es decir, es un procedimiento en el que se formula una descripción matemática de una métrica que evalúa la robustez de una asignación de recursos en un sistema con respecto a ciertas características de desempeño del mismo, en contra de perturbaciones tanto del sistema como de condiciones ambientales. Su nombre está basado en las letras iniciales de cada uno de los pasos de los que consta, los cuales se describen a continuación:

1. Describir cuantitativamente el requerimiento que hace que el sistema estudiado sea considerado robusto. Basado en éste, determinar las características (*Features*) de desempeño del sistema que deben estar limitadas para satisfacer tal requerimiento. Matemáticamente, sea Φ el conjunto de características de desempeño del sistema. Entonces, para cada $\varphi_r \in \Phi$ se describe una variación tolerable en φ_r , definida por $\langle \beta_r^{min}, \beta_r^{max} \rangle$, de tal manera que no se viole el requerimiento de robustez definido previamente.
2. Determinar los parámetros de perturbación (*Perturbation*) que afectan las características de operación del sistema y por tanto su robustez. Matemáticamente, sea Π el conjunto de parámetros de perturbación, entonces $\pi_s \in \Pi$ es cada elemento que pertenece a Π .
3. Identificar el impacto (*Impact*) que tienen los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño del sistema. Matemáticamente, para cada $\varphi_r \in \Phi$ se debe determinar una relación $\varphi_r = f_{rs}(\pi_s)$ que permita relacionar cada φ_r con cada π_s , en donde f_{rs} es una función que establece tal relación.
4. Determinar la robustez mediante un análisis (*Analysis*) en el que se establezca la más pequeña variación colectiva en los valores de los parámetros de perturbación que causarán que alguna de las características de desempeño viole el requerimiento de robustez. Matemáticamente, para cada $\varphi_r \in \Phi$ deben determinarse los valores límite de π_s tal que satisfagan las relaciones $f_{rs}(\pi_s) = \beta_r^{min}$ y $f_{rs}(\pi_s) = \beta_r^{max}$.

6.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Como se comentó anteriormente, en el presente trabajo se propuso una metodología basada en el procedimiento FePIA pero novedosa en algunos aspectos. Tal metodología se ha dividido en una serie de etapas, las cuales se esquematizan en la Figura 1. De manera muy general, en tal figura se muestra que una vez hecha una descripción cualitativa del requerimiento de robustez (Γ), de las características de desempeño (φ_r) y del parámetro de perturbación (π), se pasa a determinar el impacto de este último sobre los anteriores, lo cual permite identificar ciertas estructuras básicas de la cadena de suministros. Luego, para cada una de ellas en particular se realiza nuevamente el paso de identificar el impacto de π sobre Γ y φ_r . Finalmente, una vez para cada estructura se haya determinado cuál es este impacto, se pasa a evaluar la relación robustez-costos a partir de los resultados obtenidos. Vale aclarar que transversal a todo este procedimiento está el uso de un modelo de programación lineal, a manera de herramienta para poder llevar a cabo los pasos descritos. En el resto del capítulo se detalla lo que se acaba de describir.

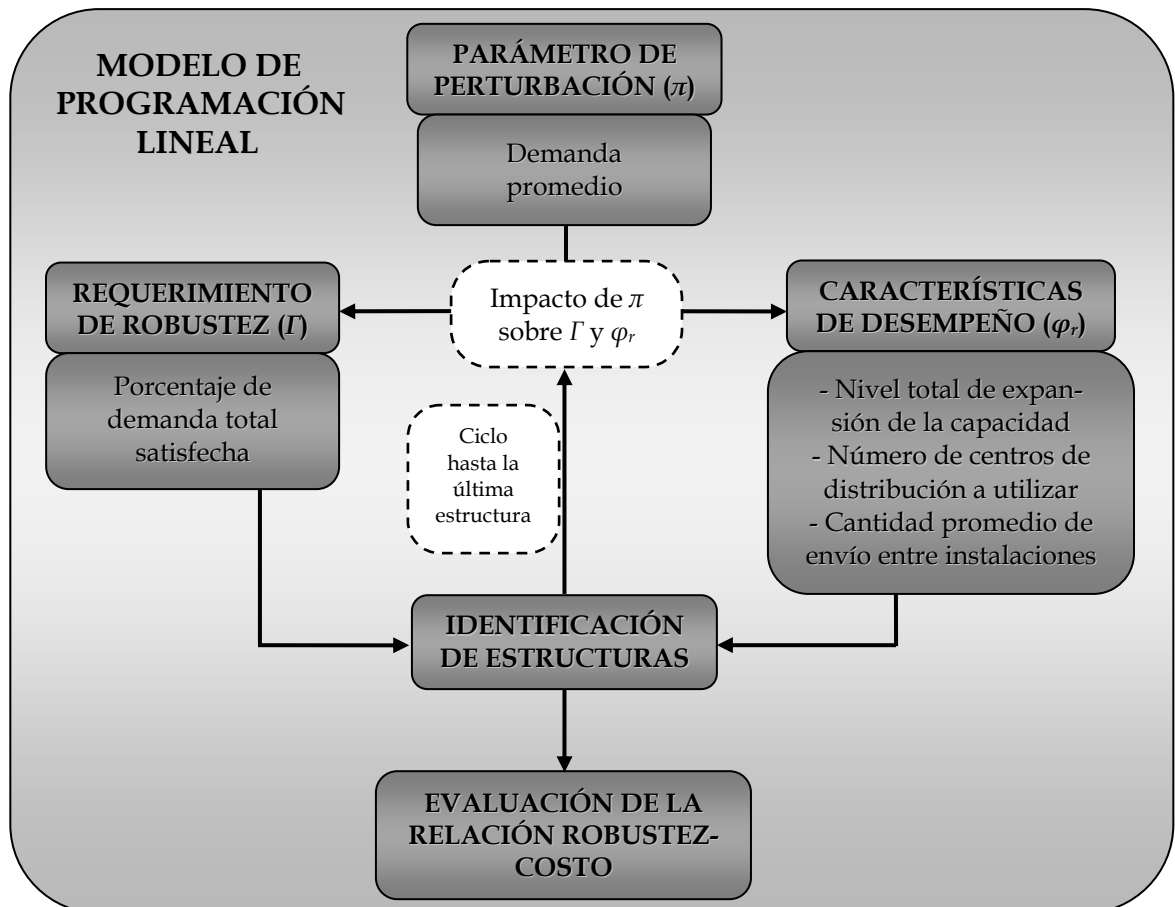


Figura 1. Esquema de la metodología llevada a cabo

6.2.1 ETAPA 1: Descripción preliminar de la cadena de suministros según el procedimiento FePIA. Esta etapa consiste en el desarrollo de varias sub-etapas, las cuales se describen a continuación.

6.2.1.1 Descripción cualitativa y cuantitativa del requerimiento de robustez. El primer paso que se llevó a cabo fue determinar un indicador que señalara cuándo el sistema se está comportando de una manera más robusta o menos robusta, es decir, algo que indique si la cadena de suministro está funcionando o no correctamente a pesar de que cambien algunos de los parámetros de entrada asumidos como constantes inicialmente.

En la literatura se pueden encontrar muchas medidas de desempeño para una cadena de suministros (Chan, 2003) sin embargo, intuitivamente se puede suponer que el nivel de satisfacción de la demanda es una medida adecuada para la robustez, debido a que las ventas perdidas son inaceptables desde una perspectiva de relaciones con los clientes debido al constante cambio de sus lealtades en el actual entorno empresarial altamente competitivo (Gupta, Maranas, & McDonald, 2000). Estos autores proponen que este nivel de satisfacción sea medido como la probabilidad de que la demanda de un producto sea menor o igual que la disponibilidad u oferta del mismo. Para efectos de la presente investigación se realizó una leve modificación a este indicador, de tal manera que el requerimiento de robustez considerado fue el *Porcentaje de demanda total satisfecha Γ* , definido como la relación existente entre las unidades de producto efectivamente entregadas y la demanda total del mismo.

Con base en esto, para el porcentaje de demanda total satisfecha Γ se definieron unos límites denotados por $\langle \alpha^{min}, \alpha^{max} \rangle$. Sin embargo, cabe anotar que como límite superior para tal porcentaje (α^{max}) es obvio que lo ideal es un 100%, aunque a veces este no se alcance debido a que las mismas características del sistema no lo permitan (por ejemplo, si en la modelación de la cadena las plantas de producción no tienen la capacidad suficiente para satisfacer la demanda). En cuanto al límite inferior, inicialmente se había considerado como una variable de entrada para el paso 1 del procedimiento FePIA con el objetivo de determinar los límites $\langle \beta_r^{min}, \beta_r^{max} \rangle$, y como una variable de salida para el paso 3 del mismo. En dicho paso 1 se había considerado fijarlo inicialmente en 90% y en una etapa posterior fijarlo en 95%, 85% y 80% con el objetivo de observar el comportamiento del sistema. Estos porcentajes se habían determinado de esta manera basado en la investigación de Gupta *et al.* (2000), quienes realizan una gráfica del costo vs. el nivel de satisfacción de la demanda, variando este entre 80% y 97%. No obstante, en la metodología que definitivamente se llevó a cabo solamente se dejó como

variable de salida para luego ser comparada con los niveles de demanda. En el capítulo 7, correspondiente a los resultados, se ofrecen más detalles al respecto.

6.2.1.2 Descripción cualitativa de las características de desempeño $\varphi_r \in \Phi$. Según Ali *et al.* (2004), estas características son aquellas que deben variar de una manera limitada para asegurar que se cumpla con el requerimiento de robustez descrito anteriormente. Es decir, son variables propias del sistema que al adoptar ciertos valores hacen que este ya no sea considerado robusto. Para el caso de esta investigación en particular y tomando el modelo de programación lineal propuesto por Aghezzaf (2005), el cual se basa en una cadena de suministros modelo mostrada en la Figura 2, se han identificado sus respectivas variables de respuesta, de las cuales se tomaron inicialmente las siguientes como características de desempeño.

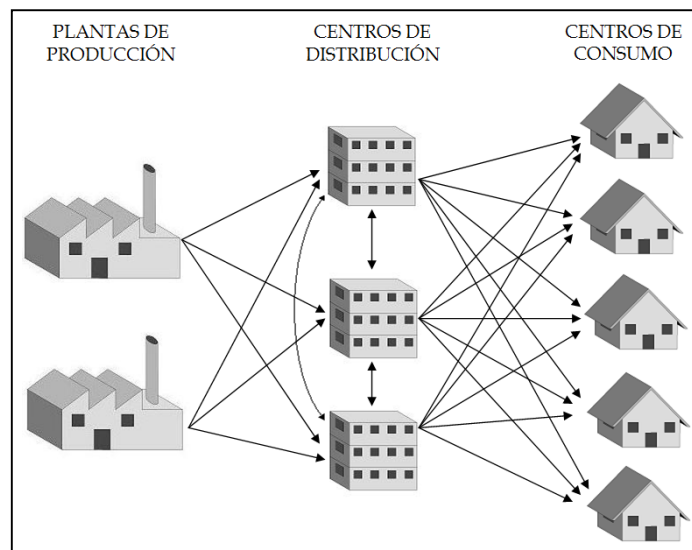


Figura 2. Modelo de cadena de suministros utilizado en la presente investigación

- **Nivel total de expansión de la capacidad.** El modelo propuesto por Aghezzaf (2005) consta de 3 eslabones: plantas de producción, centros de distribución y centros de consumo (ver la descripción de la Etapa 2 en la Sección 6.2.2 para una explicación detallada del modelo). Para el caso de las plantas es posible aumentar su capacidad (expresada en unidades de producto) en cada uno de los periodos en el horizonte de planeación, es decir, una de las variables de respuesta del modelo es el nivel de expansión de capacidad de cada planta i en cada periodo t . Para efectos de la presente investigación, se tomó como característica de desempeño el *nivel total de expansión de la capacidad*, que no es más que la suma de todas las expansiones de capacidad individuales.

- **Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo t .** En el modelo utilizado en esta investigación es posible hacer uso o no de cada centro de distribución en cada periodo t . Así pues, esta característica de desempeño indica la cantidad total de centros de distribución que serán utilizados en cada uno de los periodos del horizonte de planeación en consideración.
- **Cantidad de producto promedio que se envía entre instalaciones.** Las principales variables de respuesta del modelo de Aghezzaf (2005) corresponden a las cantidades de producto que deben ser transportadas de las plantas de producción a los centros de distribución, de estos a los centros de consumo, y a cantidades transferidas entre centros de distribución. Dado esto, para la presente investigación se tomaron entonces como características de desempeño las siguientes: *Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t* y *Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t* . Este promedio es calculado tomando la cantidad total de producto a enviar entre cada par de eslabones y dividiéndolo entre el número total de arcos abiertos entre el mismo par de eslabones. No obstante, a pesar de que el modelo considera la posibilidad de transferir unidades de producto entre centros de distribución, estos parámetros no fueron tenidos en cuenta debido a su poca relevancia en cuanto a los resultados obtenidos.
- **Estructura de la cadena de suministros.** Finalmente, se tuvo en cuenta una cuarta característica de desempeño que se consideró como la más relevante en el desarrollo de la investigación. Esta característica se refiere a las configuraciones que adquiere la cadena luego de ser corrido el modelo con las respectivas modificaciones en las variables de entrada, es decir, se determina de manera gráfica e integral qué arcos utilizar, cuánto enviar a través de cada uno de ellos y qué centros de distribución utilizar.

6.2.1.3 Descripción cualitativa de los parámetros de perturbación $\pi_s \in \Pi$. Estos parámetros hacen referencia a variables no controlables que están sujetas a incertidumbre y que afectan las características de desempeño del sistema y por tanto su robustez (Ali *et al.*, 2004). En la literatura se pueden encontrar diversas fuentes de incertidumbre para una cadena de suministro. Según Peidro *et al.* (2009), estas pueden deberse a:

1. Abastecimiento, la cual es causada por la variabilidad en las operaciones de los proveedores debido a fallas o demoras en las entregas.

2. Proceso - Manufactura, asociada a la poca fiabilidad en el proceso de producción debido a, por ejemplo, daños inesperados en las máquinas.
3. Demanda, la cual es la más importante de las tres y que puede presentarse debido a pronósticos inexactos, los cuales se ven afectados por el mismo carácter volátil de la demanda.

Para la presente investigación, la única fuente de incertidumbre que se tuvo en cuenta fue la demanda, estableciendo así que el único parámetro de perturbación puntual para el sistema a estudiar fue la *Demanda promedio*, en donde este promedio se calculó agregando la demanda de cada mercado k en cada periodo t . Así pues, de ahora en adelante no se hablará de los parámetros de perturbación $\pi_s \in \Pi$, sino del parámetro de perturbación π .

Un resumen de los aspectos definidos en la Etapa 1 se muestra en la Tabla 2.

REQUERIMIENTO DE ROBUSTEZ Γ	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO $\varphi_r \in \Phi$	PARÁMETRO DE PERTURBACIÓN π
Porcentaje de demanda total satisfecha	$\varphi_1 =$ Nivel total de expansión de la capacidad	Demanda promedio
	$\varphi_2 =$ Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo t	
	$\varphi_3 =$ Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t	
	$\varphi_4 =$ Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t	
	$\varphi_5 =$ Estructura de la cadena de suministros en cada periodo t	

Tabla 2. Aspectos definidos en la Etapa 1

6.2.2 ETAPA 2. Construcción del modelo experimental. Con base en el modelo de Aghezzaf (2005) se construyó el modelo mostrado a continuación, el cual es un modelo de programación lineal para el problema de la planeación estratégica de la capacidad y la localización de almacenes. Este programa lineal está basado en el modelo de cadena de suministros mostrado en la Figura 2.

6.2.2.1 Subíndices

$i = 1, 2$: Indica la planta de producción

$j = 1, 2, 3$: Indica el centro de distribución

$k = 1, 2, 3, 4, 5$: Indica el centro de consumo

$t = 1, 2, 3, 4, 5$: Indica el periodo de tiempo

6.2.2.2 Parámetros

CP_{ij}^t = Costo unitario de transporte entre la planta de producción i y el centro de distribución j en el periodo t

CC_{jk}^t = Costo unitario de transporte entre el centro de distribución j y el centro de consumo k en el periodo t

$CT_{jj'}^t$ = Costo unitario de transferencia entre el centro de distribución j y el centro de distribución j' en el periodo t para $j \neq j'$. Costo unitario de mantenimiento de inventario en el centro de distribución j en el periodo t para $j = j'$

g_i^t = Costo fijo de expansión de capacidad de la planta de producción i en el periodo t

h_i^t = Costo unitario de expansión de capacidad de la planta de producción i en el periodo t

f_j^t = Costo fijo de operación del centro de distribución j en el periodo t

$CAPL_i$ = Capacidad de la planta de producción i al inicio del periodo 1

$CAPMAX_i^t$ = Máxima expansión de capacidad de la planta de producción i en el periodo t

$CAPCD_j^t$ = Capacidad del centro de distribución j en el periodo t

d_k^t = Demanda del centro de consumo k en el periodo t

$Cpen$ = Costo unitario de penalización por demanda insatisfecha

6.2.2.3 Variables

x_{ij}^t = Cantidad a enviar desde la planta de producción i hasta el centro de distribución j en el periodo t

y_{jk}^t = Cantidad a enviar desde el centro de distribución j hasta el centro de consumo k en el periodo t

$z_{jj'}^t$ = Cantidad a transferir desde el centro de distribución j hasta el centro de distribución j' en el periodo t para $j \neq j'$. Cantidad a mantener en inventario en el centro de distribución j en el periodo t para $j = j'$

u_i^t = Binaria que indica si se expande o no la capacidad de la planta de producción i en el periodo t

w_i^t = Tamaño de expansión de capacidad de la planta de producción i en el periodo t

v_j^t = Binaria que indica si el centro de distribución j es utilizado o no en el periodo t

$CTOTAL$ = Costo total de diseño de la cadena

6.2.2.4 Modelo

$$\begin{aligned}
Min \ CTOTAL = & \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^5 CP_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 CC_{jk}^t y_{jk}^t + \sum_{j=1}^3 \sum_{j'=1}^3 \sum_{t=1}^5 CT_{jj'}^t z_{jj'}^t \\
& + \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^5 (g_i^t u_i^t + h_i^t w_i^t) + \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^5 f_j^t v_j^t \\
& + CPen * \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 \left(d_k^t - \sum_{j=1}^3 y_{jk}^t \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij}^t \leq CAPI_i + \sum_{\tau=1}^t w_i^\tau \quad \forall i, t \tag{2}$$

$$w_i^t \leq CAPMAX_i^t u_i^t \quad \forall i, t \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^5 y_{jk}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{jj'}^t \leq CAPCD_j^t v_j^t \quad \forall j, t \tag{4}$$

$$\sum_{j=1}^3 y_{jk}^t \leq d_k^t \quad \forall k, t \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^2 x_{ij}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{j'j}^{t-1} = \sum_{k=1}^5 y_{jk}^t + \sum_{j'=1}^3 z_{jj'}^t \quad \forall j, t \tag{6}$$

$$\forall x_{ij}^t, y_{jk}^t, z_{jj'}^t, w_i^t \geq 0 \tag{7}$$

$$\forall u_i^t, v_j^t \in \{0,1\} \tag{8}$$

En este modelo, la ecuación (1) indica la función objetivo, en la cual se busca minimizar el costo total del diseño de la cadena. La ecuación (2) es una restricción que indica que la cantidad total a enviar desde cada planta de producción en cada periodo debe ser como máximo igual al tamaño de su expansión de capacidad. La ecuación (3) indica que el nivel de expansión de capacidad está limitado por la decisión de expandir o no la misma. La ecuación (4) indica que la cantidad a enviar desde cada centro de distribución en cada periodo no debe superar su capacidad. La ecuación (5) indica que la cantidad a enviar a cada centro de consumo en cada periodo no debe ser mayor que la cantidad demandada. La ecuación (6) es una restricción de equilibrio de flujo de producto para cada centro de distribución en cada periodo. La ecuación (7) es la restricción de no negatividad. La ecuación (8) indica las variables que son de tipo binario.

Además de estas ecuaciones, se definieron varias auxiliares, algunas con base en los aspectos expresados en la Tabla 2 y otras debido a su importancia para el análisis posterior de los resultados. Tales ecuaciones son:

1. Porcentaje de demanda total satisfecha (Γ):

$$\Gamma = \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 y_{jk}^t}{\sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t} * 100\% \quad (9)$$

2. Nivel total de expansión de la capacidad (φ_1):

$$\varphi_1 = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^5 w_i^t \quad (10)$$

3. Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t (φ_3):

$$\varphi_3 = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 x_{ij}^t}{\text{Arcos totales utilizados entre las plantas de producción y los centros de distribución}} \quad \forall t \quad (11)$$

4. Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t (φ_4):

$$\varphi_4 = \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 y_{jk}^t}{\text{Arcos totales utilizados entre los centros de distribución y los centros de consumo}} \quad \forall t \quad (12)$$

5. Demanda promedio (π):

$$\pi = \frac{\sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t}{25} \quad (13)$$

6. Costo total sin penalización (CSP):

$$CSP = CTOTAL - CPen * \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 \left(d_k^t - \sum_{j=1}^3 y_{jk}^t \right) \quad (14)$$

Finalmente, el modelo y estas ecuaciones auxiliares se programaron en el software GAMS® y se procedió a hacer varias corridas según las etapas posteriores de la presente investigación, haciendo uso del solver CPLEX.

6.2.3 ETAPA 3. Identificación del impacto del parámetro de perturbación π sobre el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r . En esta etapa se varió de manera controlada los valores de la demanda promedio (π) para identificar la manera en la que se comportaban el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r . Los valores de la demanda considerados se basaron en el trabajo de Aghezzaf (2005) pero fueron tomados de una manera distinta, la cual se explicará a continuación.

Los datos originales para la demanda (identificados aquí con el parámetro $d_{k,ESC}^t$) propuestos por Aghezzaf (2005) se muestran en la Tabla 3. Como puede observarse, este autor propone cinco escenarios en los que cada centro de consumo tiene una demanda específica en cada periodo de tiempo y cada uno de tales escenarios es independiente del otro en su investigación.

En la presente investigación se descartó la idea de los escenarios y se definieron 2 nuevos parámetros con base en los utilizados por Aghezzaf (2005), los cuales se

definen según las ecuaciones (15) y (16) y cuyos valores específicos se muestran en la Tabla 4.

$$dmin_k^t = \min_{ESC} \{d_{k,ESC}^t\} \quad \forall k, t \quad (15)$$

$$dmax_k^t = \max_{ESC} \{d_{k,ESC}^t\} \quad \forall k, t \quad (16)$$

ESCENARIO (ESC)	CENTRO DE CONSUMO	PERIODO DE PLANEACIÓN				
		t1	t2	t3	t4	t5
1	k1	5	5	10	5	5
	k2	2	2	10	2	2
	k3	10	10	15	10	10
	k4	3	3	10	3	3
	k5	10	10	15	10	10
2	k1	6	7	9	8	3
	k2	1	1	5	1	3
	k3	13	12	18	10	12
	k4	4	6	8	4	4
	k5	8	12	15	7	9
3	k1	5	5	4	4	3
	k2	1	2	3	1	2
	k3	9	11	12	12	12
	k4	6	4	2	4	6
	k5	13	7	12	13	10
4	k1	3	6	7	5	4
	k2	1	3	1	2	2
	k3	11	8	10	7	12
	k4	4	6	2	4	2
	k5	12	10	13	7	12
5	k1	7	5	8	7	6
	k2	1	3	1	2	3
	k3	11	12	13	13	11
	k4	6	5	2	5	5
	k5	7	10	10	9	7

Tabla 3. Escenarios de demanda ($d_{k,ESC}^t$) propuestos por Aghezzaf (2005)

Posteriormente, se determinó entonces que la demanda (d_k^t) que alimentaría el modelo mostrado en la sección 6.2.2 y con la cual se calcula el parámetro de perturbación π (ecuación 13) oscilaría entre los parámetros $dmin_k^t$ y $dmax_k^t$, así:

$$d_k^t = dmin_k^t + \frac{\delta * (dmax_k^t - dmin_k^t)}{20} \quad \forall k, t \quad (17)$$

PARÁMETRO	CENTRO DE CONSUMO	PERIODO DE PLANEACIÓN					DEMANDA PROMEDIO (π)
		$t1$	$t2$	$t3$	$t4$	$t5$	
$dmin_k^t$	$k1$	3	5	4	4	3	4,8
	$k2$	1	1	1	1	2	
	$k3$	9	8	10	7	10	
	$k4$	3	3	2	3	2	
	$k5$	7	7	10	7	7	
$dmax_k^t$	$k1$	7	7	10	8	6	9,0
	$k2$	2	3	10	2	3	
	$k3$	13	12	18	13	12	
	$k4$	6	6	10	5	6	
	$k5$	13	12	15	13	12	

Tabla 4. Valores de los parámetros $dmin_k^t$ y $dmax_k^t$

En donde δ es un parámetro que varía entre cero (0) y veinte (20), de tal manera que en total el modelo se alimenta con 21 valores de d_k^t ($\forall k, t$), (es decir, el modelo se corre inicialmente en 21 ocasiones), los cuales varían lineal y proporcionalmente entre $dmin_k^t$ y $dmax_k^t$. Esta variación controlada de d_k^t es lo que permite determinar la manera en la que se comportan el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r , es decir, identificar el impacto del parámetro de perturbación π sobre el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r .

6.2.4 ETAPA 4. Determinación del comportamiento de cada estructura identificada. Como se comentó anteriormente, la característica de desempeño más importante para el desarrollo de la presente investigación es la estructura de la cadena de suministros (φ_5). Así pues, como resultado de la etapa anterior cada valor considerado de la demanda promedio π (21 en total) arrojó una estructura específica. Sin embargo, para algunos valores de π las estructuras observadas fueron las mismas, de tal manera que en total se obtuvieron 11 estructuras distintas. Luego, mediante restricciones adicionales en el modelo considerado, se obligó a este a que adoptara cada una de estas estructuras y para cada una de ellas se volvió a variar el parámetro π a través de los 21 valores considerados en la etapa anterior. Es decir, en esta etapa en total se llevaron a cabo 231 corridas del modelo de programación lineal descrito en la sección 6.2.2.

Cabe anotar que en esta etapa ya no se consideró entonces a φ_5 como variable de salida (como en la etapa anterior, en donde sí se consideró así) sino como variable de entrada (como es obvio por lo explicado en el párrafo anterior). Además de esta, tampoco se consideró la medida del número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo t (φ_2), pues al considerar la estructura como algo fijo

ya esta característica dejaría de ser una variable y por tanto dejaría de tener sentido su consideración como variable de salida.

Matemáticamente hablando, el modelo mostrado en la sección 6.2.2 se modificó de la siguiente manera para fijar cada estructura:

1. Se crearon 2 nuevos parámetros (valores conocidos):

- a_{ij}^t = Matriz binaria que indica si en el periodo t el arco (i, j) hace parte ($a_{ij}^t = 1$) o no ($a_{ij}^t = 0$) de la estructura a fijar
- b_{jk}^t = Matriz binaria que indica si en el periodo t el arco (j, k) hace parte ($b_{jk}^t = 1$) o no ($b_{jk}^t = 0$) de la estructura a fijar

2. Se crearon 2 nuevas restricciones:

$$0.1a_{ij}^t \leq x_{ij}^t \leq Ma_{ij}^t \quad \forall i, j, t \quad (18)$$

$$0.1b_{jk}^t \leq y_{jk}^t \leq Mb_{jk}^t \quad \forall j, k, t \quad (19)$$

Estas restricciones (18) y (19) obligan al modelo a que una estructura específica se fije, de tal manera que permiten que, al variar la demanda (ecuaciones 13 y 17), se pueda analizar cómo se comporta cada una de las estructuras en términos del porcentaje de demanda satisfecha (Γ), las características de desempeño (φ_r), el costo total sin penalización (CSP) y el costo total ($CTOTAL$).

6.2.5 ETAPA 5. Evaluación de la relación robustez-costo. Una vez determinados Γ , φ_r y CSP a partir de la variación controlada de la demanda promedio (π) para cada estructura (φ_5) por separado, se elaboraron varias gráficas que relacionan varios de estos parámetros entre sí. No obstante, aunque también se graficaron otras relaciones, las que se consideraron como más relevantes teniendo en cuenta como criterio la evaluación de la relación robustez-costo son:

- Demanda promedio (π) vs. porcentaje de demanda satisfecha (Γ)
- Demanda promedio (π) vs. costo total sin penalización (CSP)
- Porcentaje de demanda satisfecha (Γ) vs. costo total sin penalización (CSP)

Vale aclarar que no se realizaron gráficas que relacionaran el costo total ($CTOTAL$) con alguna otra variable, debido a que el costo total incluye la penalización y es claro que mientras más demanda insatisfecha haya, mayor será la influencia de tal demanda en el costo total a través de la penalización. Por tal

motivo el análisis se realizó tomando solamente el costo sin penalización (*CSP*), pues este refleja realmente el costo de la gestión.

Así pues, a partir de tales gráficas se pudo entonces determinar cuáles estructuras son más robustas, es decir, cuáles de ellas tienen mejor capacidad de mantener el porcentaje de demanda satisfecha dentro de unos límites tolerables y a qué costo se pueden mantener estas condiciones, estableciendo así qué tan costoso es garantizar una mayor robustez para una estructura específica.

7. RESULTADOS

En el capítulo 6 referente a la metodología, se expuso que al seguir literalmente el procedimiento FePIA propuesto por Ali *et al.* (2004) se obtuvieron unos resultados que desde el punto de vista logístico no guardaban coherencia con lo que se esperaba encontrar con base en lo mostrado por estos autores. Es por este motivo que se propuso una nueva metodología, la cual ya fue descrita en la sección 6.2 y que para sus primeras dos etapas y parte de la tercera conservó lo que ya se había obtenido a partir del Procedimiento FePIA (a excepción de la definición de la característica de desempeño φ_5 = Estructura de la cadena de suministros [ver Tabla 2], la cual fue una inclusión posterior). Por tal motivo, es de gran utilidad mostrar los resultados obtenidos con la aplicación literal del procedimiento FePIA para entender de una mejor manera la metodología propuesta en el presente trabajo, así que en las dos secciones siguientes se muestran ambos conjuntos de resultados, iniciando en la sección 7.1 con los resultados de la aplicación literal del Procedimiento FePIA y luego en la sección 7.2 con los resultados obtenidos con la nueva metodología propuesta en la presente investigación.

7.1 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN LITERAL DEL PROCEDIMIENTO FePIA

Los primeros dos pasos de tal procedimiento (ver sección 6.1) consisten en la definición del requerimiento de robustez (Γ), las características de desempeño (Φ) y el parámetro de perturbación (Π). Estos pasos pueden observarse en la Etapa 1 de la metodología de trabajo descrita en la sección 6.2.1. Luego, el tercer paso de la aplicación del procedimiento FePIA consiste en identificar el impacto que tienen los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño del sistema. Para llevar a cabo este paso se utilizó como herramienta un modelo de programación lineal, el cual fue mostrado en la sección 6.2.2.

Una vez construido el modelo, se definieron los parámetros $dmin_k^t$ y $dmax_k^t$ explicados en la sección 6.2.3 para poder variar la demanda de una manera controlada en el contexto del modelo matemático. Sin embargo, a diferencia de lo expuesto en tal sección, inicialmente se habían considerado sólo 5 posibles conjuntos de valores experimentales para la demanda d_k^t :

1. El conjunto de valores compuesto por $dmin_k^t$
2. El conjunto de valores compuesto por $dmax_k^t$

3. El conjunto de valores compuesto por el promedio calculado sobre las demandas propuestas por Aghezzaf (2005) en cada escenario, definido en el contexto de esta investigación como $prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$ (ver sección 6.2.3 y en particular la Tabla 3)
4. El conjunto de valores compuesto por el promedio entre los $dmin_k^t$ y los $prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$
5. El conjunto de valores compuesto por el promedio entre los $prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$ y los $dmax_k^t$

En otras palabras, lo que se hizo fue tomar los valores mínimos y máximos de los datos de demanda propuestos por Aghezzaf (2005), tomar los valores promedio ($prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$), tomar un nuevo promedio entre los valores mínimos y los promedios absolutos y finalmente tomar un nuevo promedio entre los promedios absolutos y los valores máximos. En la Tabla 5 se muestran entonces los valores definitivos con los que se alimentó el modelo en cada corrida.

Como variables de salida de interés se tuvieron en cuenta las siguientes:

- Porcentaje de demanda total satisfecha (I)
- Costo total de diseño de la cadena ($CTOTAL$)
- Costo total sin penalización (CSP)
- Nivel total de expansión de la capacidad (φ_1)
- Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo t (φ_2)
- Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t (φ_3)
- Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t (φ_4)

Así pues, para las variables de salida consideradas las corridas iniciales del modelo dieron como resultado los valores mostrados en la Tabla 6.

Aplicando entonces literalmente el paso 3 del procedimiento FePIA, se buscó determinar una relación $\varphi_r = f_r(\pi)$ que permitiera relacionar cada característica de desempeño φ_r con el parámetro de perturbación π . Con miras entonces a establecer tal relación, se hizo uso de los resultados mostrados en la Tabla 6 para elaborar las gráficas mostradas en las Figuras 3 a 18. Ellas pueden clasificarse en 3 tipos de acuerdo a la correlación que puede percibirse visualmente, así:

- 10 gráficas con nula o muy poca correlación (Figuras 4 - 11, 14 y 15)

- 2 gráficas con gran correlación, no necesariamente lineal (Figuras 3 y 16)
- 4 gráficas con correlación perfecta en línea recta (Figuras 12, 13, 17 y 18)

VALORES DE DEMANDA	CENTRO DE CONSUMO	PERIODO DE PLANEACIÓN					DEMANDA PROMEDIO (π) ¹
		<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	<i>t5</i>	
Mínimo ($dmin_k^t$)	<i>k1</i>	3	5	4	4	3	4,8
	<i>k2</i>	1	1	1	1	2	
	<i>k3</i>	9	8	10	7	10	
	<i>k4</i>	3	3	2	3	2	
	<i>k5</i>	7	7	10	7	7	
Entre el Mínimo y el Promedio	<i>k1</i>	4,1	5,3	5,8	4,9	3,6	5,8
	<i>k2</i>	1,1	1,6	2,5	1,3	2,2	
	<i>k3</i>	9,9	9,3	11,8	8,7	10,7	
	<i>k4</i>	3,8	3,9	3,4	3,5	3,0	
	<i>k5</i>	8,5	8,4	11,5	8,1	8,3	
Promedio $prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$	<i>k1</i>	5,2	5,6	7,6	5,8	4,2	6,8
	<i>k2</i>	1,2	2,2	4,0	1,6	2,4	
	<i>k3</i>	10,8	10,6	13,6	10,4	11,4	
	<i>k4</i>	4,6	4,8	4,8	4,0	4,0	
	<i>k5</i>	10,0	9,8	13,0	9,2	9,6	
Entre el Promedio y el Máximo	<i>k1</i>	6,1	6,3	8,8	6,9	5,1	7,9
	<i>k2</i>	1,6	2,6	7,0	1,8	2,7	
	<i>k3</i>	11,9	11,3	15,8	11,7	11,7	
	<i>k4</i>	5,3	5,4	7,4	4,5	5,0	
	<i>k5</i>	11,5	10,9	14,0	11,1	10,8	
Máximo ($dmax_k^t$)	<i>k1</i>	7	7	10	8	6	9,0
	<i>k2</i>	2	3	10	2	3	
	<i>k3</i>	13	12	18	13	12	
	<i>k4</i>	6	6	10	5	6	
	<i>k5</i>	13	12	15	13	12	

Tabla 5. Valores de la demanda considerados para las corridas iniciales del modelo

Como puede observarse, el hecho de que de 16 relaciones consideradas, con 10 de ellas (62%) no pueda establecerse ninguna relación, ya sea porque estadísticamente no existe o porque las gráficas presentan “saltos” que no se ajustan a ninguna relación, indica que el tercer paso del procedimiento FePIA no puede llevarse a cabo de la manera planeada inicialmente.

¹ Este promedio definido por π se diferencia del definido por $prom_{ESC}\{d_{k,ESC}^t\}$, en que el primero se calcula para todo k, t y es un parámetro importante para toda la investigación, mientras que el segundo se calcula sobre los escenarios (ESC) definidos por Aghezzaf (2005) y sólo es utilizado en esta parte de la investigación

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA				
	Mínima ($\pi = 4,8$)	Entre Mínima y Promedio ($\pi = 5,8$)	Promedio ($\pi = 6,8$)	Entre Promedio y Máxima ($\pi = 7,9$)	Máxima ($\pi = 9,0$)
Γ	100,00%	99,38%	98,94%	96,76%	91,52%
CTOTAL	615,0	792,9	989,2	1244,6	1708,0
CSP	615,0	765,9	935,2	1052,6	1138,0
φ_1	5	10	23	30	35
φ_2 para el periodo 1	1	1	1	1	1
φ_2 para el periodo 2	2	2	2	2	2
φ_2 para el periodo 3	1	2	2	2	2
φ_2 para el periodo 4	1	1	1	1	1
φ_2 para el periodo 5	1	1	1	1	1
φ_3 para el periodo 1	12,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 2	8,3	15,0	11,0	19,8	20,0
φ_3 para el periodo 3	12,5	10,0	14,3	16,7	18,3
φ_3 para el periodo 4	11,0	13,3	15,5	18,0	20,5
φ_3 para el periodo 5	12,0	13,9	15,8	17,7	19,5
φ_4 para el periodo 1	4,6	5,5	6,0	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 2	4,8	4,8	6,6	6,1	6,7
φ_4 para el periodo 3	5,4	6,8	7,2	8,8	9,2
φ_4 para el periodo 4	4,4	5,3	6,2	7,2	8,2
φ_4 para el periodo 5	4,8	5,6	6,3	7,1	7,8

Tabla 6. Resultados de las primeras corridas del modelo

Sin embargo, el principal aporte de este hecho fue el siguiente: las gráficas que muestran saltos bruscos sugieren que la cadena modelada está presentando distintas estructuras dependiendo de la demanda. Como puede notarse en las gráficas en las que esto sucede, ellas están asociadas a los parámetros φ_3 y φ_4 , los cuales se definen a través de los arcos (ver ecuaciones 11 y 12) y estos están asociados al tipo de estructura que tome la cadena. Es así como estos resultados conllevaron a la definición de una nueva característica de desempeño con el objetivo de tener en cuenta esta situación y poder estudiar el sistema de una mejor manera: $\varphi_5 =$ Estructura de la cadena de suministros en cada periodo t .

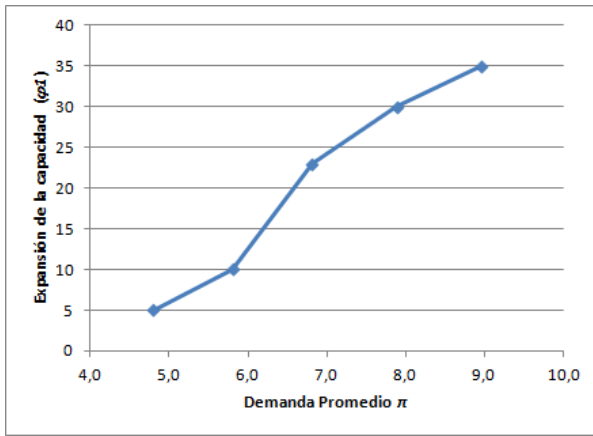


Figura 3. π vs. φ_1

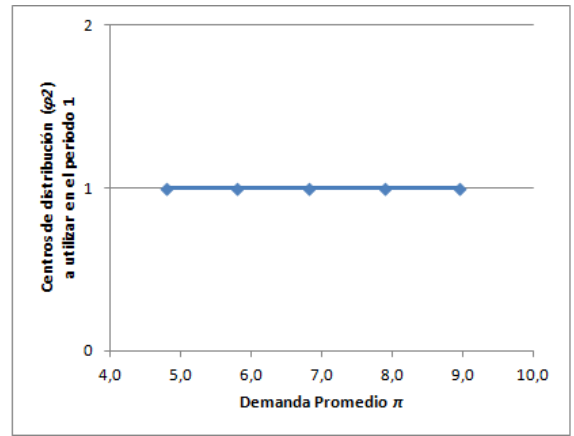


Figura 4. π vs. φ_2 en el periodo 1

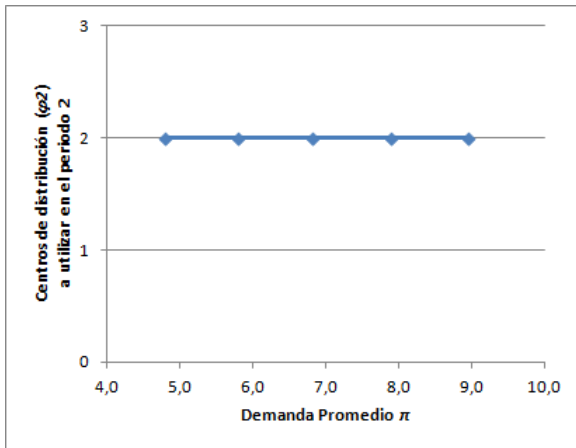


Figura 5. π vs. φ_2 en el periodo 2

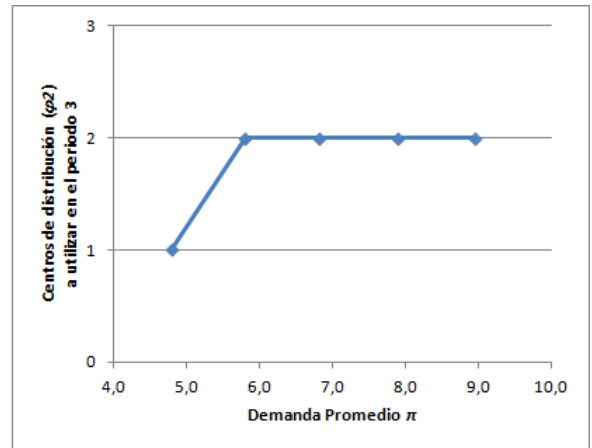


Figura 6. π vs. φ_2 en el periodo 3

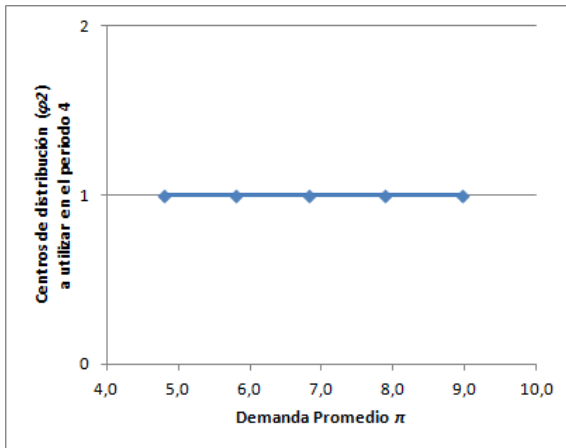


Figura 7. π vs. φ_2 en el periodo 4

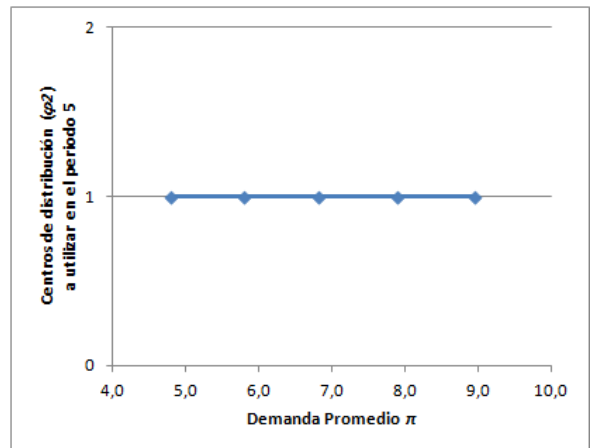


Figura 8. π vs. φ_2 en el periodo 5

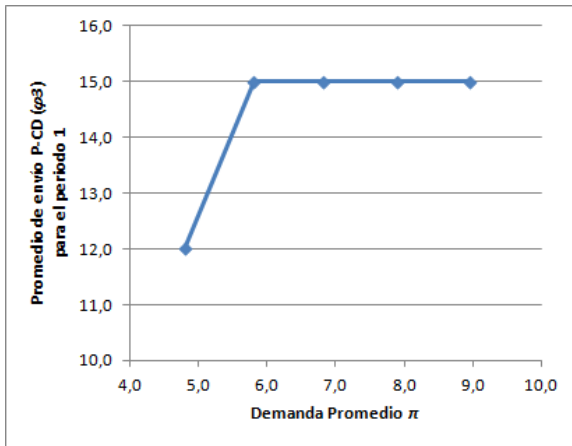


Figura 9. π vs. φ_3 en el periodo 1

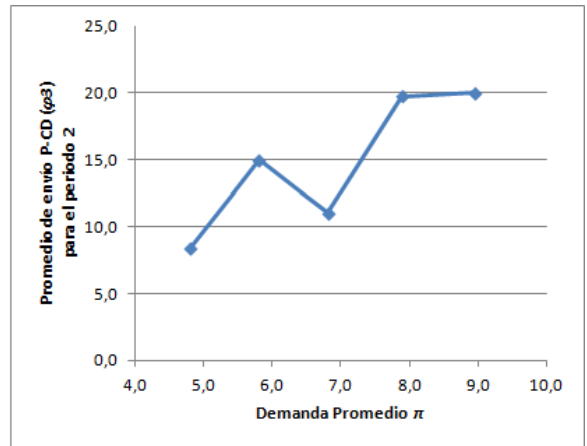


Figura 10. π vs. φ_3 en el periodo 2

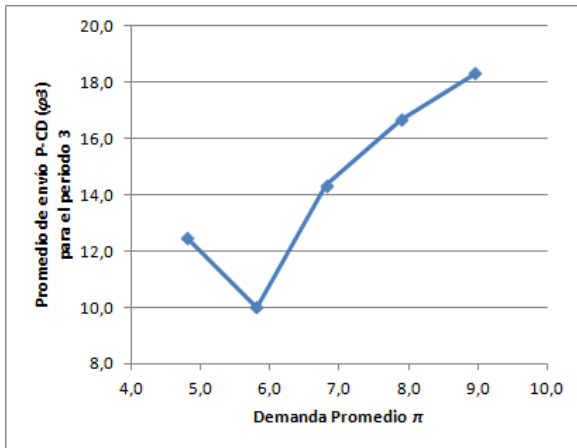


Figura 11. π vs. φ_3 en el periodo 3

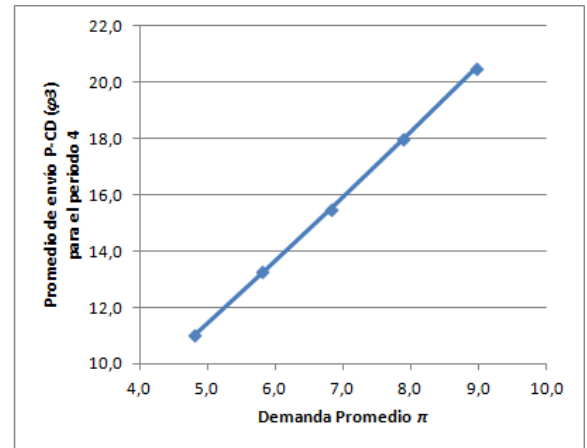


Figura 12. π vs. φ_3 en el periodo 4

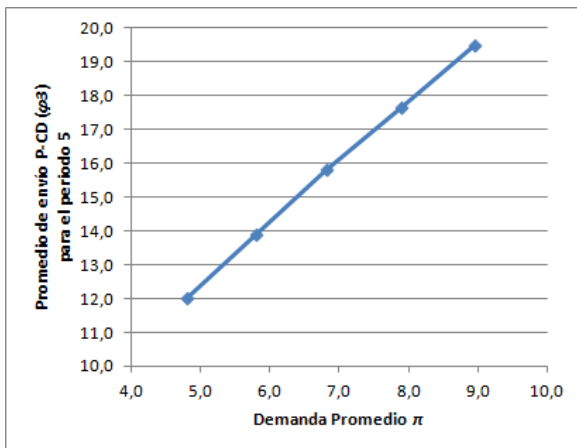


Figura 13. π vs. φ_3 en el periodo 5

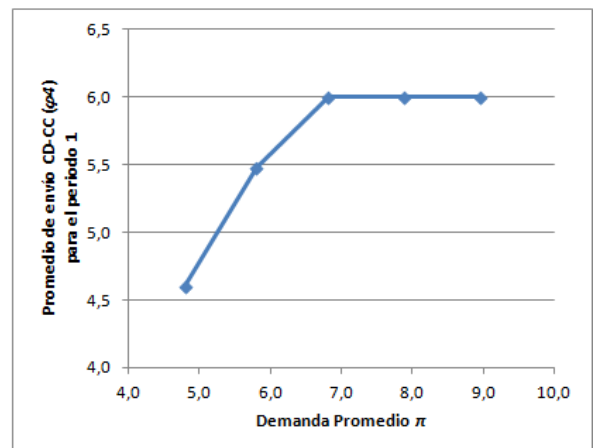


Figura 14. π vs. φ_4 en el periodo 1

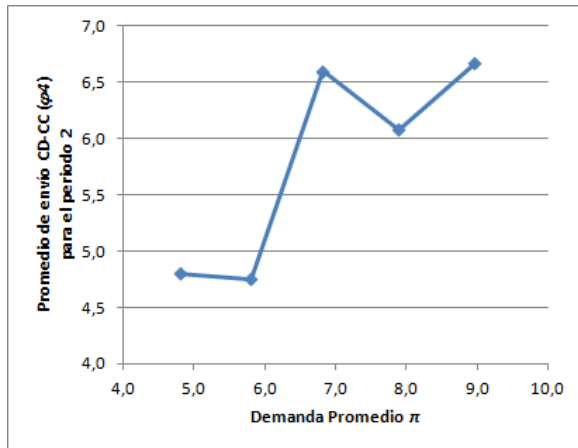


Figura 15. π vs. ϕ_4 en el periodo 2

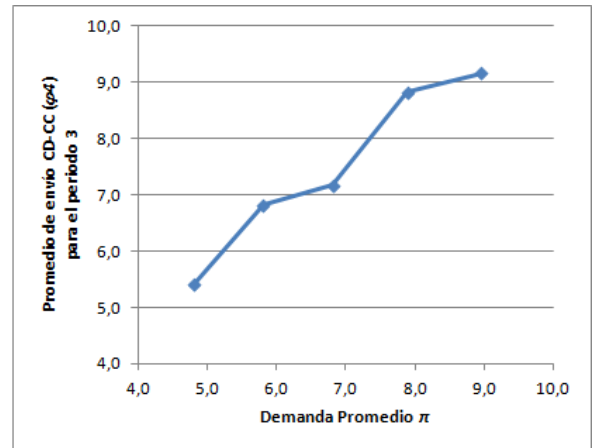


Figura 16. π vs. ϕ_4 en el periodo 3

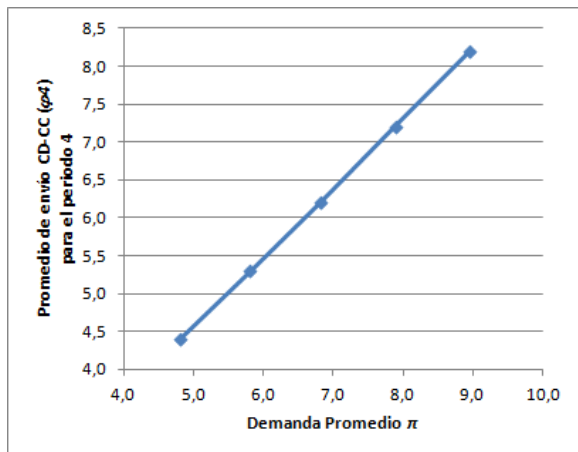


Figura 17. π vs. ϕ_4 en el periodo 4

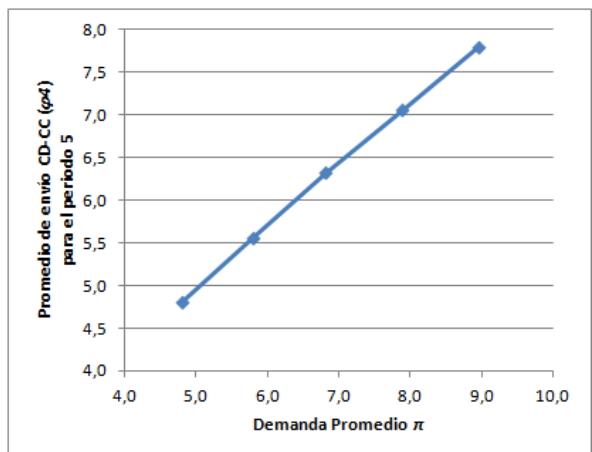


Figura 18. π vs. ϕ_4 en el periodo 5

7.1.1 Nuevas corridas teniendo en cuenta la diferenciación entre estructuras

Una vez se determinó que la estructura también sería una característica de desempeño a tener en cuenta, se corrió nuevamente el modelo con los valores de demanda mostrados en la Tabla 5, pero esta vez registrando las configuraciones o estructuras de la cadena que iban resultando en cada corrida. Esto dio como resultado las estructuras mostradas en la Tabla 7, en donde las flechas indican los arcos escogidos por el modelo para los envíos entre los eslabones de la cadena. Además, en la misma tabla también puede verse que a cada estructura se le ha puesto una etiqueta, la cual permite identificar cada estructura y así poder observar en la Tabla 8 el resultado obtenido para cada conjunto de valores de demanda y para cada periodo. Esta última tabla muestra que la estructura 1 es la más común pues se presenta para cualquier valor de demanda en los periodos 1, 4

y 5. Sin embargo, en los periodos 2 y 3 se presentan cinco estructuras distintas dependiendo el conjunto de valores de demanda considerado.

ESTRUCTURA	ETIQUETA	ESTRUCTURA	ETIQUETA
	[1]		[2]
	[3]		[4]
	[5]		[6]

Tabla 7. Estructuras identificadas en las primeras corridas del modelo

Luego de establecer las estructuras que tomaba la cadena de suministros, se determinó que el paso a seguir era fijar cada una de ellas como restricciones adicionales del modelo matemático utilizado, mediante las ecuaciones 18 y 19 de la sección 6.2.4. Así pues, inicialmente se fijó el conjunto de estructuras obtenidas para cuando la demanda es mínima (es decir, las estructuras 1, 4, 3, 1 y 1 para los periodos 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente), con el plan de hacerlo posteriormente con los conjuntos de estructuras que resultaron para los demás valores de demanda. Cabe anotar que ya en este punto se descartó el registro de la característica de desempeño $\varphi_2 = \text{Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo } t$, debido a que al fijar la estructura es obvio que esta característica siempre obtendrá un valor constante. Los valores obtenidos para las demás características de desempeño al fijar esta estructura se muestran en la Tabla 9.

VALORES DE DEMANDA	PERIODO DE PLANEACIÓN				
	$t1$	$t2$	$t3$	$t4$	$t5$
MÍNIMA	[1]	[4]	[3]	[1]	[1]
ENTRE MÍNIMA Y PROMEDIO	[1]	[2]	[5]	[1]	[1]
PROMEDIO	[1]	[4]	[6]	[1]	[1]
ENTRE PROMEDIO Y MÁXIMA	[1]	[2]	[6]	[1]	[1]
MÁXIMA	[1]	[2]	[6]	[1]	[1]

Tabla 8. Estructuras por valores de demanda y por periodo

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA				
	Mínima ($\pi = 4,8$)	Entre Mínima y Promedio ($\pi = 5,8$)	Promedio ($\pi = 6,8$)	Entre Promedio y Máxima ($\pi = 7,9$)	Máxima ($\pi = 9,0$)
Γ	100,00%	96,56%	91,32%	85,09%	79,91%
$CTOTAL$	615,0	869,3	1255,2	1774,1	2270,0
CSP	615,0	719,3	811,2	892,1	920,0
φ_1	5,0	10,0	13,0	16,5	20,0
φ_3 para el periodo 1	12,0	13,7	15,0	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 2	8,3	9,5	11,0	12,2	13,3
φ_3 para el periodo 3	12,5	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 4	11,0	13,3	15,5	18,0	20,0
φ_3 para el periodo 5	12,0	13,9	15,8	17,7	19,5
φ_4 para el periodo 1	4,6	5,5	6,0	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 2	4,8	5,7	6,6	7,3	8,0
φ_4 para el periodo 3	5,4	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 4	4,4	5,3	6,2	7,2	8,0
φ_4 para el periodo 5	4,8	5,6	6,3	7,1	7,8

Tabla 9. Resultados de las corridas del modelo para cuando se fijan las estructuras 1, 4, 3, 1 y 1 para los periodos 1, 2, 3, 4 y 5

Como era de esperarse al fijar una estructura particular para cada periodo, los resultados del requerimiento de robustez (Γ) se deterioran a medida que π aumenta, en comparación con la situación en la que no se fijan estructuras (ver

Tabla 6 vs. Tabla 9). Por ejemplo, para un valor de π igual a 9,0 el requerimiento de robustez, que es el porcentaje total de demanda satisfecha (Γ), sin estructura fija es de 91,52%, mientras que con una estructura fija es de 79,91%. Estos nuevos resultados obtenidos a partir de fijar el conjunto de estructuras obtenidas para cuando la demanda es mínima (es decir, las estructuras 1, 4, 3, 1 y 1 para los periodos 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente) permitieron obtener nuevas gráficas que relacionan cada característica de desempeño φ_r (excepto φ_2) con el parámetro de perturbación π , mostradas en las Figuras 19 a 29.

Como puede observarse y a diferencia de las gráficas mostradas en las Figuras 3 a 18, ninguna de las mostradas en esta ocasión presenta saltos bruscos, lo que confirma la hipótesis de que tales saltos se deben a cambios en las estructuras y que fijarlas para el análisis fue una acción adecuada para que ellos no se presentaran. No obstante, aunque aún resultan gráficas en las que la correlación es poca (36% de las nuevas gráficas), se decidió continuar con el 4º y último paso del procedimiento FePIA.

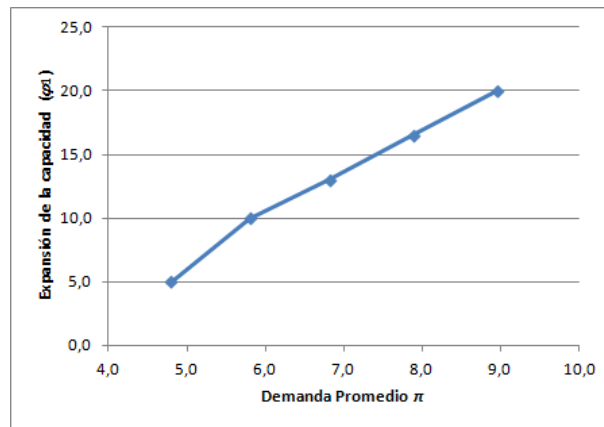


Figura 19. π vs. φ_1

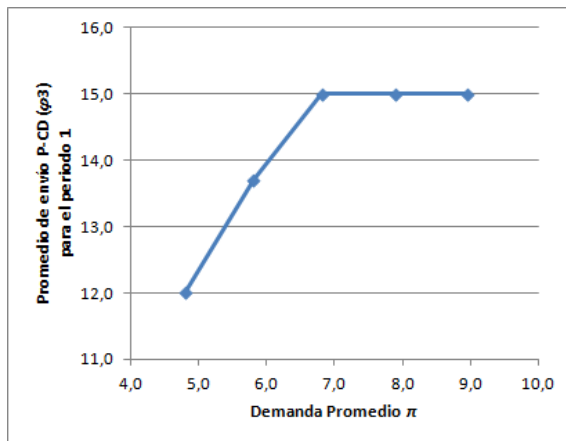


Figura 20. π vs. φ_3 en el periodo 1

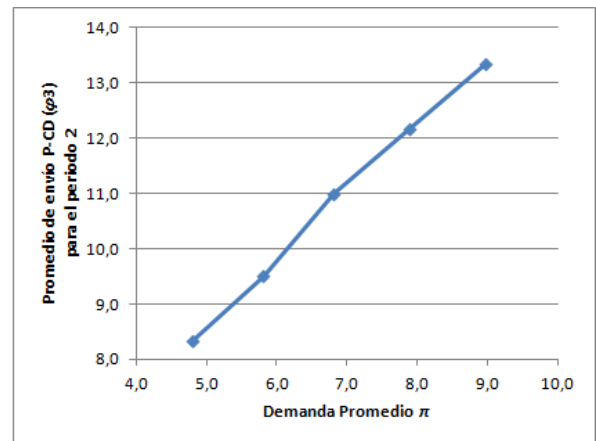


Figura 21. π vs. φ_3 en el periodo 2

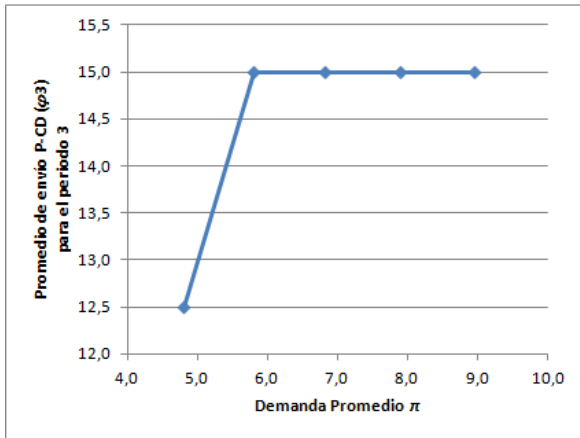


Figura 22. π vs. φ_3 en el periodo 3

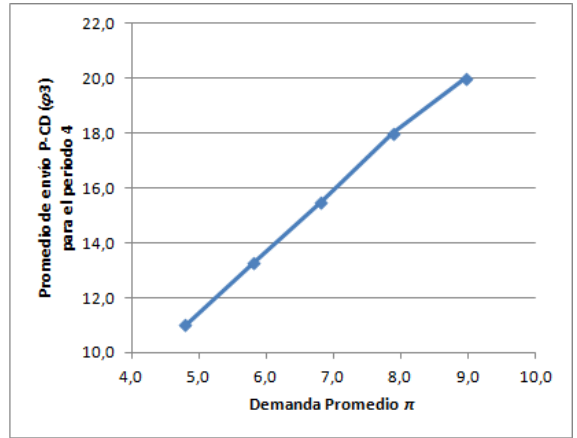


Figura 23. π vs. φ_3 en el periodo 4

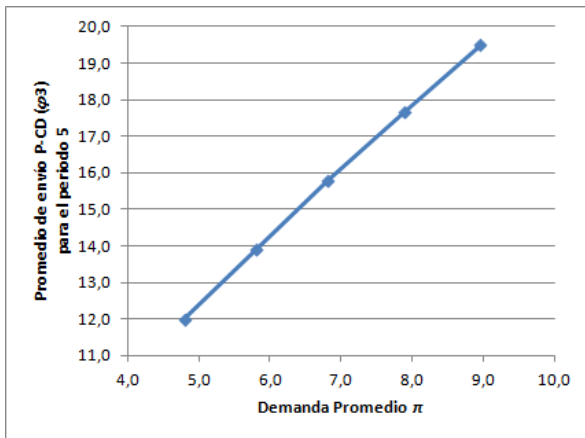


Figura 24. π vs. φ_3 en el periodo 5

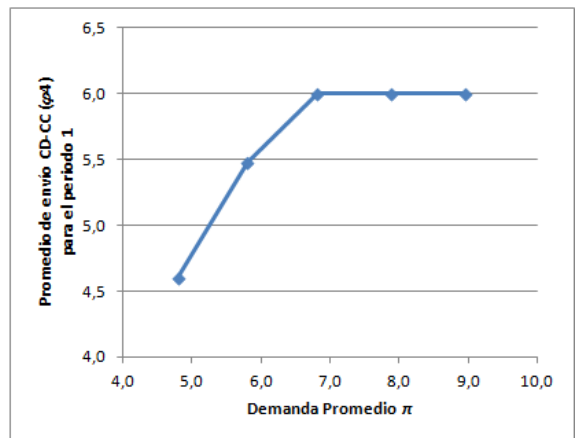


Figura 25. π vs. φ_4 en el periodo 1

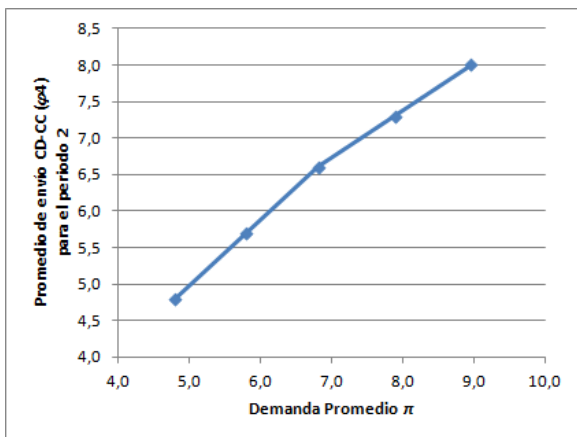


Figura 26. π vs. φ_4 en el periodo 2

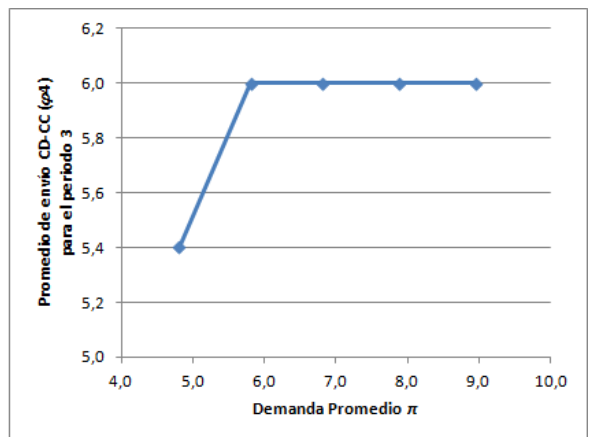


Figura 27. π vs. φ_4 en el periodo 3

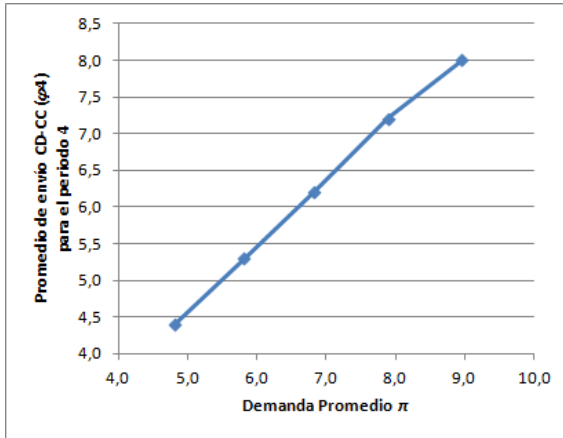


Figura 28. π vs. φ_4 en el periodo 4

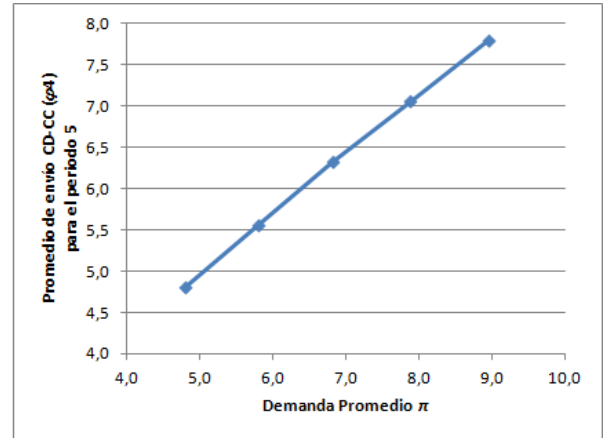


Figura 29. π vs. φ_4 en el periodo 5

7.1.2 Resultados finales de la aplicación del Procedimiento FePIA

El último paso del procedimiento FePIA consiste en determinar para cada φ_r los valores límite de π tal que satisfagan las relaciones $f_r(\pi) = \beta_r^{min}$ y $f_r(\pi) = \beta_r^{max}$. Esto implica determinar de manera previa los valores de β_r^{min} y β_r^{max} , los cuales definen una variación tolerable en φ_r , de tal manera que no se viole el requerimiento de robustez (porcentaje de demanda total satisfecha Γ). La manera en la que se estableció que se determinarían los valores de β_r^{min} y β_r^{max} , fue a través de la inclusión de una restricción adicional en el modelo matemático considerado, en la que Γ ya no fuera una variable de salida sino de entrada y observar qué valores tomaban las características de desempeño φ_r . La restricción adicional agregada fue la mostrada en la ecuación 20, la cual no es más que una modificación de la ecuación 9 en la que Γ ahora es una variable de entrada.

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 y_{jk}^t = \Gamma * \sum_{k=1}^5 \sum_{t=1}^5 d_k^t \quad (20)$$

Ahora bien, ¿qué valores debía tomar Γ para alimentar el modelo? Para responder esta pregunta, se decidió inicialmente tomar como base los valores de tal variable que se muestran en la Tabla 9 e ir reduciéndolos gradualmente en intervalos de a cinco puntos porcentuales. Por ejemplo, si en el resultado inicial para cuando $\pi = 4,8$, Γ arrojó un valor del 100%, ahora este resultado se fijaría en 95%, en una corrida posterior en 90% y así sucesivamente. En total, los valores con los que se planeó hacer las corridas posteriores (20 corridas en total) fueron los mostrados en la Tabla 10.

INTERVALOS CONSIDERADOS	DEMANDA				
	Mínima ($\pi = 4,8$)	Entre Mínima y Promedio ($\pi = 5,8$)	Promedio ($\pi = 6,8$)	Entre Promedio y Máxima ($\pi = 7,9$)	Máxima ($\pi = 9,0$)
VALORES BASE PARA Γ	100,00%	96,56%	91,32%	85,09%	79,91%
INTERVALO 1	95,00%	91,56%	86,32%	80,09%	74,91%
INTERVALO 2	90,00%	86,56%	81,32%	75,09%	69,91%
INTERVALO 3	85,00%	81,56%	76,32%	70,09%	64,91%
INTERVALO 4	80,00%	76,56%	71,32%	65,09%	59,91%

Tabla 10. Valores de entrada considerados para Γ

Se fijó entonces el llamado Intervalo 1 de la Tabla 10, el cual estaba comprendido por 5 corridas del modelo, una por cada valor de π . Los resultados se muestran en la Tabla 11.

VARIABLE DE SALIDA	DEMANDA Y REQUERIMIENTO DE ROBUSTEZ				
	Mínima ($\pi = 4,8$) ($\Gamma = 95,00\%$)	Entre Mínima y Promedio ($\pi = 5,8$) ($\Gamma = 91,56\%$)	Promedio ($\pi = 6,8$) ($\Gamma = 86,32\%$)	Entre Promedio y Máxima ($\pi = 7,9$) ($\Gamma = 80,09\%$)	Máxima ($\pi = 9,0$) ($\Gamma = 74,91\%$)
$CTOTAL$	771,0	1061,8	1431,4	1986,5	2521,3
CSP	591,0	694,2	732,1	808,7	835,3
φ_1	3,0	6,6	9,4	12,6	18,9
φ_3 para el periodo 1	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 2	7,7	8,9	9,8	10,9	10,0
φ_3 para el periodo 3	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 4	11,0	13,3	14,7	16,3	19,5
φ_3 para el periodo 5	11,5	13,3	14,7	16,3	19,5
φ_4 para el periodo 1	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 2	4,6	5,3	5,9	6,5	6,0
φ_4 para el periodo 3	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 4	4,4	5,3	5,9	6,5	7,8
φ_4 para el periodo 5	4,6	5,3	5,9	6,5	7,8

Tabla 11. Resultados de las corridas del modelo con estructuras fijas y Γ como variable de entrada

Estos resultados comparados con los obtenidos previamente fueron los que dieron pie para concluir preliminarmente que el procedimiento FePIA era de difícil aplicación en el contexto de una cadena de suministros mediante programación lineal. A continuación se explicarán las razones de esta muy importante afirmación.

En la Tabla 12 se observa una comparación de los resultados de φ_r de la Tabla 9 vs. los de la Tabla 11. Como puede observarse, para cada φ_r y para cada valor fijo de π (es decir, analizando cada valor de π separado), el valor de φ_r se reduce (o se mantiene igual) cuando el valor de Γ se reduce, es decir, hay una relación directamente proporcional (o no hay correlación), pero nunca una relación inversa. A manera de ejemplo aclaratorio de esta afirmación, observe la Figura 30. En ella se grafica Γ vs. cada φ_r para cuando $\pi = 7,9$. Note que las líneas allí dibujadas son crecientes u horizontales, pero nunca decrecientes.

φ_r	TIPO DE VARIABLE CONSIDERADO PARA Γ	DEMANDA				
		Mínima ($\pi = 4,8$)	Entre Mínima y Promedio ($\pi = 5,8$)	Promedio ($\pi = 6,8$)	Entre Promedio y Máxima ($\pi = 7,9$)	Máxima ($\pi = 9,0$)
φ_1	De salida ²	5,0	10,0	13,0	16,5	20,0
	De entrada ³	3,0	6,6	9,4	12,6	18,9
φ_3 para el periodo 1	De salida	12,0	13,7	15,0	15,0	15,0
	De entrada	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 2	De salida	8,3	9,5	11,0	12,2	13,3
	De entrada	7,7	8,9	9,8	10,9	10,0
φ_3 para el periodo 3	De salida	12,5	15,0	15,0	15,0	15,0
	De entrada	11,5	13,3	14,7	15,0	15,0
φ_3 para el periodo 4	De salida	11,0	13,3	15,5	18,0	20,0
	De entrada	11,0	13,3	14,7	16,3	19,5
φ_3 para el periodo 5	De salida	12,0	13,9	15,8	17,7	19,5
	De entrada	11,5	13,3	14,7	16,3	19,5
φ_4 para el periodo 1	De salida	4,6	5,5	6,0	6,0	6,0
	De entrada	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 2	De salida	4,8	5,7	6,6	7,3	8,0
	De entrada	4,6	5,3	5,9	6,5	6,0
φ_4 para el periodo 3	De salida	5,4	6,0	6,0	6,0	6,0
	De entrada	4,6	5,3	5,9	6,0	6,0
φ_4 para el periodo 4	De salida	4,4	5,3	6,2	7,2	8,0
	De entrada	4,4	5,3	5,9	6,5	7,8
φ_4 para el periodo 5	De salida	4,8	5,6	6,3	7,1	7,8
	De entrada	4,6	5,3	5,9	6,5	7,8

Tabla 12. Comparación de los valores de φ_r al variar Γ

² Γ como variable de salida corresponde a los resultados de la Tabla 8, en los que en las corridas llevadas a cabo se fija la estructura y se deja Γ libre

³ Γ como variable de entrada corresponde a los resultados de la Tabla 10, en los que en las corridas llevadas a cabo se fija la estructura y también se fijan los valores de Γ . Para este caso y para cada valor de π , los valores de Γ son menores que cuando es una variable de salida

Sin embargo, dé nuevamente un vistazo a la Tabla 9 o a la Tabla 11, compare en ella los valores de Γ contra los de cada φ_r y note que a medida que Γ se reduce, los valores de cualquier φ_r aumentan (o se mantienen igual) pero nunca se reducen, es decir, hay una relación inversa (o no hay correlación), pero nunca una relación directamente proporcional. A manera de ejemplo aclaratorio observe la Figura 31, en la que se grafica Γ vs. φ_1 con una evidente curva decreciente. Esta afirmación es claramente contraria a la expresada en el párrafo anterior, es decir, es matemáticamente incoherente. ¿Cómo se explica esta incoherencia?

La explicación dada por el autor es la siguiente: en el caso representado en la Figura 30, en el cual se realiza el análisis para cada valor de demanda por separado (es decir, para cada π fijo), es claro que si la demanda se fija y se fuerza al modelo a cumplir con un valor específico del porcentaje de demanda satisfecha (Γ) menor que el de la Tabla 9 (por ejemplo, pasar de 100% a 95%), entonces el sistema necesitará aumentar en menor cantidad la capacidad de las plantas de producción (φ_1) y también enviar menor cantidad de producto (φ_3 y φ_4). Sin embargo, si se considera el caso representado en la Figura 31 en el cual la demanda se deja que varíe, es claro que si esta es aumentada el sistema estará en menor capacidad de cubrirla sin incurrir en mayores costos y el porcentaje de demanda satisfecha (Γ) disminuirá, mientras al mismo tiempo intentará cubrirla lo más posible aumentando la capacidad de las plantas de producción (φ_1) y enviando más cantidad de producto (φ_3 y φ_4). La relación inversa que se muestra entonces en la Figura 31 a manera de ejemplo (pero válida también para las otras características de desempeño φ_r) se da como consecuencia del cambio en la demanda y no porque haya una relación directa entre Γ y φ_1 , pues de existir esta relación esta sería directamente proporcional, como se muestra en la Figura 30.

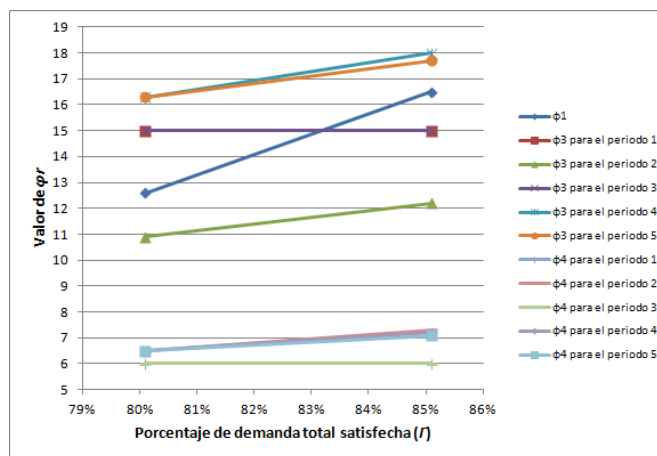


Figura 30. Γ vs. cada φ_r para cuando $\pi = 7,9$

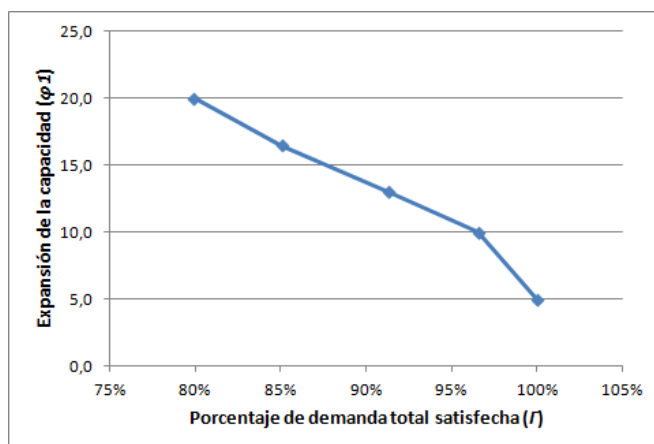


Figura 31. Γ vs. φ_1 para todos los valores de π considerados y según la Tabla 9

A continuación se resumen entonces los motivos por los cuales no es posible aplicar literalmente el procedimiento FePIA, los cuales de alguna manera ya han sido expuestos anteriormente pero es prudente hacer una recopilación de ellos para una mayor claridad:

1. La inclusión de la “Estructura de la cadena de suministros en cada periodo t ” como característica de desempeño implica pasar de un procedimiento FePIA netamente cuantitativo (tal como es propuesto por Ali *et al.*, 2004) a uno híbrido (cuantitativo y cualitativo), pues la característica “Estructura...” es cualitativa.
2. La casi nula relación de algunas características de desempeño (φ_r) con el parámetro de perturbación (π) dificultan establecer una clara función f_r tal que $\varphi_r = f_r(\pi)$, tal como debe hacerse según el procedimiento FePIA.
3. Para las características de desempeño (φ_r) que sí pueda establecerse tal función, es posible que algunos valores no puedan ser evaluados en ella. Por ejemplo, observe en la Figura 31 que la gráfica sólo está definida para valores de φ_1 comprendidos entre 5,0 y 20,0. Ahora observe los valores que toma φ_1 en la Tabla 11 y note que en el cruce con la demanda mínima ($\pi = 4,8$), φ_1 tiene un valor de 3,0. Obviamente, tal valor no podría ser evaluado en una función que está definida para valores entre 5,0 y 20,0.
4. Fijar el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) produce resultados matemáticamente incoherentes, tal como se explicó anteriormente.

Es por estas razones que se decidió proponer una metodología aún basada en el procedimiento FePIA pero novedosa en algunos aspectos, tal como se explicó en la

sección 6.2 del presente trabajo. Los resultados de la aplicación de tal metodología se muestran a continuación.

7.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Los resultados obtenidos con la aplicación literal del procedimiento FePIA (sección 7.1) sirvieron como base para estructurar la metodología definitiva que se propone en la presente investigación y que fue descrita en la sección 6.2. Por tal motivo, algunos de los resultados de tal metodología coinciden con los mostrados en la sección 7.1, pero aún así se resumen a continuación en su totalidad para conservar la unidad que permite una mayor comprensión del trabajo realizado.

7.2.1 ETAPA 1: Descripción preliminar de la cadena de suministros según el procedimiento FePIA. El principal aporte de esta etapa fue brindar un marco conceptual debidamente referenciado bibliográficamente con el cual se pudiera llevar a cabo un trabajo coherente y en el que el lenguaje utilizado fuera siempre el mismo. En la sección 6.2.1 se ofrecen los detalles al respecto y a continuación se muestra nuevamente la Tabla 2 en la que se resumen los resultados de la presente etapa.

REQUERIMIENTO DE ROBUSTEZ Γ	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO $\varphi_r \in \Phi$	PARÁMETRO DE PERTURBACIÓN π
Porcentaje de demanda total satisfecha	$\varphi_1 =$ Nivel total de expansión de la capacidad	Demanda promedio
	$\varphi_2 =$ Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo t	
	$\varphi_3 =$ Cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t	
	$\varphi_4 =$ Cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t	
	$\varphi_5 =$ Estructura de la cadena de suministros en cada periodo t	

Tabla 2. Aspectos definidos en la Etapa 1

7.2.2 ETAPA 2. Construcción del modelo experimental. Naturalmente, el principal aporte de esta etapa fue la construcción del modelo matemático de programación lineal que sirve como herramienta para el diseño de una cadena de

suministros y que fue explicado en detalle en la sección 6.2.2. Además de esto, se expresó de forma matemática los conceptos definidos en la etapa 1 para poder llevar a cabo un análisis adecuado del sistema considerado.

Cabe anotar entonces que, debido a que lo desarrollado en esta etapa fueron sólo las herramientas matemáticas necesarias para el desarrollo de las etapas posteriores, los resultados del uso del modelo como tal estarán sujetos precisamente a los pasos llevados a cabo en tales etapas y por tal motivo no se ahondará más al respecto en la presente sección.

7.2.3 ETAPA 3. Identificación del impacto del parámetro de perturbación π sobre el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r . En esta etapa se varió de manera controlada los valores de la demanda promedio (π) para identificar la manera en la que se comportaban el requerimiento de robustez Γ y las características de desempeño φ_r . Sin embargo, a diferencia de lo llevado a cabo en la aplicación literal del procedimiento FePIA, esta vez no se consideraron sólo 5 valores para la demanda promedio⁴, sino 21 en total según lo definido por la ecuación 17 y el parámetro δ asociado a tal ecuación. Este cambio de enfoque se dio por las siguientes razones:

1. Al considerar más valores para el parámetro de perturbación π se puede obtener una mayor cantidad de estructuras a las cuales se les pueda evaluar la relación robustez-costo y de esta manera llevar a cabo un análisis más sólido en la presente investigación.
2. Al considerar más valores para el parámetro π se obtienen resultados más confiables debido a que se pasa de evaluar 5 valores de demanda a 21, es decir, se cierran un poco las brechas entre cada valor de π .
3. Se le quiso dar un carácter más riguroso a la forma en la que se definen los valores de entrada de d_k^t (ecuación 17 de la sección 6.2.3) y por tanto del parámetro π .

Así pues, se procedió entonces a alimentar el modelo matemático con los 21 valores considerados para δ , es decir, inicialmente se llevaron a cabo 21 corridas del modelo. Los resultados de tales corridas se muestran en la Tabla 13. En ella pueden observarse los valores equivalentes entre δ y π , los cuales se mantendrán constantes durante el resto de la investigación. Además, se observa que con

⁴ Recuerde que se tenían las siguientes clasificaciones para la demanda: 1) Mínima, 2) Entre Mínima y Promedio, 3) Promedio, 4) Entre Promedio y Máxima, y 5) Máxima; cada una con su correspondiente valor de π

excepción de las variables Γ y φ_2 , los valores que toman todas las variables aumentan a medida que δ aumenta. Con Γ no ocurre tal cosa, sino que por el contrario disminuye a medida que δ aumenta. Esto se lee como que a medida que la demanda del sistema aumenta, éste es menos capaz de satisfacerla por completo y por lo tanto el porcentaje de demanda total satisfecha disminuye. En cuanto a la característica de desempeño $\varphi_2 = \text{Número de centros de distribución que se deben utilizar en cada periodo } t$, esta se mantiene constante casi para cualquier valor de δ en cada periodo. Como de ahora en adelante las estructuras serán fijadas para el análisis, la característica de desempeño φ_2 no será más tenida en cuenta en el resto de la investigación.

Ahora bien, por cada valor de δ que fue utilizado para alimentar el modelo, fueron identificadas un conjunto de estructuras que tomaba la cadena según el criterio de minimización del costo total. Tales estructuras se muestran en la Tabla 14, en donde las flechas indican los arcos escogidos por el modelo para los envíos entre los eslabones de la cadena. Además, en la misma tabla también puede verse que a cada estructura se le ha puesto una etiqueta, la cual permite identificar cada estructura y así poder observar en la Tabla 15 el resultado obtenido para cada valor de δ y de π y para cada periodo.

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 15, es notorio que la estructura que más se presenta es la [1], la cual siempre se manifiesta en los periodos 1, 4 y 5, independientemente del valor de la demanda. Para los periodos 2 y 3 no se da esa constancia, sino que la estructura tomada sí depende del valor de la demanda.

Así pues, se quiso conservar la estructura que se presentaba en cada periodo, de tal manera que para alimentar el modelo en la próxima etapa fijando las estructuras, no se hizo con cada una de ellas por separado, sino a través de conjuntos de las mismas en donde cada conjunto está conformado por 5 estructuras, una por cada periodo (es decir, un conjunto por cada fila de la Tabla 15). Sin embargo, como algunos conjuntos se repiten, no habrá 21 de ellos sino un total de 11. Tales conjuntos se muestran en la Tabla 16.

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	99,08	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	97,92	97,50	97,10	96,72	96,36	95,92	94,38	92,92	91,52
CTOTAL	615,0	658,0	705,8	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1039,6	1129,6	1169,7	1209,7	1249,8	1339,8	1385,1	1492,7	1600,4	1708,0
CSP	615,0	658,0	669,8	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	1015,6	1028,7	1041,7	1054,8	1117,8	1130,1	1132,7	1135,4	1138,0
φ_1	5,0	8,8	10,0	10,0	10,0	10,0	17,8	19,6	15,0	23,2	25,0	25,0	28,6	30,0	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
φ_2 en el per. 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_2 en el per. 2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
φ_2 en el per. 3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
φ_2 en el per. 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_2 en el per. 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	12,4	12,5	9,6	10,0	15,0	9,6	9,9	11,7	10,4	10,7	17,3	11,2	11,6	12,5	20,0	18,8	20,0	20,0	20,0	20,0
φ_3 en el per. 3	12,5	14,4	15,0	10,0	10,0	10,0	12,6	13,2	11,7	14,4	15,0	15,0	16,2	16,7	16,7	16,7	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,5	12,9	13,4	13,9	14,4	14,8	15,3	15,8	16,3	16,7	17,2	17,7	18,2	18,6	19,1	19,6	20,1	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7	15,0	15,4	15,8	16,2	16,5	16,9	17,3	17,7	18,0	18,4	18,8	19,2	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,0	5,3	5,4	4,7	5,8	5,9	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7	6,9	7,0	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,0	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,4	9,3	9,2
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla 13. Resultados de las primeras corridas con la metodología propuesta

ESTRUCTURA		ETIQUETA	ESTRUCTURA		ETIQUETA
		[1]			[2]
		[3]			[4]
		[5]			[6]
		[7]			[8]
		[9]			[10]

Tabla 14. Estructuras que toma la cadena para distintos valores de δ

PARÁMETRO δ	DEMANDA PROMEDIO π	PERIODO DE PLANEACIÓN				
		$t1$	$t2$	$t3$	$t4$	$t5$
0	4,8	[1]	[6]	[2]	[1]	[1]
1	5,0	[1]	[3]	[2]	[1]	[1]
2	5,2	[1]	[3]	[3]	[1]	[1]
3	5,4	[1]	[7]	[9]	[1]	[1]
4	5,6	[1]	[7]	[9]	[1]	[1]
5	5,8	[1]	[4]	[9]	[1]	[1]
6	6,0	[1]	[6]	[9]	[1]	[1]
7	6,3	[1]	[6]	[9]	[1]	[1]
8	6,5	[1]	[8]	[9]	[1]	[1]
9	6,7	[1]	[8]	[10]	[1]	[1]
10	6,9	[1]	[8]	[10]	[1]	[1]
11	7,1	[1]	[5]	[10]	[1]	[1]
12	7,3	[1]	[6]	[10]	[1]	[1]
13	7,5	[1]	[6]	[10]	[1]	[1]
14	7,7	[1]	[6]	[10]	[1]	[1]
15	7,9	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]
16	8,1	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]
17	8,3	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]
18	8,5	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]
19	8,8	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]
20	9,0	[1]	[4]	[10]	[1]	[1]

Tabla 15. Estructuras por valores de demanda y por periodo

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ ASOCIADO	ESTRUCTURAS QUE CONFORMAN EL CONJUNTO
A	0	[1] - [6] - [2] - [1] - [1]
B	1	[1] - [3] - [2] - [1] - [1]
C	2	[1] - [3] - [3] - [1] - [1]
D	3 - 4	[1] - [7] - [9] - [1] - [1]
E	5	[1] - [4] - [9] - [1] - [1]
F	6 - 7	[1] - [6] - [9] - [1] - [1]
G	8	[1] - [8] - [9] - [1] - [1]
H	9 - 10	[1] - [8] - [10] - [1] - [1]
I	11	[1] - [5] - [10] - [1] - [1]
J	12 - 14	[1] - [6] - [10] - [1] - [1]
K	15 - 20	[1] - [4] - [10] - [1] - [1]

Tabla 16. Conjuntos de estructuras

7.2.4 ETAPA 4. Determinación del comportamiento de cada conjunto de estructuras identificado. En esta etapa cada uno de los conjuntos de estructuras mostrados en la Tabla 16 fue analizado por separado, fijándolos a través de la adición de 2 restricciones en el modelo matemático, las cuales se muestran en las ecuaciones 18 y 19 de la sección 6.2.4. Los resultados de fijar tales conjuntos de restricciones se exponen en tablas similares a la Tabla 13 que por su extensión no son mostradas en el cuerpo del trabajo, sino que pueden ser observadas en el Anexo A. En éste, desde la Tabla A1 hasta la Tabla A11 los resultados están discriminados por conjuntos de estructuras, mientras que desde la Tabla A12 hasta la Tabla A25 están discriminados por variable de salida. Un análisis detallado de estos resultados se muestra en el Capítulo 8, Análisis de resultados.

7.2.5 ETAPA 5. Evaluación de la relación robustez-costo. A partir de los datos mostrados en las tablas del Anexo A se construyeron una serie de gráficas con el objetivo de evaluar la relación robustez-costo, es decir, determinar cuáles estructuras son más robustas y a qué costo se genera esa robustez. Es así como inicialmente se graficó la demanda promedio (π) contra el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) para cada una de las estructuras identificadas. Esta gráfica puede observarse en la Figura 32, en donde algunas estructuras se han unido en una misma línea debido a que sus valores para Γ son iguales o casi iguales, como

puede verificarse en la Tabla A14. Un análisis detallado de estos resultados se muestra en el Capítulo 8, Análisis de resultados.

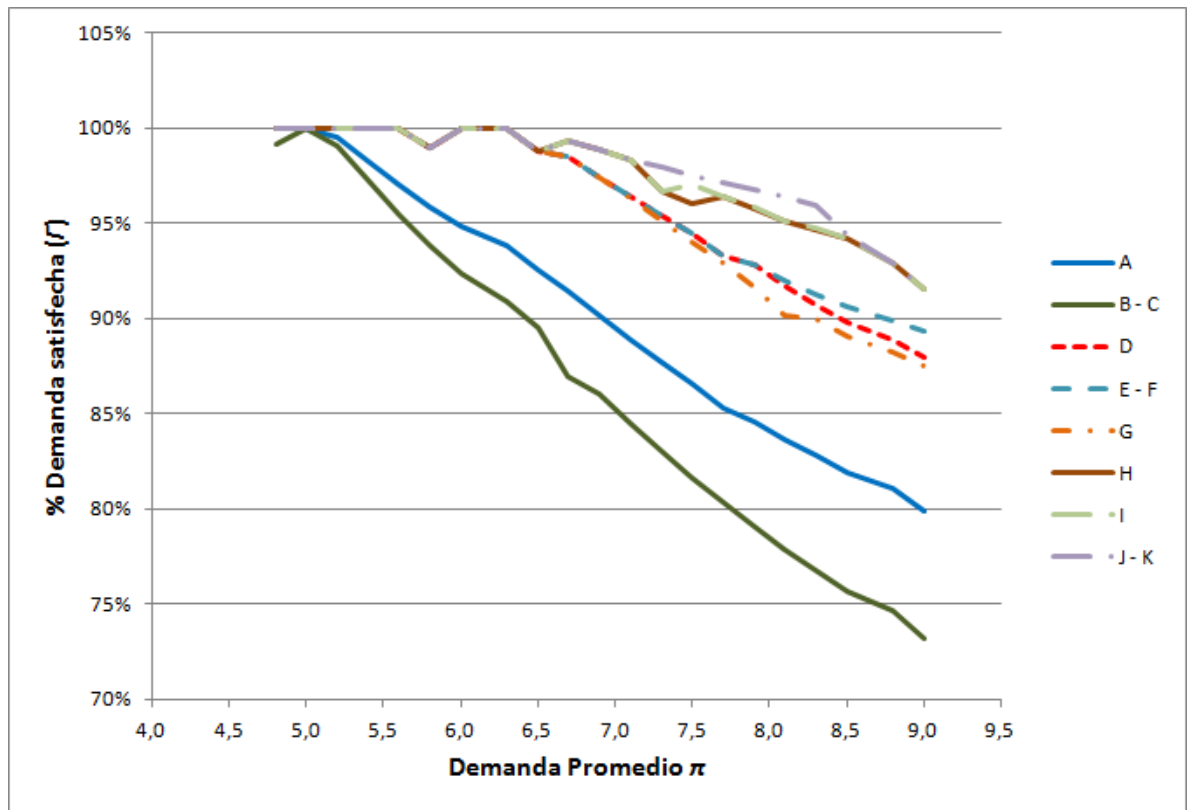


Figura 32. π vs. Γ para cada estructura identificada

Otra gráfica considerada como relevante es la mostrada en la Figura 33, en la que se muestra para cada estructura la relación entre la demanda promedio (π) y el costo sin penalización (CSP). Así como en la gráfica anterior, se unieron varias estructuras en una misma línea debido a que sus valores para CSP son iguales o casi iguales, como puede verificarse en la Tabla A13.

Por último, la tercera gráfica relevante para el análisis posterior es la mostrada en la Figura 34, en la que se observa la relación entre Γ y CSP para cinco valores escogidos de la demanda promedio (π), incluyendo el mínimo, el máximo y tres valores intermedios. Se decidió esta vez no discriminar por estructura sino por demanda promedio, pues se desea evaluar cuánto cuesta el cambio de estructura y qué tanto aporta tal cambio a la robustez, en términos del porcentaje de demanda total satisfecha. Tal evaluación se muestra en el Capítulo 8, Análisis de resultados.

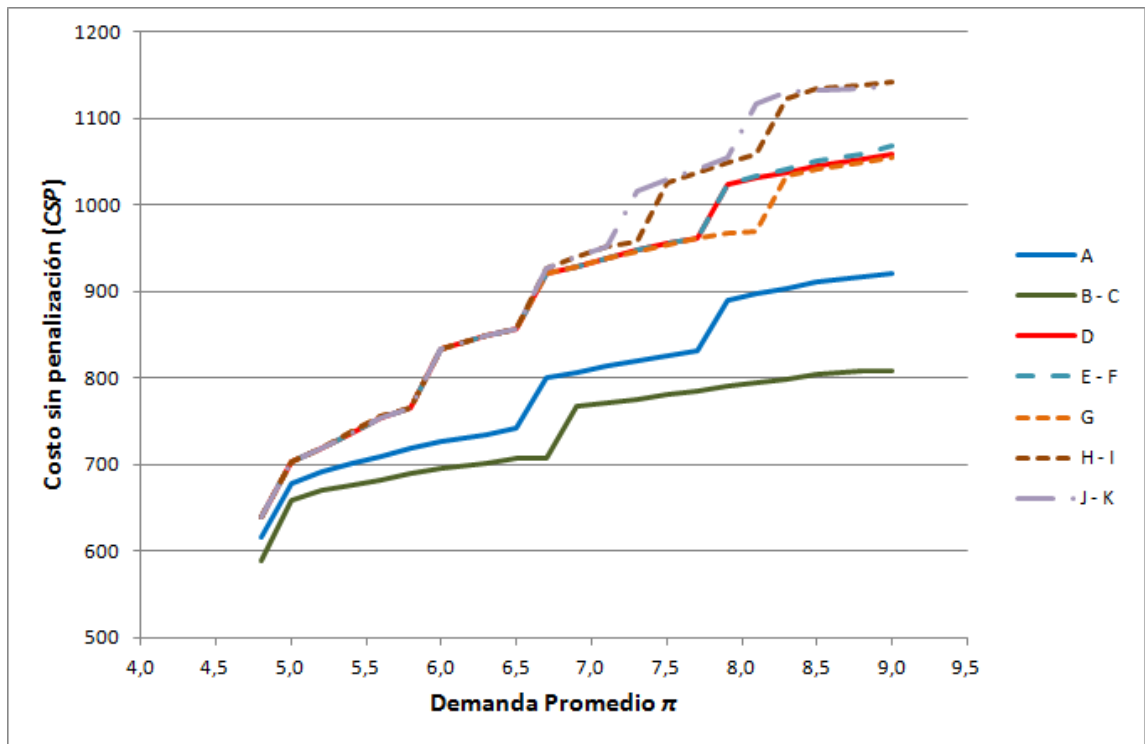


Figura 33. π vs. CSP para cada estructura identificada

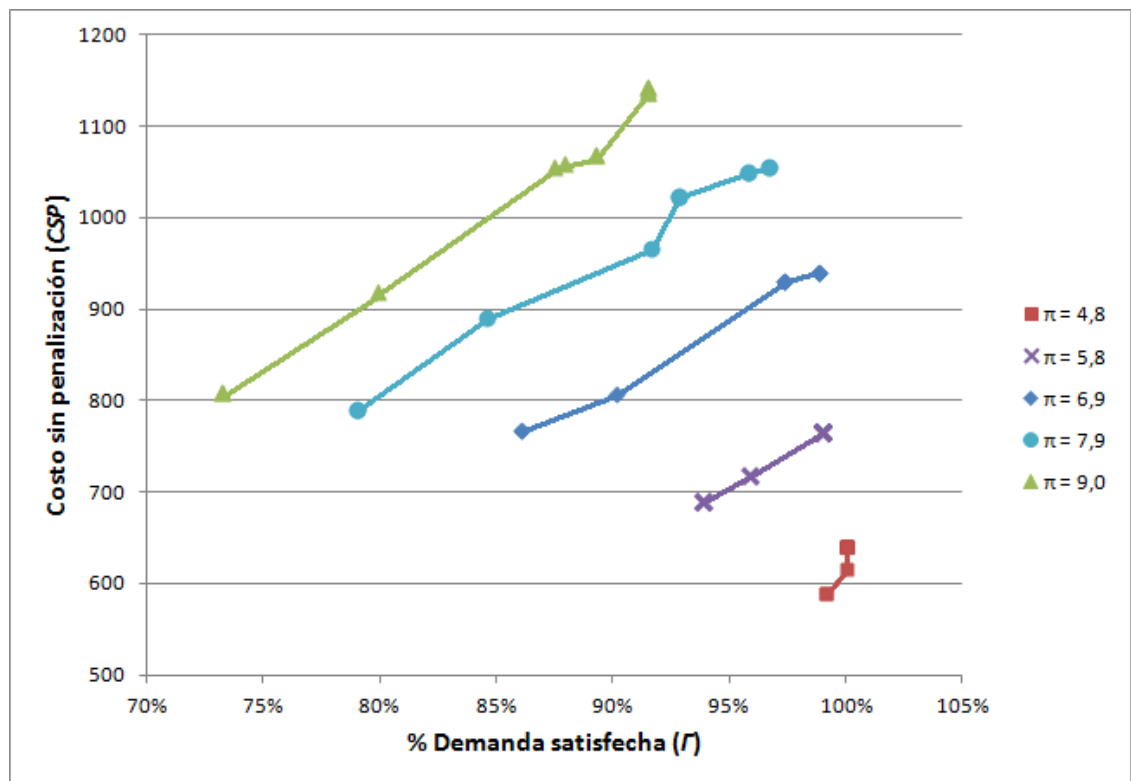


Figura 34. Γ vs. CSP para algunos valores de la demanda promedio (π)

Finalmente, y aunque ya se hayan mostrado las gráficas más relevantes para el análisis posterior (Figuras 32, 33 y 34), se mostrarán algunas adicionales con el objetivo de identificar cuál es el impacto del parámetro de perturbación (π) sobre las características de desempeño (φ_r). Inicialmente para cada estructura identificada se grafica la demanda promedio vs. el nivel de expansión de la capacidad (π vs. φ_1) en la Figura 35, en donde se muestra un conjunto de tres gráficas para facilidad de lectura, conservando la misma escala para las tres.

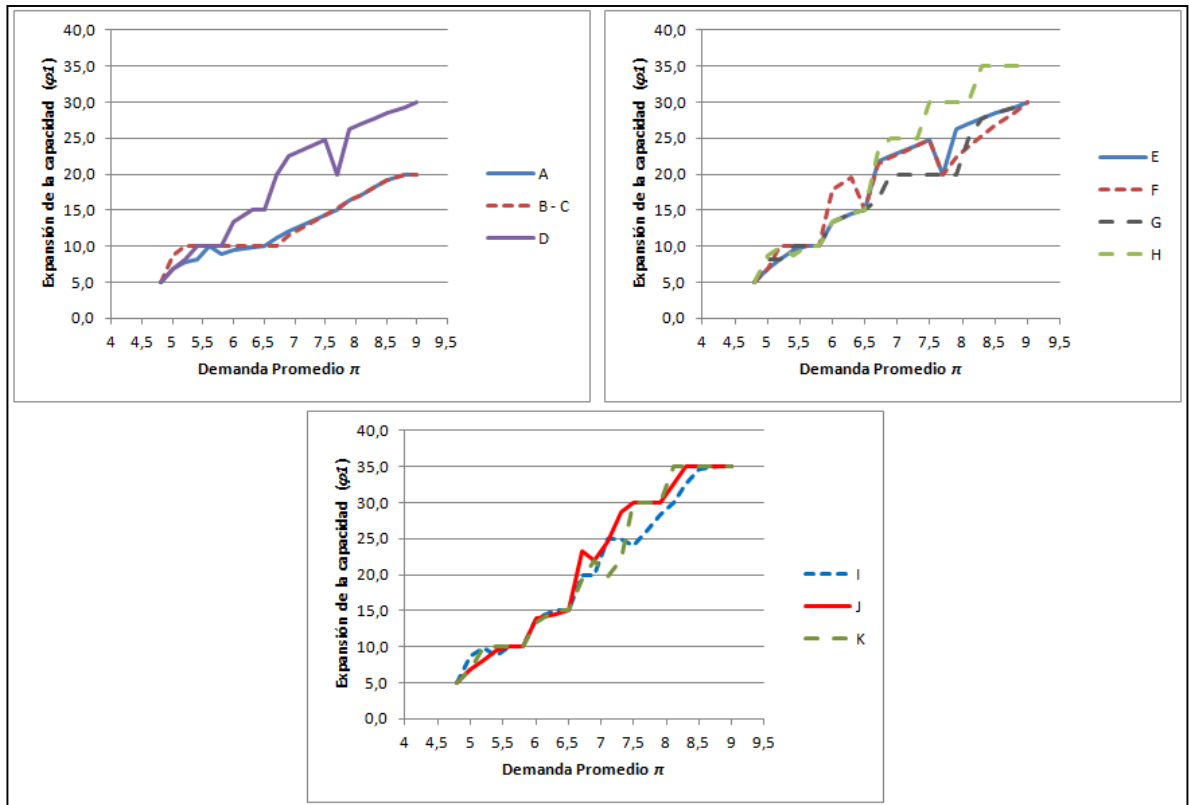


Figura 35. π vs. φ_1 para cada estructura identificada

Por otro lado, en las Figuras 36, 38, 40, 42 y 44 se grafica la demanda promedio vs. la cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución (π vs. φ_3) y en las Figuras 37, 39, 41, 43 y 45 se grafica la demanda promedio vs. la cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo (π vs. φ_4), correspondiéndole una figura a cada periodo. En particular, en las Figuras 36, 38, 39, 40 y 41 algunas estructuras fueron fusionadas en una sola curva pues sus puntos coinciden; y en las Figuras 37, 42, 43, 44 y 45 todas las estructuras coinciden en todos sus puntos y por tal motivo en estas figuras sólo se dibuja una única curva. Un análisis detallado de estos resultados se muestra en el Capítulo 8, Análisis de resultados.

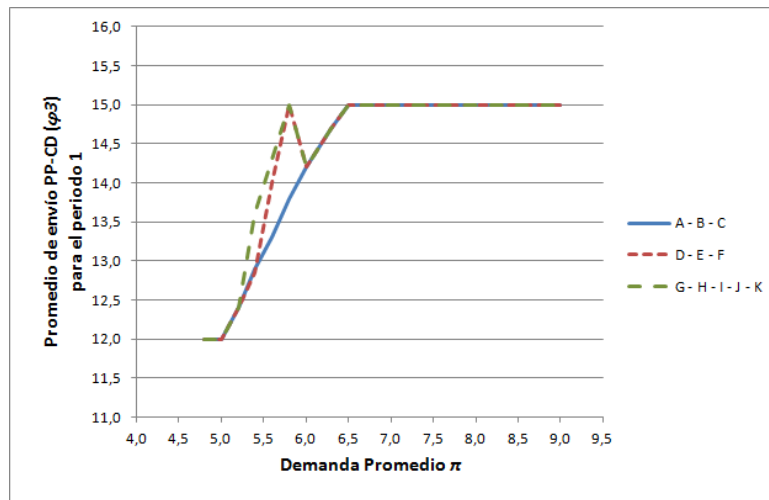


Figura 36. π vs. φ_3 en el periodo 1

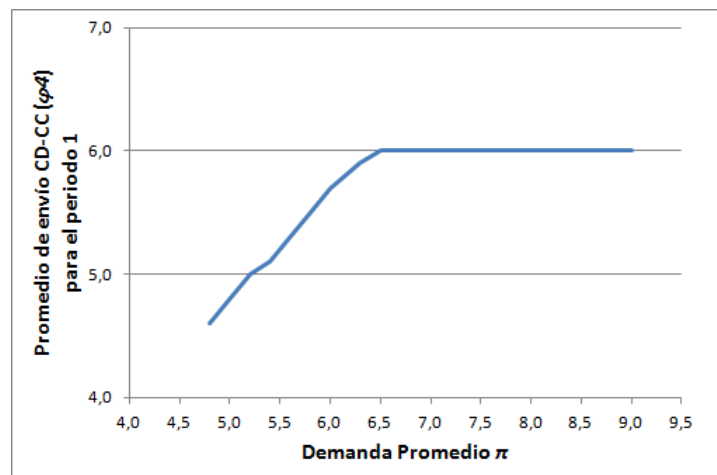


Figura 37. π vs. φ_4 en el periodo 1

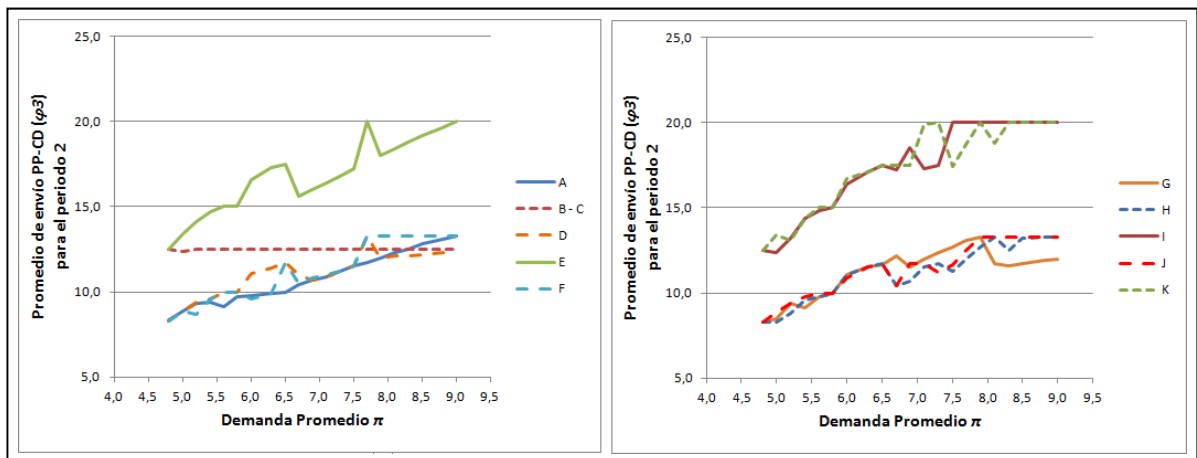


Figura 38. π vs. φ_3 en el periodo 2

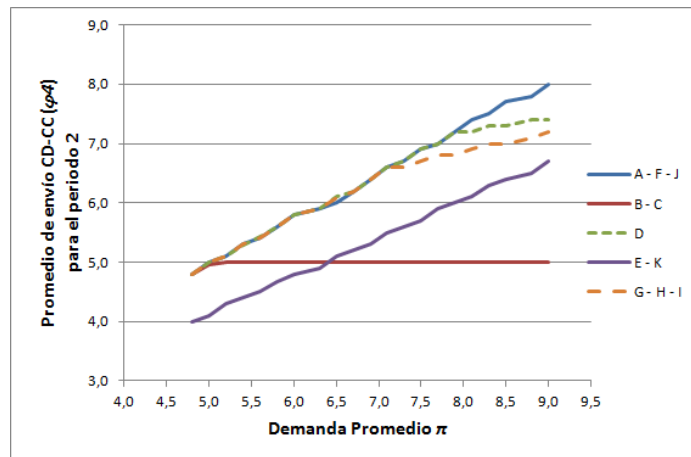


Figura 39. π vs. φ_4 en el periodo 2

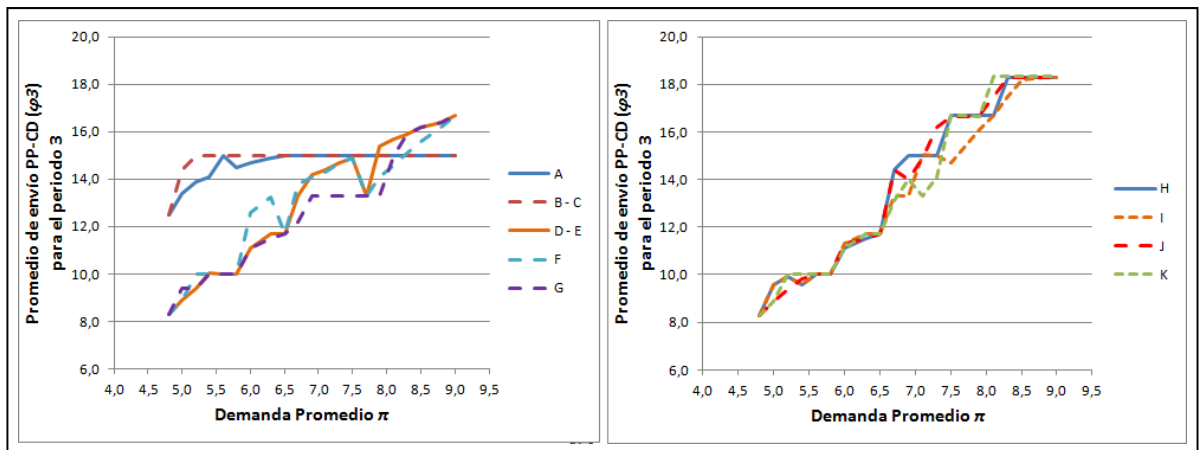


Figura 40. π vs. φ_3 en el periodo 3

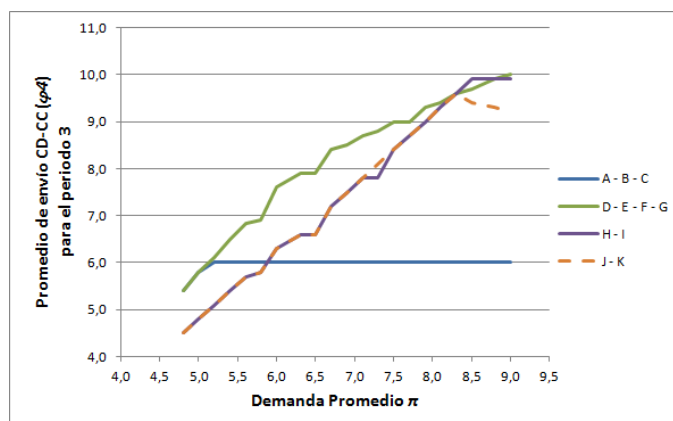


Figura 41. π vs. φ_4 en el periodo 3

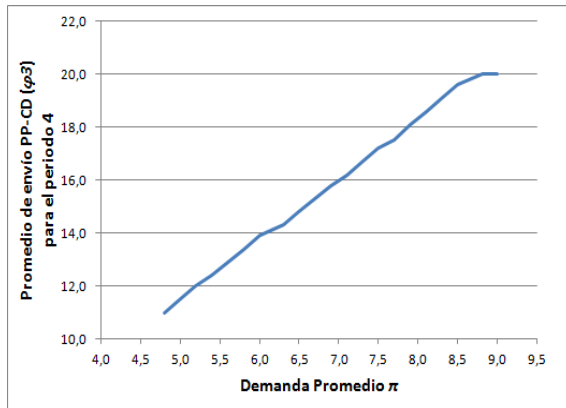


Figura 42. π vs. φ_3 en el periodo 4

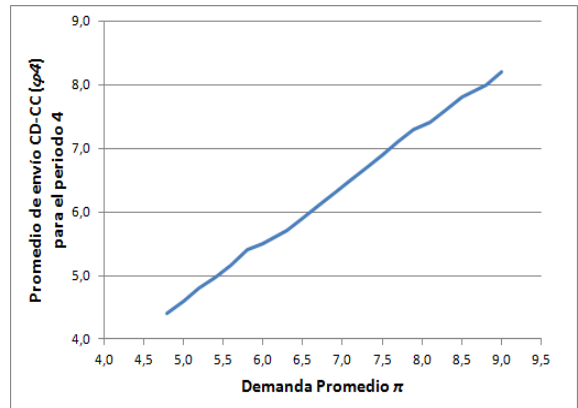


Figura 43. π vs. φ_4 en el periodo 4

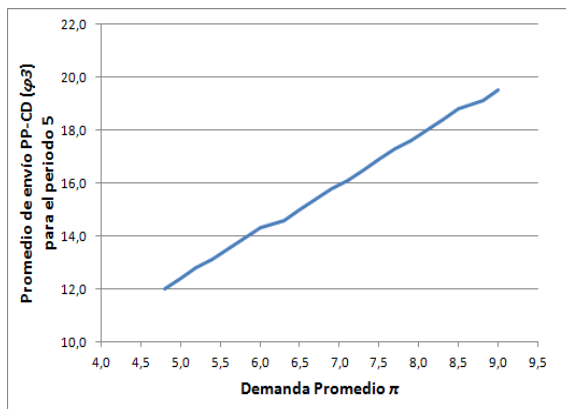


Figura 44. π vs. φ_3 en el periodo 5

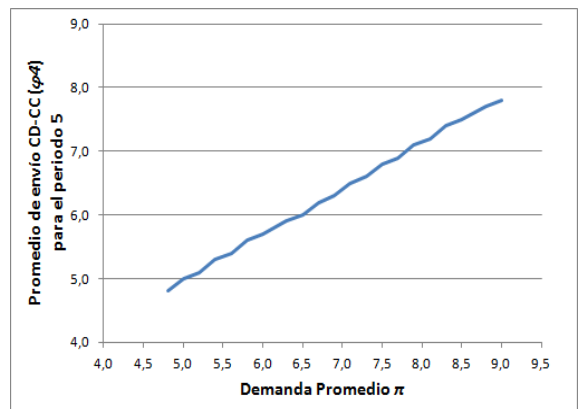


Figura 45. π vs. φ_4 en el periodo 5

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos en la presente investigación son los mostrados en las Figuras 32, 33 y 34. Sin embargo, antes de llevar a cabo el análisis de los resultados mostrados en tales figuras es pertinente analizar un poco las tablas del Anexo A.

8.1 ANÁLISIS DE LAS TABLAS DEL ANEXO A

Como se comentó en el capítulo anterior, recuerde que las tablas del Anexo A muestran, en general, los resultados que arrojan las corridas del modelo para el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ), el costo total de la gestión ($CTOTAL$), el costo sin penalización (CSP), el nivel total de expansión de la capacidad (φ_1), la cantidad promedio de envío desde las plantas de producción hasta los centros de distribución en cada periodo t (φ_3) y la cantidad promedio de envío desde los centros de distribución hasta los centros de consumo en cada periodo t (φ_4), luego de variar el parámetro δ desde cero (0) hasta veinte (20) y por tanto variando la demanda de manera controlada (d_k^t y en consecuencia la demanda promedio π). Además, estos resultados se obtuvieron para cada uno de los 11 conjuntos de estructuras (desde la A hasta la K) que se habían identificado en corridas anteriores del modelo y que se muestran en las Tablas 14 a 16 en el capítulo 7.

Cabe anotar además que no se realizará análisis para las Tablas A1 a A11 (en las que los resultados se discriminan por estructura) debido a que esos mismos resultados se muestran de una mejor manera en las Tablas A12 a A25, en las que los resultados se discriminan por variable de salida (Γ , $CTOTAL$, CSP , φ_1 , φ_3 y φ_4).

Se iniciará entonces con la Tabla A12, en la que se muestran los resultados para el costo total ($CTOTAL$) al variar la demanda. Allí se observa que a medida que el valor de la demanda aumenta, el costo también lo hace a causa de que al aumentar la demanda se aumentan los envíos y por tanto los costos. No obstante, si se analiza fila por fila, es decir, estructura por estructura, se observa que en algunas de ellas el costo aumenta más lentamente. Por ejemplo, compárese los resultados de la estructura B con los de la K. Mientras que para la demanda mínima ($\pi = 4,8$) el costo está entre 619 y 640, para la demanda máxima ($\pi = 9,0$) la brecha se aumenta considerablemente estando ahora entre 1708 para la estructura K y 2609 para la estructura B. Este resultado se da porque $CTOTAL$ incluye en su cálculo el costo de penalización por demanda insatisfecha (ecuación 1 del capítulo 6), y debido a que algunas estructuras tienen un menor porcentaje de demanda total satisfecha Γ (ver Tabla A14), este resultado afecta el del costo total de la gestión.

Con el fin de aclarar este punto y continuando con el ejemplo anterior para $\pi = 9,0$, la estructura K que presenta un costo total de 1708, muestra en la Tabla A14 que $\Gamma = 91,52\%$, mientras que la estructura B que presenta un costo total de 2609, muestra en la Tabla A14 que $\Gamma = 73,21\%$.

Observe ahora la Tabla A13, en la que se muestran los resultados para el costo sin penalización (CSP) y note que también los costos aumentan a medida que la demanda aumenta, pero a diferencia de la Tabla A12, esta vez las estructuras para las que el costo (CSP) crece más lentamente son aquellas en las que el costo ($CTOTAL$) crecía más rápidamente en la Tabla A12. Por ejemplo para $\pi = 9,0$, mientras que en la Tabla A12 ($CTOTAL_B = 2609$) > ($CTOTAL_K = 1708$), en la Tabla A13 ($CSP_B = 809$ < $CSP_K = 1138$). La explicación de este comportamiento es similar a la dada en el párrafo anterior, en la que la causa es el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) para cada estructura, pues CSP ya obviamente no incluye el costo de penalización por demanda insatisfecha.

A propósito de la Tabla A14, esta es la única cuya variable de salida disminuye mientras que la demanda aumenta (relación inversa entre π y Γ), pues en las demás tablas la relación es directa. Esta relación inversa entre π y Γ se da a causa de que a medida que la demanda aumenta, al sistema le es cada vez más difícil satisfacer la demanda sin incurrir en costos excesivos. Asimismo, hay estructuras en las que a pesar de que la demanda aumenta, les es más fácil permitir que el porcentaje de demanda total satisfecha no se deteriore. No obstante, no se comentará más acerca de esta cuestión en este punto debido a que es uno de los resultados más importantes de la presente investigación y por tanto su análisis se dejará para la sección 8.2 en la que se analizan precisamente los principales resultados.

La siguiente variable de salida a analizar es el nivel total de expansión de la capacidad (φ_1), cuyos resultados se muestran en la Tabla A15. Allí se observa que en general, la expansión de la capacidad aumenta a medida que la demanda aumenta, lo cual se da debido a que mientras mayor demanda haya, el sistema tenderá a cubrirla lo más posible para no incurrir en costos de penalización. Esta tendencia a cubrir lo más posible la demanda hace que, en lo posible, se aumente la capacidad de las plantas de producción. Tal resultado puede ser verificado en la Figura 35 del capítulo 7, en donde todas las estructuras presentan una relación directa entre π y φ_1 . Allí se observa que las estructuras A, B y C son las que presentan un menor crecimiento de la expansión de la capacidad cuando la demanda aumenta, mientras que las de mayor crecimiento son las estructuras H, I, J y K. Si se compara este resultado con el mostrado en la Tabla A14, puede notarse que precisamente las estructuras en las que se deteriora menos el porcentaje de demanda total satisfecha son las que presentan un mayor crecimiento de la

expansión de la capacidad, lo que demuestra que mejorar el porcentaje de demanda total satisfecha, es decir, aumentar la robustez del sistema, implica que debe contarse con una mayor capacidad en el mismo.

Las otras dos características de desempeño (φ_3 y φ_4), cuyas tablas relacionadas son las Tablas A16 a A25 y cuyas figuras relacionadas son las Figuras 36 a 45, no serán analizadas una separada de la otra, pero sí discriminadas por periodo. Es así como en las Tablas A16 y A21 se observa φ_3 y φ_4 para el periodo 1. En particular, en la Tabla A16 se muestra que a partir del valor $\pi = 6,5$, el promedio de envío siempre es de 15, independientemente de la estructura y de cualquier valor de $\pi \geq 6,5$. Algo similar puede observarse en la Tabla A21, en la que también para cualquier valor de $\pi \geq 6,5$ el promedio de envío es constante, siendo en este caso igual a 6. En las gráficas correspondientes (Figuras 36 y 37) se nota este comportamiento al graficarse sólo líneas rectas horizontales a partir de $\pi = 6,5$, mientras que para valores de $\pi < 6,5$, se grafica una línea creciente para φ_4 en la Figura 37 y para las estructuras A, B y C relacionadas con φ_3 en la Figura 36. Cabe aclarar en este momento que las estructuras pudieron ser agrupadas debido a que todos o casi todos los puntos son comunes entre ellas, lo cual se explica fácilmente si se da un vistazo a las Tablas 14 y 15 en el capítulo 7, en donde se observa que independientemente del conjunto de estructuras considerado, en el periodo 1 la estructura asociada siempre es la [1]. Estos resultados se entienden fácilmente si se considera la relación obvia que indica que a medida que la demanda aumenta, el sistema tenderá a enviar cada vez más unidades de producto. Ahora bien, debe explicarse que a partir de $\pi = 6,5$ la cantidad enviada deja de crecer debido al límite de la capacidad impuesta por las ecuaciones 2 y 3 del modelo de programación lineal, es decir, si bien la capacidad puede aumentarse esto no puede hacerse ilimitadamente y por tanto en este punto el sistema ha alcanzado su límite para el periodo 1 y ya no es posible enviar más cantidad de producto.

Observe ahora las Tablas A17 y A22, en las cuales se exponen los resultados para φ_3 y φ_4 en el periodo 2. En ellas se muestra que a medida que la demanda aumenta, el promedio de envío también aumenta independientemente de la estructura considerada. En este caso no hay tanta constancia en los resultados como en los que se analizaron para el periodo 1, así que el análisis se facilita a partir de la elaboración de gráficas. Estas se observan en las Figuras 38 y 39. En la primera se grafica π vs. φ_3 en el periodo 2 y se observa que en general, los resultados son erráticos aunque con una evidente tendencia creciente, con excepción de la estructura A que muestra una línea creciente muy bien definida y con excepción de las estructuras B y C que muestran una línea recta horizontal, es decir, independientemente de la demanda, las estructuras B y C tienden siempre a enviar la misma cantidad de producto en el periodo 2. Además de esto, a partir de

la misma Figura 38 y excluyendo a B - C, las estructuras pueden dividirse en 2 grupos: E, I y K, con un promedio de envío más alto que las demás, y A, D, F, G, H y J, con un promedio de envío más bajo. Por otro lado se tiene la Figura 39, en la que se grafica π vs. φ_4 en el periodo 2 y en donde los resultados no se muestran erráticos como en el caso de π vs. φ_3 para el mismo periodo. Allí hay una clara tendencia creciente en línea recta para las estructuras A, F, J, E y K. Además, para las estructuras D, G, H e I también se presenta tal crecimiento pero en menor medida a partir de ciertos valores de π . Se resalta además el caso de las estructuras B y C cuyo promedio de envío siempre se mantiene constante, y el de las estructuras E y K cuyo promedio de envío siempre se mantiene por debajo del promedio de envío de las estructuras A, F, J, D, G, H e I.

En las tablas A18 y A23 se exponen los resultados para φ_3 y φ_4 en el periodo 3. Tal como ocurre en las tablas de los periodos 1 y 2 analizadas anteriormente, para cualquier estructura se da que a medida que aumenta la demanda el promedio de envío lo hace también. Se presentan en ellas valores en común pero no en bloque como se podía apreciar en las tablas del periodo 1. En las Figuras 40 y 41 se observan las gráficas correspondientes. En la primera se muestra π vs. φ_3 en el periodo 3, cuyo comportamiento es similar a la analizada para el periodo 2: varias estructuras cuyo promedio de envío es creciente pero errático, a excepción de las estructuras A, B y C en las que a partir de $\pi = 6,5$ para A y $\pi = 5,2$ para B y C, el promedio de envío se estabiliza en $\varphi_3 = 15$ (ver también Tabla A18). Además, en general para este caso no se presenta una evidente diferenciación entre estructuras con mayor o menor promedio de envío, excepto en la última parte de las curvas desde aproximadamente $\pi = 7,0$, en donde las estructuras H, I, J y K presentan un mayor crecimiento que las demás. Por otro lado, en la Figura 41 se grafica π vs. φ_4 en el periodo 3. Allí se observa que las estructuras A, B y C se estabilizan en $\varphi_4 = 6$ para valores de $\pi \geq 5,2$, como puede verificarse también en la Tabla A23. Para el resto de estructuras, la tendencia creciente es evidente. También se observa en la Figura 41 que para la mayoría de valores de π , las estructuras D, E, F y G presentan un mayor promedio de envío que las demás y que su crecimiento no tiende a ser mediante una línea recta sino mediante una curva cuya pendiente decrece lentamente. Para las estructuras H, I, J y K el crecimiento sí tiende a ser sostenido mediante una línea recta, con excepción de las estructuras J y K que para valores de $\pi \geq 8,3$, muestran una "colita" de decrecimiento.

Finalmente, en las Tablas A19, A20, A24 y A25 se muestran los resultados para φ_3 en los periodos 4 y 5 y para φ_4 en los periodos 4 y 5, respectivamente. Se analizarán de manera conjunta pues los resultados son similares, como puede observarse en ellas. Se nota entonces que en cada una de las 4 tablas no hay diferencia entre los valores de φ_r discriminados por estructura, mas sí son distintos

al variar la demanda. Más exactamente, a medida que la demanda aumenta los valores de φ_3 y φ_4 aumentan también, como puede verificarse en las gráficas mostradas en las Figuras 42, 43, 44 y 45. En cada una de ellas se ha graficado una única línea debido a que todos los puntos de cada estructura son comunes, lo cual se explica dando nuevamente un vistazo a las Tablas 15 y 16 en el capítulo 7, en donde se observa que para los periodos 4 y 5 la estructura asociada siempre es la [1]. Esta constancia de la estructura [1] en los periodos 4 y 5 también explica que no se presente un comportamiento errático en las gráficas, tal como sucedía para los periodos 2 y 3.

A manera de conclusión para esta sección, debe decirse que los principales resultados de la presente investigación no incluyen a las características de desempeño φ_r , debido a que se encontró que no debía hacerse el “puente” a través de estos para determinar qué tanto puede variar el parámetro de perturbación (π) antes que se viole el requerimiento de robustez (Γ), sino que π puede relacionarse con Γ directamente. Este supuesto del “puente” a través de φ_r se había establecido debido a que en el trabajo de Ali *et al.* (2004) así se plantea, pero no fue necesario hacerlo en la presente investigación. De todos modos, aunque las características de desempeño φ_r no se consideren en los resultados principales que serán mostrados en la sección 8.2, su importancia no debe ser despreciada para futuras investigaciones en donde se trabaje bajo otros supuestos. Por ejemplo, en trabajos donde el parámetro de perturbación no sea la demanda sino la misma estructura, se puede considerar el caso en el que haya arcos o centros de distribución que no pudieran ser utilizados, entonces los valores que tomen los φ_r serán mucho más relevantes que en la presente investigación.

8.2 EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ROBUSTEZ-COSTO

A partir de las Figuras 32, 33 y 34 se procederá a realizar el análisis de los resultados más relevantes del presente proyecto de investigación. Así pues, en la Figura 32 se expone la relación entre la demanda promedio (π) y el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) para cada estructura identificada. Como puede notarse allí, en todas las estructuras Γ disminuye a medida que π aumenta, lo que indica una clara relación inversa entre ambas variables independientemente de qué estructura se tome para la cadena, lo cual se da a causa de que a medida que la demanda aumenta, al sistema le es cada vez más difícil satisfacer la demanda sin incurrir en costos excesivos, tal como se dijo anteriormente. Sin embargo, a pesar de que para los valores más bajos de la demanda casi todas las estructuras comienzan en un 100% de demanda total satisfecha, es notorio el hecho de que algunas estructuras tienen menor capacidad de mantener un porcentaje de

demanda satisfecha cuando el nivel de demanda aumenta, lo que en la gráfica se refleja en una pendiente más negativa, es decir, se grafica su curva correspondiente más abajo que las de otras estructuras. Cabe aclarar en este punto que algunas estructuras presentan iguales todos sus puntos y por eso se han fusionado en una sola curva. Estas estructuras son: B y C; E y F; J y K.

Es así como las estructuras en las que se deteriora más rápidamente el porcentaje de demanda total satisfecha son las estructuras B y C, en las que para una demanda promedio de $\pi = 9,0$, Γ toma un valor de 73,21%, siendo este el porcentaje más bajo arrojado en todo el estudio. Ahora bien, para varios valores de π hay estructuras que tienen puntos en común mientras que en otros toman valores distintos, como puede observarse en la Figura 32. Con base en esto, se tiene entonces que el orden en que las estructuras se comportan de acuerdo al porcentaje de demanda total satisfecha, organizadas desde los peores porcentajes (los más bajos) hasta los mejores (los más altos) son: B - C, A, G, D, E - F, H, I y J - K. Estas 2 últimas estructuras son las que mejor se comportan en términos de porcentaje de demanda total satisfecha, pues si bien para valores de π entre 4,8 y 7,1 y entre 8,8 y 9,0, se comportan igual que varias de las otras estructuras, para valores de π entre 7,3 y 8,5 presentan valores de Γ más altos que cualquier otra.

Observe ahora la Figura 33, en la que se grafica la demanda promedio (π) contra el costo total sin penalización (CSP). En tal figura se observa que independientemente de la estructura, el costo siempre aumenta a medida que la demanda lo hace, a causa de que el hecho de que la demanda aumente hace que el sistema aumente los envíos y aumente las capacidades de las plantas de producción, lo cual se refleja en un aumento en los costos de operación de la cadena. Vale aclarar en este punto que, así como ha sucedido en otras gráficas ya analizadas, en la de la Figura 33 también se han fusionado algunas estructuras en una misma curva debido a que todos sus puntos son comunes. Tales estructuras son: B y C; E y F; H e I; J y K.

Sin embargo, si bien todas las estructuras presentan una relación directa entre π y CSP, algunas estructuras muestran una menor pendiente que otras, es decir, un menor crecimiento del costo al aumentar la demanda. El orden en el que esto se presenta, haciendo la salvedad que hay estructuras que tienen algunos puntos en común, desde la estructura de menor costo hasta la de mayor costo es el siguiente: B - C, A, G, D, E - F, H - I y J - K.

Como puede notarse, es muy importante resaltar que el orden que tomaron las estructuras según el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) es el mismo que tomaron al ser ordenadas según el costo total sin penalización (CSP). En la Tabla 17

se muestra esta relación ya comprobada visualmente en las Figuras 32 y 33, pero que se expondrá de una forma distinta calculando los promedios de Γ y de CSP que toma cada estructura, los cuales están basados en los resultados mostrados en las Tablas A13 y A14.

CONJUNTOS DE ESTRUCTURAS EN EL ORDEN DETERMINADO	PROMEDIO DE PORCENTAJE DE DEMANDA TOTAL SATISFECHA (Γ)	PROMEDIO DE COSTO TOTAL SIN PENALIZACIÓN (CSP)
B	86,52%	736,2
C	86,52%	736,2
A	90,29%	792,9
G	95,64%	886,7
D	95,95%	893,2
E	96,14%	894,5
F	96,14%	894,5
H	97,50%	921,2
I	97,56%	921,2
J	97,84%	927,1
K	97,84%	927,1

Tabla 17. Estructuras ordenadas según Γ y CSP

Así pues, basados en los resultados mostrados en las Figuras 32 y 33 y en la Tabla 17, se puede observar que las estructuras que presentan un mayor porcentaje de demanda total satisfecha son aquellas que también presentan un mayor costo de la gestión⁵; en otras palabras, *un diseño más robusto para la cadena de suministros implica un mayor costo en la gestión de la misma.*

Tomando como ejemplo el caso estudiado en la presente investigación, pero sin perder generalidad, este mayor costo se presenta debido a que si se desea satisfacer un mayor porcentaje de la demanda, es necesario enviar mayor cantidad de producto y por tanto gastar más dinero en transporte. Además, un mayor porcentaje de demanda satisfecha implica que se invierta dinero en expansión de la capacidad de cada instalación o que se haga uso de más instalaciones, en caso de que la capacidad o las instalaciones actuales no sean suficientes para satisfacer la demanda que se presente.

⁵ Recuerde que el costo total sin penalización es el que refleja el costo real de la gestión, al no incluir precisamente el costo de penalización. Es por este motivo que el análisis no se lleva a cabo con $CTOTAL$, tal como se comentó anteriormente

Este importante resultado que refleja la relación directa entre el porcentaje de demanda total satisfecha y el costo de la gestión de la cadena, puede verse desde otro ángulo al graficar Γ vs. CSP . Tal gráfica se expone en la Figura 34, la cual se ha elaborado para algunos valores escogidos de la demanda promedio (π). Estos valores escogidos fueron el valor mínimo ($\pi = 4,8$), el valor máximo ($\pi = 9,0$) y tres valores intermedios ($\pi = 5,8$, $\pi = 6,9$ y $\pi = 7,9$) ubicados en los cuartiles 1, 2 y 3. En tal gráfica puede observarse efectivamente que a medida que el porcentaje de demanda total satisfecha aumenta, el costo sin penalización también lo hace, independientemente del nivel en el que esté la demanda, en donde este aumento en el costo se produce a causa de un cambio en la estructura de la cadena. En otras palabras, si una cadena de suministros tiene una estructura particular y se desea cambiar a otra que ofrezca una mayor robustez, es necesario que el sistema incurra en costos adicionales.

Un resultado importante que debe resaltarse también a partir de la Figura 34, es el de longitud creciente de las curvas a medida que la demanda es mayor. Por ejemplo, observe que para la demanda promedio de $\pi = 4,8$, la curva asociada no presenta una gran extensión, mientras que para la demanda promedio de $\pi = 9,0$, la curva asociada es la más extensa de todas. Este resultado indica que para niveles pequeños de la demanda, la mayoría de estructuras es capaz de satisfacerla sin incurrir en grandes costos, mientras que para niveles grandes de la demanda las diferencias entre cada estructura son mucho más marcadas y no todas son capaces de satisfacer adecuadamente tal demanda alta, pues si bien algunas son menos costosas, el nivel de satisfacción de la demanda es bajo en comparación con otras estructuras más costosas.

Finalmente, un resultado adicional que puede inferirse a partir de la relación robustez-costo es el que responde a lo siguiente: si actualmente la cadena de suministros se encuentra haciendo uso de una estructura particular, ¿qué tan costoso es cambiarse a otra estructura de tal manera que se mejore la robustez? Para esto se hará uso de un nuevo indicador que incluye tanto el costo como la robustez y que tenga en cuenta este cambio. Tal indicador es el siguiente:

$$\Omega = \frac{\Delta CSP}{|\Delta \Gamma|} = \frac{CSP_2 - CSP_1}{|\Gamma_2 - \Gamma_1|} \quad (21)$$

En donde CSP_2 y Γ_2 son el costo sin penalización y el porcentaje de demanda satisfecha, respectivamente, para la estructura a donde se desea cambiar, y CSP_1 y Γ_1 son el costo sin penalización y el porcentaje de demanda satisfecha, respectivamente, para la estructura actual. Este indicador llamado Ω mostrado en la ecuación 21, es un indicador que calcula cuánto cuesta el cambio (Δ) de

estructura por cada punto porcentual de cambio. El valor absoluto en el denominador se incluyó para que este siempre fuera positivo, de tal manera que un cambio de estructura de una menos costosa a una más costosa (y por tanto más robusta) dará un valor de $\Omega > 0$, y un cambio de estructura de una más costosa a una menos costosa (y por tanto menos robusta) dará una valor de $\Omega < 0$. La interpretación de tal indicador es tal que mientras menor sea, es un mejor resultado, sin importar si es positivo o negativo. Es decir, si $\Omega > 0$, un valor más cercano a cero indicará que por cada punto porcentual de demanda satisfecha, es menos costoso cambiarse a una estructura en particular que mejore la robustez. Por otro lado, si $\Omega < 0$, un valor más alejado de cero indicará que por cada punto porcentual de demanda satisfecha, los costos ahorrados serán mayores a causa del cambio a una estructura en particular que disminuya la robustez.

Para el caso particular de los datos con los que se viene trabajando en la presente investigación, en las Tablas 18 a 22 se muestran los valores que toma el indicador Ω para los mismos valores de demanda considerados en la Figura 34, es decir, el valor mínimo ($\pi = 4,8$), el valor máximo ($\pi = 9,0$) y tres valores intermedios ($\pi = 5,8$, $\pi = 6,9$ y $\pi = 7,9$) ubicados en los cuartiles 1, 2 y 3. En tales tablas, las estructuras de la columna izquierda indican cuál es la estructura actual con la que está trabajando la cadena, mientras que las estructuras de la fila superior indican la estructura hacia la que se quiere realizar el cambio. Además, en cada una de las tablas hay algunas líneas horizontales, las cuales indican que el cambio no puede realizarse, ya sea porque se trata de la misma estructura o porque el cambio en la robustez, es decir en el porcentaje de demanda total satisfecha, es nulo ($\Delta\Gamma = 0$). Por tal motivo, hay más líneas horizontales para aquellas tablas cuyas estructuras se muestran más “comprimidas” en la Figura 34 para cada valor de π .

A manera de ejemplo, suponga que se tiene una cadena de suministros que actualmente trabaja con la estructura D y que se quiere evaluar un cambio de estructura para mejorar la robustez en un escenario en que la demanda es la máxima posible (Tabla 22). En este caso, en tal tabla se debe observar la *fila* correspondiente a D y buscar sólo los valores positivos pues se desea mejorar la robustez. Para este caso, el cambio de estructura menos costoso por cada punto porcentual de demanda satisfecha lo brinda el cambio a las estructuras E o F con un valor de $\Omega = 6,72$. Este valor indica que cada punto porcentual de mejora de la robustez al cambiar de D a E o de D a F, tiene un costo adicional de 6,72 unidades monetarias, teniendo siempre presente que para $\pi = 9,0$, las estructuras E o F ofrecerán un porcentaje de demanda total satisfecha de hasta 89,29%.

Continuando con el mismo ejemplo, suponga ahora que lo que se quiere es disminuir el costo de operación de la cadena aunque se disminuya la robustez. Si

se observa nuevamente la fila correspondiente a la estructura D en la Tabla 22, se deben buscar los valores negativos y encontrar el más negativo en caso de que lo que se quiera sea reducir el costo lo más posible con el mínimo deterioro de la robustez. Para el caso del presente ejemplo se debería entonces efectuar el cambio hacia la estructura A, que ofrece un valor de $\Omega = -17,29$. Este valor indica que cada punto porcentual de reducción de la demanda satisfecha al cambiar de D a A, tiene un ahorro en costos de 17,29 unidades monetarias, teniendo siempre presente que para $\pi = 9,0$, la estructura A ofrecerá un costo mínimo de 920 unidades monetarias.

$\pi = 4,8$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	----	-31,33	-31,33	----	----	----	----	----	----	----	----
B	31,33	----	----	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45
C	31,33	----	----	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45	61,45
D	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
E	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
F	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
G	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
H	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
I	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
J	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----
K	----	-61,45	-61,45	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 18. Valor de Ω para $\pi = 4,8$

$\pi = 5,8$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	----	-14,02	-14,02	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58
B	14,02	----	----	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96
C	14,02	----	----	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96
D	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
E	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
F	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
G	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
H	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
I	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
J	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----
K	-15,58	-14,96	-14,96	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 19. Valor de Ω para $\pi = 5,8$

$\pi = 6,9$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	----	-9,83	-9,83	16,94	16,94	16,94	16,94	15,25	15,25	15,25	15,25
B	9,83	----	----	14,39	14,39	14,39	14,39	13,53	13,53	13,53	13,53
C	9,83	----	----	14,39	14,39	14,39	14,39	13,53	13,53	13,53	13,53
D	-16,94	-14,39	-14,39	----	----	----	----	6,85	6,85	6,85	6,85
E	-16,94	-14,39	-14,39	----	----	----	----	6,85	6,85	6,85	6,85
F	-16,94	-14,39	-14,39	----	----	----	----	6,85	6,85	6,85	6,85
G	-16,94	-14,39	-14,39	----	----	----	----	6,85	6,85	6,85	6,85
H	-15,25	-13,53	-13,53	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	----	----	----	----
I	-15,25	-13,53	-13,53	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	----	----	----	----
J	-15,25	-13,53	-13,53	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	----	----	----	----
K	-15,25	-13,53	-13,53	-6,85	-6,85	-6,85	-6,85	----	----	----	----

Tabla 20. Valor de Ω para $\pi = 6,9$

$\pi = 7,9$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	----	-18,03	-18,03	16,31	16,31	16,31	10,83	14,24	14,20	13,59	13,59
B	18,03	----	----	17,01	17,01	17,01	14,00	15,50	15,47	14,99	14,99
C	18,03	----	----	17,01	17,01	17,01	14,00	15,50	15,47	14,99	14,99
D	-16,31	-17,01	-17,01	----	----	----	-50,58	8,54	8,50	7,91	7,91
E	-16,31	-17,01	-17,01	----	----	----	-50,58	8,54	8,50	7,91	7,91
F	-16,31	-17,01	-17,01	----	----	----	-50,58	8,54	8,50	7,91	7,91
G	-10,83	-14,00	-14,00	50,58	50,58	50,58	----	20,10	19,93	17,46	17,46
H	-14,24	-15,50	-15,50	-8,54	-8,54	-8,54	-20,10	----	6,00	5,90	5,90
I	-14,20	-15,47	-15,47	-8,50	-8,50	-8,50	-19,93	-6,00	----	5,90	5,90
J	-13,59	-14,99	-14,99	-7,91	-7,91	-7,91	-17,46	-5,90	-5,90	----	----
K	-13,59	-14,99	-14,99	-7,91	-7,91	-7,91	-17,46	-5,90	-5,90	----	----

Tabla 21. Valor de Ω para $\pi = 7,9$

$\pi = 9,0$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	----	-16,57	-16,57	17,29	15,78	15,78	17,97	19,13	19,12	18,78	18,78
B	16,57	----	----	16,96	16,11	16,11	17,31	18,19	18,19	17,97	17,97
C	16,57	----	----	16,96	16,11	16,11	17,31	18,19	18,19	17,97	17,97
D	-17,29	-16,96	-16,96	----	6,72	6,72	-6,73	23,28	23,25	22,13	22,13
E	-15,78	-16,11	-16,11	-6,72	----	----	-6,72	33,23	33,18	31,39	31,39
F	-15,78	-16,11	-16,11	-6,72	----	----	-6,72	33,23	33,18	31,39	31,39
G	-17,97	-17,31	-17,31	6,73	6,72	6,72	----	21,28	21,26	20,27	20,27
H	-19,13	-18,19	-18,19	-23,28	-33,23	-33,23	-21,28	----	----	----	----
I	-19,12	-18,19	-18,19	-23,25	-33,18	-33,18	-21,26	----	----	----	----
J	-18,78	-17,97	-17,97	-22,13	-31,39	-31,39	-20,27	----	----	----	----
K	-18,78	-17,97	-17,97	-22,13	-31,39	-31,39	-20,27	----	----	----	----

Tabla 22. Valor de Ω para $\pi = 9,0$

8.3 DEFINICIÓN DE UNA NUEVA MÉTRICA DE ROBUSTEZ

Como pudo demostrarse anteriormente, la métrica de robustez propuesta por Ali *et al.* (2004) a través del uso del procedimiento FePIA es de difícil aplicación en el diseño de redes logísticas mediante programación lineal. Así pues, a partir de los resultados obtenidos en la presente investigación es posible definir una nueva métrica de robustez. Para tal fin, dé nuevamente un vistazo a la Figura 32 (la cual se muestra nuevamente a continuación para facilidad de lectura), en la cual se grafica la demanda promedio (π) vs. el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ) para cada estructura identificada y que fue analizada en la sección 8.2. Al principio de la presente investigación se había planteado fijar valores de Γ como límite de robustez, siguiendo literalmente la aplicación del procedimiento FePIA, de tal manera que gráficamente es como si en la Figura 32 dibujáramos líneas horizontales para cada uno de los valores de Γ que fueran fijados. No obstante, en tal figura es evidente que los valores de Γ que se establezcan como límite de robustez no deberían ser constantes, sino variar inversamente con la demanda, de tal manera que sea un resultado esperado que al aumentar la demanda, la robustez del sistema disminuya también pero dentro de unos límites establecidos.

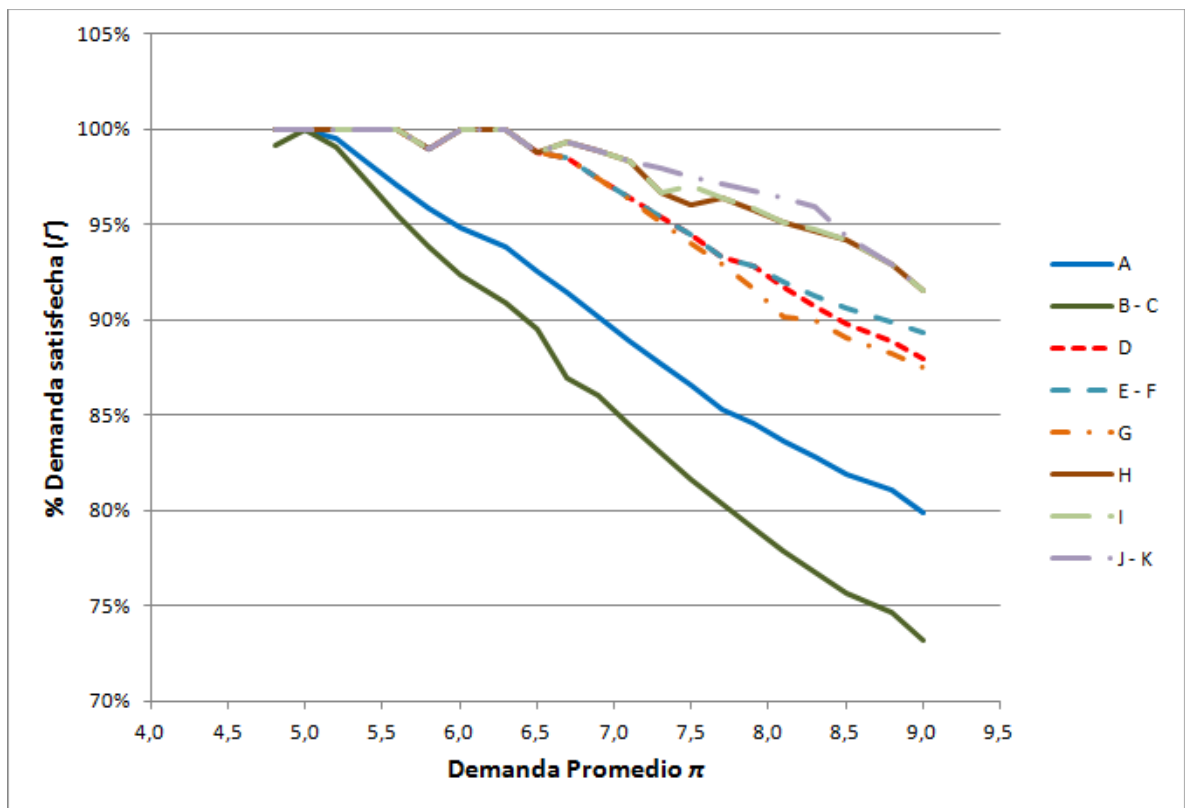


Figura 32. π vs. Γ para cada estructura identificada

Así pues, como resultado de la presente investigación, la métrica de robustez propuesta para el diseño de cadenas de suministros en los que la demanda es el parámetro de perturbación consta de cuatro pasos mostrados a continuación, los cuales inicialmente se explicarán de manera general e inmediatamente después se expondrá el ejemplo con los datos utilizados en todo el trabajo.

8.3.1 PASO 1. Definición de los valores extremos de la demanda y del porcentaje de demanda total satisfecha. Este paso consiste en la determinación de 2 escenarios extremos: uno en el que la demanda sea la mínima posible (denotado por π_1) y otro en el que la demanda sea la máxima posible (denotado por π_2). Luego, para cada uno de estos 2 escenarios se debe definir el porcentaje de demanda satisfecha que se *desea* tener en el sistema, garantizando que el mayor de estos porcentajes (denotado por Γ_1) se dé para cuando la demanda sea la mínima (π_1) y que el menor de estos porcentajes (denotado por Γ_2) se dé para cuando la demanda sea la máxima (π_2).

Para el ejemplo, los 2 escenarios serán los definidos por las demandas promedio $\pi_1 = 4,8$ y $\pi_2 = 9,0$. Ahora se determinará un porcentaje *deseado* de demanda total satisfecha para cada uno de estos valores, de tal manera que para $\pi_1 = 4,8$ se definirá $\Gamma_1 = 100\%$, y para $\pi_2 = 9,0$ se definirá $\Gamma_2 = 90\%$.

8.3.2 PASO 2. Cálculo de la función de robustez. Una función de robustez es una función lineal de pendiente negativa que relaciona la demanda promedio (π) con el porcentaje deseado de demanda total satisfecha (Γ). Matemáticamente, se tendrá una función $f = \Gamma(\pi)$. Tal función se determina a partir de la clásica fórmula para la pendiente de una recta (m) y su intercepto (b), así:

$$m = \frac{\Gamma_2 - \Gamma_1}{\pi_2 - \pi_1} \quad (22)$$

$$b = \Gamma_1 - m\pi_1 \quad (23)$$

El cálculo de estos parámetros generará entonces la función de robustez que relaciona π con Γ , la cual está dada por la ecuación 24

$$\Gamma(\pi) = m\pi + b \quad (24)$$

Para el ejemplo, el uso de las ecuaciones 22 y 23 arroja un valor⁶ de $m = -\frac{50}{21}$ y de $b = \frac{780}{7}$, de tal manera que la función de robustez es $\Gamma = -\frac{50}{21}\pi + \frac{780}{7}$

8.3.3 PASO 3. Determinación de la demanda límite. Definir el requerimiento de robustez dado por un valor objetivo para el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ_{obj}), tal que se encuentre entre los límites dados en el paso 1, es decir, $\Gamma_2 < \Gamma_{obj} < \Gamma_1$. Tal valor y la ecuación 24 determinarán cuál es la demanda máxima permitida (π_{lim}) antes que se viole el requerimiento de robustez, independientemente de la estructura que se tenga en la cadena.

Para el caso del ejemplo, suponga que el valor objetivo para el porcentaje de demanda total satisfecha es $\Gamma_{obj} = 94\%$. Al sustituir en la ecuación 24 se obtiene un valor de demanda límite de $\pi_{lim} = 7,32 \approx 7,3$, lo que indica que para valores de demanda mayores que 7,3, el sistema ya no será considerado robusto debido a que tales valores arrojarían un valor de $\Gamma < 94\%$.

8.3.4 PASO 4. Evaluación de la robustez de una estructura. Este paso puede llevarse a cabo sin realizar el paso 3, pues en este paso 4 se establecerá qué tan robusta es una estructura con base en la función de robustez definida en el paso 2. Para la estructura que será evaluada, inicialmente debe contarse con una gráfica de π vs. Γ que en este contexto se denotará por $g(\pi)$, la cual puede elaborarse mediante la metodología descrita en la sección 6.2 del presente trabajo. Luego, en esta misma gráfica se dibuja la función definida en la ecuación 24 y visualmente se compara para qué intervalos de demanda la estructura considerada es robusta. Matemáticamente, la estructura considerada es robusta $\{\forall \pi | g(\pi) > \Gamma(\pi)\}$, de lo contrario se considera que la estructura no es robusta.

Para el ejemplo, se evaluará la robustez de la estructura D. La gráfica asociada se muestra en la Figura 46, en donde la línea recta $[\Gamma(\pi)]$ define la función de robustez y la otra curva $[g(\pi)]$ es la asociada a la estructura D. Como puede ser complicado establecer una función analítica para $g(\pi)$, el intercepto entre ambas curvas se establecerá visualmente. Para el caso del ejemplo, el valor de la demanda promedio que marca este límite es aproximadamente $\pi = 8,0$, es decir, que si la demanda que se presenta en el sistema es menor que 8,0 ($\pi < 8,0$), la estructura D se considera robusta, pero si la demanda que se presenta en el sistema es mayor que 8,0 ($\pi > 8,0$), la estructura D ya no es robusta.

⁶ Los valores usados para Γ pueden ser fracciones o porcentajes, siempre y cuando el uso de unos u otros sea coherente durante todos los cálculos. Para el caso del ejemplo se usarán porcentajes

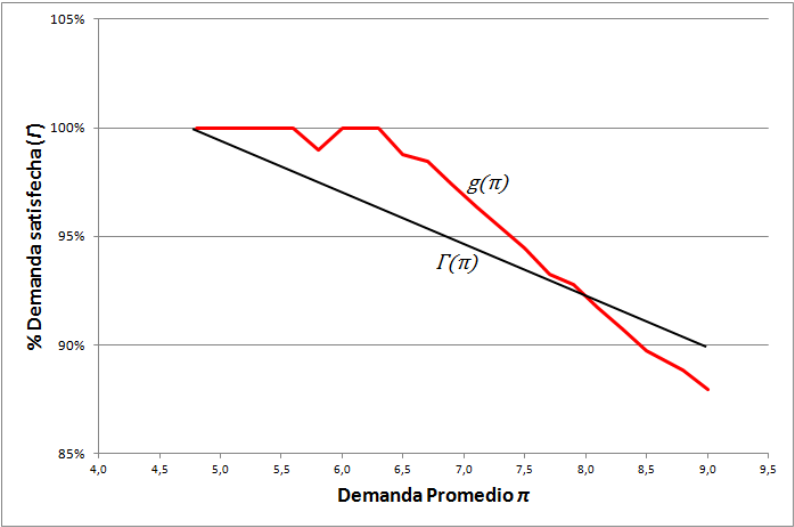


Figura 46. Evaluación de la robustez de la estructura D

9. CONCLUSIONES

El procedimiento FePIA propuesto por Ali *et al.* (2004) como una métrica de robustez propone una metodología a partir de la cual se busca determinar cuándo un sistema puede ser considerado robusto y cuándo no. En la presente investigación se ha aplicado tal metodología en el contexto de una cadena de suministros, más específicamente en la toma de decisiones estratégicas relacionadas con el problema de planeación de la capacidad y localización de almacenes para un horizonte de planeación de varios periodos y considerando mercados con demandas inciertas. En los primeros pasos de tal procedimiento, el presente proyecto pudo desarrollarse tal cual como es establecido por Ali *et al.* (2004) pues se pudo definir, con base en el trabajo de otros autores, los requerimientos de robustez, las características de desempeño y los parámetros de perturbación asociados a la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros. Además de esto, pudo efectivamente determinarse cuantitativamente el impacto de los parámetros de perturbación sobre las características de desempeño y los requerimientos de robustez a través de un modelo de programación lineal. Estos resultados permitieron lograr los primeros dos objetivos específicos del presente proyecto.

Sin embargo, a pesar de que los primeros pasos del procedimiento FePIA pudieron ser seguidos literalmente, se demostró que la aplicación literal del mismo en su totalidad se dificulta en el contexto de la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros a causa de cuatro razones: (1) el procedimiento FePIA aplicado pasó de ser uno netamente cuantitativo, tal como se propone originalmente, a un híbrido entre cuantitativo y cualitativo, (2) no existe una relación matemática clara entre algunas características de desempeño y el parámetro de perturbación, (3) para aquellas características de desempeño en las que sí pueda establecerse esta relación, esta sólo existe en unos intervalos específicos y por tanto no son relaciones válidas para valores por fuera de tales intervalos, y (4) fijar el porcentaje de demanda total satisfecha como uno de los pasos necesarios para la aplicación del procedimiento produce resultados matemáticamente incoherentes.

Debido a estas razones se propuso entonces una metodología aún basada en el procedimiento FePIA pero que superara todos estos inconvenientes, demostrando a lo largo del proyecto que efectivamente ella tiene la capacidad de ser aplicada al problema de toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros con demandas inciertas de tal manera que con ella el sistema considerado pueda ser medido al mismo tiempo con base en qué tan robusto es y en qué tan costoso es, lo cual no solo responde a la primera pregunta de investigación, sino que representa

el logro del principal objetivo del proyecto. De hecho, debe resaltarse que precisamente el establecimiento de esta metodología es un aporte novedoso al conocimiento debido a dos razones: (1) mientras que en la revisión de literatura llevada a cabo no son muchos los trabajos que establecen una relación entre la robustez y el costo, en el presente trabajo se ha establecido tal relación, (2) mientras que el procedimiento FePIA propuesto por Ali *et al.* (2004) se ha aplicado solamente a sistemas distribuidos de computadores, en el presente trabajo se ha adaptado para poder ser aplicado en el contexto de una cadena de suministros.

Ahora bien, como se dijo anteriormente, una de las razones por las que el procedimiento FePIA no se siguió literalmente fue porque la aplicación en una cadena de suministros hizo que pasara a ser un híbrido entre cuantitativo y cualitativo. Este carácter cualitativo se dio porque los resultados iniciales de la aplicación literal del procedimiento FePIA sobre el modelo de programación lineal considerado, permitieron concluir que era preferible realizar las corridas posteriores haciendo una diferenciación por estructura, es decir, que la estructura misma hiciera parte de las características de desempeño (en este caso cualitativa) del modelo y que para cada una de tales estructuras identificadas se estableciera el impacto que la variación en la demanda tendría sobre las otras características de desempeño y en especial sobre el requerimiento de robustez, el porcentaje de demanda total satisfecha. Podría entonces concluirse en esta parte que se determinó que la estructura de la cadena de suministros es una característica de desempeño más relevante que las demás, debido al impacto que tiene en los resultados.

No obstante, la misma diferenciación entre estructuras permitió determinar la principal conclusión de la presente investigación, la cual se refiere a que independientemente de la estructura considerada, un diseño más robusto para la cadena de suministros implica un mayor costo en la gestión de la misma, lo cual pudo comprobarse a través de los resultados que mostraron que aquellas estructuras que ofrecían un mayor porcentaje de demanda total satisfecha eran las más costosas. Esta es la principal conclusión del presente trabajo, pues no solo responde a la segunda pregunta de investigación planteada, sino que establece que efectivamente la relación entre la robustez y el costo es una relación directamente proporcional, no necesariamente lineal, lo cual confirma la hipótesis planteada al inicio de la investigación. Además, este resultado dio pie para el logro del tercer objetivo específico, pues a pesar de que por se tal resultado ya es una evaluación de la relación robustez-costo, esta se amplió un poco al determinar que a pesar de que todas las estructuras son distintas en cuanto a su relación robustez-costo, la diferencia entre ellas se hace más palpable dependiendo del nivel de demanda que se presente en el sistema. Es así como para valores pequeños de demanda la

relación robustez-costo no es muy distinta entre las estructuras identificadas, pero a medida que tal nivel de demanda aumenta la diferencia entre estructuras se hace más marcada, de tal manera que para la máxima demanda considerada las estructuras son más disímiles entre sí al compararlas con base en la relación robustez-costo. Este resultado indica entonces que para niveles bajos de demanda cualquier estructura se comportará de manera similar, pero para niveles altos de la misma debe tenerse cuidado en la escogencia de la estructura bajo la que se gestionará la cadena de suministros, pues aunque algunas de ellas sean menos costosas, su grado de robustez es menor que aquellas que son más costosas.

Esta diferencia entre estructuras lleva entonces al tomador de decisiones a plantearse la pregunta de qué tanto cuesta tener robustez adicional al cambiar la estructura bajo la que opera la cadena de suministros, o qué tanto puede ahorrarse en costos al reducir la robustez de la cadena. Para responder a estos interrogantes se ha planteado entonces el indicador Ω , el cual establece una relación entre el cambio en el costo al pasar de una estructura a otra y el cambio de robustez que esto genera. Esto quiere decir entonces que se cuenta con un indicador que establece lo que Bertsimas, & Sim (2004) llaman el precio de la robustez, aunque sea un concepto distinto y se defina en un contexto distinto al que ellos plantean, es decir, en el contexto de la toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros.

Finalmente, dado que la aplicación literal del procedimiento FePIA propuesto por Ali *et al.* (2004) fue de difícil utilización en el contexto establecido en la presente investigación, se ha propuesto una nueva métrica de robustez que posee varios elementos en común con lo propuesto por esos autores, pero que se ha adaptado específicamente a un problema de toma de decisiones estratégicas en una cadena de suministros. Esta nueva métrica establece una relación llamada función de robustez, entre el parámetro de perturbación considerado y el requerimiento de robustez, de tal manera que dado un nivel de robustez objetivo se puede determinar cuál es el límite dentro del cual debe estar tal parámetro de perturbación antes de que se viole el objetivo establecido. Además, dada una estructura particular a ser estudiada para el diseño de una cadena de suministros, la métrica de robustez propuesta también permite determinar con base en la función de robustez descrita anteriormente, para qué valores del parámetro de perturbación (la demanda en el caso de la presente investigación) la estructura estudiada es considerada robusta y para cuáles no se considera como tal.

10. RECOMENDACIONES

Para la realización de investigaciones futuras en el tema tratado en la presente investigación, se recomienda realizar una clara diferenciación entre estructuras analizadas, pues al hacer esto se pueden obtener mejores resultados, tal como se demostró durante el trabajo llevado a cabo. Esta diferenciación entre estructuras se hizo a través del modelo de programación lineal considerado para modelar la cadena, pero no se descarta que pueda hacerse uso de herramientas distintas, por ejemplo, si los valores de demanda no se varían de la manera en que se hizo en el presente proyecto, sino que se consideran demandas estocásticas, podrían hacerse pruebas a través de modelos de simulación y establecer alguna métrica de robustez distinta a la propuesta como resultado de este proyecto de investigación.

También podría considerarse el estudio de otro tipo de decisiones en la cadena de suministros, por ejemplo, podría tenerse en cuenta las decisiones tácticas y/u operativas y establecer una relación robustez-costo para este tipo de problemas, o construir una métrica de robustez específica para ellas. Podría incluso considerarse el hecho de incluir decisiones sobre manufactura como otras fuentes de incertidumbre, por ejemplo, que la capacidad de las plantas de producción puedan variar debido a las fluctuaciones estadísticas naturales que pueden presentarse en tales procesos de manufactura.

Otra fuente de incertidumbre que podría considerarse sería la asociada al abastecimiento mismo debido a, por ejemplo, fallas o demoras en las entregas. Por supuesto, debe resaltarse que estas demoras en las entregas también pueden ser ocasionadas por fallas en la estructura misma. Por ejemplo, ¿qué pasaría si no estuviera disponible un arco a través del cual se había planeado un envío? ¿Podría el sistema seguir siendo tan robusto como se había planeado? Las respuestas a estos cuestionamientos podrían ser resueltos en futuros proyectos de investigación, en los cuales las características de desempeño podrían ser analizadas con mucho más detalle de lo que se hizo en este proyecto, debido al cambio de enfoque que se generaría al considerar una fuente de incertidumbre distinta a la demanda.

BIBLIOGRAFÍA

Aghezzaf, E. (2005). Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*, 56, 453-462

Ali, S., Maciejewski, A.A., Siegel, H.J. & Kim, J.K. (2004). Measuring the robustness of a resource allocation. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 15, 630-641

Azaron, A., Brown, K.N., Tarim, S.A. & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116, 129-138

Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical Programming Series B*, 88, 411-424

Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations Research*, 52, 35-53

Bertsimas, D., & Thiele, A. (2004). A Robust Optimization Approach to Supply Chain Management. *Lecture Notes in Computer Science*, 3064, 86-100

Bidhandi, H.M., Yusuff, R.M., Ahmad, M.M., & Bakar, M.R. (2009). Development of a new approach for deterministic supply chain network design. *European Journal of Operational Research*, 198, 121-128

Bilgen, B. (2010). Application of fuzzy mathematical programming approach to the production allocation and distribution supply chain network problem. *Expert Systems with Applications*, 37, 4488-4495

Blackhurst, J., Wu, T., & O'Grady, P. (2004). Network-based approach to modelling uncertainty in a supply chain. *International Journal of Production Research*, 42, 1639-1658

Chan, F.T.S. (2003). Performance measurement in a supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, 534-548

Chen, C. L. & Lee, W. C. (2004). Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 1131-1144

Chen, C.L., Yuan, T.Y., Chang, C.Y., Lee, W.C. & Ciou, Y.C. (2006). A Multi-criteria Optimization Model for Planning of A Supply Chain Network under Demand Uncertainty. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21, 2075-2080

Chen, C.L., Yuan, T.Y. & Lee, W.C. (2007). Multi-criteria fuzzy optimization for locating warehouses and distribution centers in a supply chain network. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 38, 393-407

Chiang, W.C., Russell, R., Xu, X. & Zepeda, D. (2009). A simulation-metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems. *International Journal of Production Economics*, 121, 752-767

Genin, P., Lamouri, S. & Thomas, A. (2008). Multi-facilities tactical planning robustness with experimental design. *Production Planning & Control*, 19, 171-182

Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). *Introduction to Logistics Systems Planning and Control*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.

Goetschalckx, M., & Cordova, G. (2004). A methodology for the strategic design of robust global supply chains. *IIE Annual Conference and Exhibition*. 1303-1308

Gupta, A., Maranas, C.D., & McDonald, C.M. (2000). Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management. *Computers & Chemical Engineering*, 24, 2613-2621

Gupta, A., & Maranas, C.D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 1219-1227

Gutiérrez, G. J., Kouvelis, P., & Kurawarwala, A. A. (1996). A robustness approach to uncapacitated network design problems. *European Journal of Operational Research*, 94, 362-376

Jung, J.Y., Blau, G., Pekny, J.F., Reklaitis, G.V., & Eversdyk, D. (2004). A simulation based optimization approach to supply chain management under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 2087-2106

Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203, 283-293

Komoto, H., Tomiyama, T., Silvester, S. & Brezet, H. (2009). Analyzing supply chain robustness for OEMs from a life cycle perspective using life cycle simulation. *International Journal of Production Economics*. In press

Li, X., & Marlin, T. E. (2009). Robust supply chain performance via Model Predictive Control. *Computers & Chemical Engineering*, 33, 2134-2143

List, G.F., Wood, B., Nozick, L.K., Turnquist, M.A., Jones, D.A., Kjeldgaard, E.A. & Lawton, C.R. (2003). Robust optimization for fleet planning under uncertainty. *Transportation Research Part E*, 39, 209-227

Melo, M.T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401-412

Min, H., & Zhou, G.G. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 231-249

Mula, J., Peidro, D., Diaz-Madronero, M., & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204, 377-390

Mulvey, J.M., Vanderbei, R.J., & Zenios, S.A. (1995). Robust Optimization of Large-Scale Systems. *Operations Research*, 43, 264-281

Pan, F. & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research*, 37, 668-683

Peidro, D., Mula, J., & Poler, R. (2009). Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 400-420

Pishvae, M.S., Rabbani, M. & Torabi, S.A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 637-649

Sabri, E.H., & Beamon, B.M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega-International Journal of Management Science*, 28, 581-598

Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167, 96-115

Sungur, I., Ordoñez, F., & Dessouky, M. (2008). A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty. *IIE Transactions*, 40, 509-523

Van Landeghem, H. & Vanmaele, H. (2002). Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. *Journal Of Operations Management*, 20, 769-783

Yang, T., Wen, Y.F. & Wang, F.F. (2009). Evaluation of robustness of supply chain information-sharing strategies using a hybrid Taguchi and multiple criteria decision-making method. *International Journal of Production Economics*. *In press*

Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64, 385-397

ANEXO A
TABLAS DE RESULTADOS DE LA ETAPA 4

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	99,54	98,23	97,02	95,89	94,84	93,86	92,57	91,43	90,12	88,88	87,72	86,62	85,32	84,60	83,66	82,77	81,93	81,10	79,91
CTOTAL	615,0	678,8	710,1	772,7	835,2	897,8	960,3	1022,9	1101,6	1228,9	1316,5	1404,2	1491,8	1579,5	1680,4	1805,0	1892,8	1980,6	2068,4	2157,5	2270,0
CSP	615,0	678,8	692,1	700,7	709,2	717,8	726,3	734,9	741,6	799,9	806,5	813,2	819,8	826,5	831,4	890,0	896,8	903,6	910,4	917,0	920,0
φ_1	5,0	6,8	7,8	8,2	10,0	9,0	9,4	9,8	10,0	11,2	12,0	12,8	13,6	14,4	15,0	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,9	9,3	9,4	9,1	9,7	9,8	9,9	10,0	10,4	10,7	10,9	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,5	12,8	13,1	13,3
φ_3 en el per. 3	12,5	13,4	13,9	14,1	15,0	14,5	14,7	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,5	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,0	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,0	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A1. Resultados al fijar el conjunto de estructuras A

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	99,17	100,00	99,08	97,20	95,50	93,84	92,33	90,92	89,48	86,93	86,05	84,48	83,00	81,61	80,29	79,04	77,85	76,73	75,66	74,61	73,21
CTOTAL	619,0	658,0	705,8	790,2	874,6	959,0	1043,4	1127,8	1217,6	1361,4	1486,5	1596,2	1705,8	1815,5	1925,1	2034,8	2144,4	2254,1	2363,7	2474,7	2609,0
CSP	589,0	658,0	669,8	676,2	682,6	689,0	695,4	701,8	707,6	707,4	766,5	771,2	775,8	780,5	785,1	789,8	794,4	799,1	803,7	808,2	809,0
φ_1	5,0	8,8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,5	12,5	13,4	14,4	15,3	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
φ_3 en el per. 1	11,5	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
φ_3 en el per. 3	12,5	14,4	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,0	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,0	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
φ_4 en el per. 3	5,2	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,0	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A2. Resultados al fijar el conjunto de estructuras B

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	99,17	100,00	99,08	97,20	95,50	93,84	92,33	90,92	89,48	86,93	86,05	84,48	83,00	81,61	80,29	79,04	77,85	76,73	75,66	74,61	73,21
CTOTAL	618,0	658,0	705,8	790,2	874,6	959,0	1043,4	1127,8	1217,6	1361,4	1486,5	1596,2	1705,8	1815,5	1925,1	2034,8	2144,4	2254,1	2363,7	2474,7	2609,0
CSP	588,0	658,0	669,8	676,2	682,6	689,0	695,4	701,8	707,6	707,4	766,5	771,2	775,8	780,5	785,1	789,8	794,4	799,1	803,7	808,2	809,0
φ_1	5,0	8,8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,5	12,5	13,4	14,4	15,3	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
φ_3 en el per. 1	11,5	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
φ_3 en el per. 3	12,5	14,4	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,0	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,0	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
φ_4 en el per. 3	5,2	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,0	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A3. Resultados al fijar el conjunto de estructuras C

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,26	92,80	91,73	90,72	89,75	88,83	87,95
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1534,8	1618,4	1701,9	1785,5	1869,0
CSP	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1030,8	1037,9	1044,9	1052,0	1059,0
φ_1	5,0	6,8	8,1	10,0	10,0	10,0	13,3	15,0	15,0	20,0	22,5	23,3	24,0	24,8	20,0	26,3	27,0	27,8	28,5	29,3	30,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,9	9,4	9,6	10,0	10,0	11,1	11,4	11,7	11,0	10,7	10,9	11,2	11,5	13,3	12,0	12,1	12,1	12,2	12,3	12,3
φ_3 en el per. 3	8,3	8,9	9,4	10,0	10,0	10,0	11,1	11,7	11,7	13,3	14,2	14,4	14,7	14,9	13,3	15,4	15,7	15,9	16,2	16,4	16,7
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,5	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A4. Resultados al fijar el conjunto de estructuras D

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,26	92,80	92,03	91,29	90,60	89,92	89,29
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1518,6	1586,0	1653,3	1720,7	1788,0
CSP	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1032,6	1041,5	1050,3	1059,2	1068,0
φ_1	5,0	6,8	8,1	9,4	10,0	10,0	13,4	14,6	15,0	21,8	22,5	23,3	24,0	24,8	20,0	26,3	27,0	27,8	28,5	29,3	30,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	12,5	13,4	14,1	14,7	15,0	15,0	16,6	17,3	17,5	15,6	16,0	16,4	16,8	17,2	20,0	18,0	18,4	18,8	19,2	19,6	20,0
φ_3 en el per. 3	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	13,9	14,2	14,4	14,7	14,9	13,3	15,4	15,7	15,9	16,2	16,4	16,7
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,0	4,1	4,3	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A5. Resultados al fijar el conjunto de estructuras E

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,80	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,30	92,80	92,03	91,29	90,59	89,92	89,29
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1518,6	1586,0	1653,3	1720,7	1788,0
CSP	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1032,6	1041,5	1050,3	1059,2	1068,0
φ_1	5,0	6,8	10,0	10,0	10,0	10,0	17,8	19,6	15,0	21,5	22,3	23,0	24,0	24,8	20,0	22,3	23,8	25,4	26,9	28,5	30,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,9	8,7	9,6	10,0	10,0	9,6	9,9	11,7	10,5	10,8	11,0	11,2	11,5	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
φ_3 en el per. 3	8,3	8,9	10,0	10,0	10,0	10,0	12,6	13,2	11,7	13,8	14,1	14,3	14,7	14,9	13,3	14,1	14,6	15,1	15,6	16,2	16,7
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,4	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,7	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A6. Resultados al fijar el conjunto de estructuras F

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,33	95,12	93,98	92,89	91,67	90,16	89,97	89,09	88,25	87,46
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1133,2	1212,7	1292,2	1371,7	1461,6	1569,7	1660,2	1739,7	1819,2	1898,7
CSP	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,2	945,7	953,2	960,7	966,6	969,7	1033,2	1040,7	1048,2	1055,7
φ_1	5,0	8,1	8,1	10,0	10,0	10,0	13,3	14,6	15,0	16,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	25,0	27,8	28,5	29,3	30,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	13,6	14,3	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,5	9,4	9,1	9,8	10,0	11,1	11,5	11,7	12,2	11,5	12,0	12,4	12,7	13,1	13,3	11,7	11,6	11,7	11,9	12,0
φ_3 en el per. 3	8,3	9,4	9,4	10,0	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	12,2	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	15,0	15,9	16,2	16,4	16,7
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,6	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2
φ_4 en el per. 3	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,1	9,2	9,1	9,6	9,7	9,9	10,0
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A7. Resultados al fijar el conjunto de estructuras G

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,34	96,71	96,00	96,37	95,78	95,08	94,70	94,20	92,92	91,52
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1040,9	1137,3	1195,3	1247,5	1299,7	1359,7	1454,1	1506,3	1604,0	1712,1
CSP	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,4	957,3	1025,8	1037,5	1049,2	1059,7	1122,6	1134,3	1139,0	1142,1
φ_1	5,0	8,8	9,8	8,7	10,0	10,0	13,4	14,6	15,0	23,2	25,0	25,0	25,0	30,0	30,0	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0	35,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	13,6	14,3	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,3	8,8	9,6	9,8	10,0	11,1	11,5	11,7	10,4	10,7	11,5	11,7	11,3	12,0	12,7	13,3	12,5	13,2	13,3	13,3
φ_3 en el per. 3	8,3	9,6	9,9	9,6	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	14,4	15,0	15,0	15,0	16,7	16,7	16,7	16,7	18,3	18,3	18,3	18,3
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,4	6,6	6,6	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2
φ_4 en el per. 3	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	7,8	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	9,9	9,9
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A8. Resultados al fijar el conjunto de estructuras H

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	96,71	97,04	96,42	95,83	95,08	94,75	94,24	92,92	91,52
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	738,0	754,6	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1039,6	1137,2	1192,6	1244,8	1297,0	1359,6	1451,4	1503,6	1603,9	1712,0
CSP	640,0	703,8	719,5	738,0	754,6	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	957,2	1026,1	1037,8	1049,5	1059,6	1122,9	1134,6	1138,9	1142,0
φ_1	5,0	8,8	9,8	8,7	10,0	10,0	13,9	15,0	15,0	20,0	20,0	25,0	25,0	24,0	26,1	28,3	30,0	32,6	34,7	35,0	35,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	13,5	14,2	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	12,5	12,4	13,2	14,4	14,8	15,0	16,4	17,1	17,5	17,2	18,5	17,3	17,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
φ_3 en el per. 3	8,3	9,6	9,9	9,6	10,0	10,0	11,3	11,7	11,7	13,3	13,3	15,0	15,0	14,7	15,4	16,1	16,7	17,5	18,2	18,3	18,3
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,3	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,2	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	7,0	7,1	7,1	7,2
φ_4 en el per. 3	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	7,8	8,4	8,7	9,0	9,2	9,6	9,9	9,9	9,8
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A9. Resultados al fijar el conjunto de estructuras I

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	97,92	97,50	97,10	96,72	96,36	95,92	94,38	92,92	91,52
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	956,5	999,5	1039,6	1129,6	1169,7	1209,7	1249,8	1339,8	1385,1	1492,7	1600,4	1708,0
CSP	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	1015,6	1028,7	1041,7	1054,8	1117,8	1130,1	1132,7	1135,4	1138,0
φ_1	5,0	6,8	8,1	9,4	10,0	10,0	14,0	14,6	15,0	23,2	22,0	24,6	28,6	30,0	30,0	30,0	32,6	35,0	35,0	35,0	35,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	10,9	11,5	11,7	10,4	11,7	11,7	11,2	11,6	12,5	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
φ_3 en el per. 3	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	11,3	11,5	11,7	14,4	14,0	14,9	16,2	16,7	16,7	16,7	17,5	18,3	18,3	18,3	18,3
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
φ_4 en el per. 3	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,4	9,3	9,2
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A10. Resultados al fijar el conjunto de estructuras J

VARIABLE DE SALIDA	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
π	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
Γ (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	97,92	97,50	97,10	96,72	96,36	95,92	94,38	92,92	91,52
CTOTAL	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1039,6	1129,6	1169,7	1209,7	1249,8	1339,8	1385,1	1492,7	1600,4	1708,0
CSP	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	1015,6	1028,7	1041,7	1054,8	1117,8	1130,1	1132,7	1135,4	1138,0
φ_1	5,0	6,8	10,0	10,0	10,0	10,0	13,3	15,0	15,0	19,4	22,0	19,8	22,2	30,0	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
φ_3 en el per. 1	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
φ_3 en el per. 2	12,5	13,4	13,1	14,4	15,0	15,0	16,7	17,1	17,5	17,5	17,5	19,9	20,0	17,4	18,7	20,0	18,8	20,0	20,0	20,0	20,0
φ_3 en el per. 3	8,3	8,9	10,0	10,0	10,0	10,0	11,1	11,7	11,7	13,1	14,0	13,3	14,1	16,7	16,7	16,7	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3
φ_3 en el per. 4	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,2	18,6	19,1	19,6	20,1	20,5
φ_3 en el per. 5	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,7	18,0	18,4	18,8	19,2	19,5
φ_4 en el per. 1	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
φ_4 en el per. 2	4,0	4,1	4,3	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7
φ_4 en el per. 3	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,4	9,3	9,2
φ_4 en el per. 4	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
φ_4 en el per. 5	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A11. Resultados al fijar el conjunto de estructuras K

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	615,0	678,8	710,1	772,7	835,2	897,8	960,3	1022,9	1101,6	1228,9	1316,5	1404,2	1491,8	1579,5	1680,4	1805,0	1892,8	1980,6	2068,4	2157,5	2270,0
B	619,0	658,0	705,8	790,2	874,6	959,0	1043,4	1127,8	1217,6	1361,4	1486,5	1596,2	1705,8	1815,5	1925,1	2034,8	2144,4	2254,1	2363,7	2474,7	2609,0
C	618,0	658,0	705,8	790,2	874,6	959,0	1043,4	1127,8	1217,6	1361,4	1486,5	1596,2	1705,8	1815,5	1925,1	2034,8	2144,4	2254,1	2363,7	2474,7	2609,0
D	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1534,8	1618,4	1701,9	1785,5	1869,0
E	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1518,6	1586,0	1653,3	1720,7	1788,0
F	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1131,9	1199,2	1266,6	1352,1	1451,3	1518,6	1586,0	1653,3	1720,7	1788,0
G	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	810,8	832,5	848,3	916,2	997,2	1064,5	1133,2	1212,7	1292,2	1371,7	1461,6	1569,7	1660,2	1739,7	1819,2	1898,7
H	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1040,9	1137,3	1195,3	1247,5	1299,7	1359,7	1454,1	1506,3	1604,0	1712,1
I	640,0	703,8	719,5	738,0	754,6	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1039,6	1137,2	1192,6	1244,8	1297,0	1359,6	1451,4	1503,6	1603,9	1712,0
J	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	956,5	999,5	1039,6	1129,6	1169,7	1209,7	1249,8	1339,8	1385,1	1492,7	1600,4	1708,0
K	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	810,8	832,5	848,3	916,2	959,5	999,5	1039,6	1129,6	1169,7	1209,7	1249,8	1339,8	1385,1	1492,7	1600,4	1708,0

Tabla A12. Resultados para el costo total (CTOTAL)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	615,0	678,8	692,1	700,7	709,2	717,8	726,3	734,9	741,6	799,9	806,5	813,2	819,8	826,5	831,4	890,0	896,8	903,6	910,4	917,0	920,0
B	589,0	658,0	669,8	676,2	682,6	689,0	695,4	701,8	707,6	707,4	766,5	771,2	775,8	780,5	785,1	789,8	794,4	799,1	803,7	808,2	809,0
C	589,0	658,0	669,8	676,2	682,6	689,0	695,4	701,8	707,6	707,4	766,5	771,2	775,8	780,5	785,1	789,8	794,4	799,1	803,7	808,2	809,0
D	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1030,8	1037,9	1044,9	1052,0	1059,0
E	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1032,6	1041,5	1050,3	1059,2	1068,0
F	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,4	947,2	956,1	962,1	1023,8	1032,6	1041,5	1050,3	1059,2	1068,0
G	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	765,8	832,5	848,3	856,2	920,7	929,5	938,2	945,7	953,2	960,7	966,6	969,7	1033,2	1040,7	1048,2	1055,7
H	640,0	703,8	719,5	738,2	754,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,4	957,3	1025,8	1037,5	1049,2	1059,7	1122,6	1134,3	1139,0	1142,1
I	640,0	703,8	719,5	738,0	754,6	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	957,2	1026,1	1037,8	1049,5	1059,6	1122,9	1134,6	1138,9	1142,0
J	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	1015,6	1028,7	1041,7	1054,8	1117,8	1130,1	1132,7	1135,4	1138,0
K	640,0	703,8	719,5	735,3	753,8	765,8	832,5	848,3	856,2	926,5	939,5	952,6	1015,6	1028,7	1041,7	1054,8	1117,8	1130,1	1132,7	1135,4	1138,0

Tabla A13. Resultados para el costo sin penalización (CSP)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	100,00	100,00	99,54	98,23	97,02	95,89	94,84	93,86	92,57	91,43	90,12	88,88	87,72	86,62	85,32	84,60	83,66	82,77	81,93	81,10	79,91
B	99,17	100,00	99,08	97,20	95,50	93,84	92,33	90,92	89,48	86,93	86,05	84,48	83,00	81,61	80,29	79,04	77,85	76,73	75,66	74,61	73,21
C	99,17	100,00	99,08	97,20	95,50	93,84	92,33	90,92	89,48	86,93	86,05	84,48	83,00	81,61	80,29	79,04	77,85	76,73	75,66	74,61	73,21
D	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,26	92,80	91,73	90,72	89,75	88,83	87,95
E	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,26	92,80	92,03	91,29	90,60	89,92	89,29
F	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,80	98,47	97,38	96,36	95,40	94,48	93,30	92,80	92,03	91,29	90,59	89,92	89,29
G	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	98,47	97,38	96,33	95,12	93,98	92,89	91,67	90,16	89,97	89,09	88,25	87,46
H	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,34	96,71	96,00	96,37	95,78	95,08	94,70	94,20	92,92	91,52
I	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	96,71	97,04	96,42	95,83	95,08	94,75	94,24	92,92	91,52
J	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	97,92	97,50	97,10	96,72	96,36	95,92	94,38	92,92	91,52
K	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,97	100,00	100,00	98,76	99,34	98,84	98,36	97,92	97,50	97,10	96,72	96,36	95,92	94,38	92,92	91,52

Tabla A14. Resultados para el porcentaje de demanda total satisfecha (Γ)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	5,0	6,8	7,8	8,2	10,0	9,0	9,4	9,8	10,0	11,2	12,0	12,8	13,6	14,4	15,0	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
B	5,0	8,8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,5	12,5	13,4	14,4	15,3	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
C	5,0	8,8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,5	12,5	13,4	14,4	15,3	16,3	17,2	18,2	19,1	20,0	20,0
D	5,0	6,8	8,1	10,0	10,0	10,0	13,3	15,0	15,0	20,0	22,5	23,3	24,0	24,8	20,0	26,3	27,0	27,8	28,5	29,3	30,0
E	5,0	6,8	8,1	9,4	10,0	10,0	13,4	14,6	15,0	21,8	22,5	23,3	24,0	24,8	20,0	26,3	27,0	27,8	28,5	29,3	30,0
F	5,0	6,8	10,0	10,0	10,0	10,0	17,8	19,6	15,0	21,5	22,3	23,0	24,0	24,8	20,0	22,3	23,8	25,4	26,9	28,5	30,0
G	5,0	8,1	8,1	10,0	10,0	10,0	13,3	14,6	15,0	16,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	25,0	27,8	28,5	29,3	30,0
H	5,0	8,8	9,8	8,7	10,0	10,0	13,4	14,6	15,0	23,2	25,0	25,0	25,0	30,0	30,0	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0	35,0
I	5,0	8,8	9,8	8,7	10,0	10,0	13,9	15,0	15,0	20,0	20,0	25,0	25,0	24,0	26,1	28,3	30,0	32,6	34,7	35,0	35,0
J	5,0	6,8	8,1	9,4	10,0	10,0	14,0	14,6	15,0	23,2	22,0	24,6	28,6	30,0	30,0	30,0	32,6	35,0	35,0	35,0	35,0
K	5,0	6,8	10,0	10,0	10,0	10,0	13,3	15,0	15,0	19,4	22,0	19,8	22,2	30,0	30,0	30,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0

Tabla A15. Resultados para la expansión total de la capacidad (φ_1)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	12,0	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
B	11,5	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
C	11,5	12,0	12,4	12,9	13,3	13,8	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
D	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
E	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
F	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
G	12,0	12,0	12,4	13,6	14,3	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
H	12,0	12,0	12,4	13,6	14,3	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
I	12,0	12,0	12,4	13,5	14,2	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
J	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
K	12,0	12,0	12,4	12,9	14,0	15,0	14,2	14,7	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0

Tabla A16. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 1)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	8,3	8,9	9,3	9,4	9,1	9,7	9,8	9,9	10,0	10,4	10,7	10,9	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,5	12,8	13,1	13,3
B	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
C	12,5	12,4	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
D	8,3	8,9	9,4	9,6	10,0	10,0	11,1	11,4	11,7	11,0	10,7	10,9	11,2	11,5	13,3	12,0	12,1	12,1	12,2	12,3	12,3
E	12,5	13,4	14,1	14,7	15,0	15,0	16,6	17,3	17,5	15,6	16,0	16,4	16,8	17,2	20,0	18,0	18,4	18,8	19,2	19,6	20,0
F	8,3	8,9	8,7	9,6	10,0	10,0	9,6	9,9	11,7	10,5	10,8	11,0	11,2	11,5	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
G	8,3	8,5	9,4	9,1	9,8	10,0	11,1	11,5	11,7	12,2	11,5	12,0	12,4	12,7	13,1	13,3	11,7	11,6	11,7	11,9	12,0
H	8,3	8,3	8,8	9,6	9,8	10,0	11,1	11,5	11,7	10,4	10,7	11,5	11,7	11,3	12,0	12,7	13,3	12,5	13,2	13,3	13,3
I	12,5	12,4	13,2	14,4	14,8	15,0	16,4	17,1	17,5	17,2	18,5	17,3	17,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
J	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	10,9	11,5	11,7	10,4	11,7	11,7	11,2	11,6	12,5	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3
K	12,5	13,4	13,1	14,4	15,0	15,0	16,7	17,1	17,5	17,5	17,5	19,9	20,0	17,4	18,7	20,0	18,8	20,0	20,0	20,0	20,0

Tabla A17. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 2)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	12,5	13,4	13,9	14,1	15,0	14,5	14,7	14,9	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
B	12,5	14,4	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
C	12,5	14,4	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
D	8,3	8,9	9,4	10,0	10,0	10,0	11,1	11,7	11,7	13,3	14,2	14,4	14,7	14,9	13,3	15,4	15,7	15,9	16,2	16,4	16,7
E	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	13,9	14,2	14,4	14,7	14,9	13,3	15,4	15,7	15,9	16,2	16,4	16,7
F	8,3	8,9	10,0	10,0	10,0	10,0	12,6	13,2	11,7	13,8	14,1	14,3	14,7	14,9	13,3	14,1	14,6	15,1	15,6	16,2	16,7
G	8,3	9,4	9,4	10,0	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	12,2	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	15,0	15,9	16,2	16,4	16,7
H	8,3	9,6	9,9	9,6	10,0	10,0	11,1	11,5	11,7	14,4	15,0	15,0	15,0	16,7	16,7	16,7	16,7	18,3	18,3	18,3	18,3
I	8,3	9,6	9,9	9,6	10,0	10,0	11,3	11,7	11,7	13,3	13,3	15,0	15,0	14,7	15,4	16,1	16,7	17,5	18,2	18,3	18,3
J	8,3	8,9	9,4	9,8	10,0	10,0	11,3	11,5	11,7	14,4	14,0	14,9	16,2	16,7	16,7	16,7	17,5	18,3	18,3	18,3	18,3
K	8,3	8,9	10,0	10,0	10,0	10,0	11,1	11,7	11,7	13,1	14,0	13,3	14,1	16,7	16,7	16,7	18,3	18,3	18,3	18,3	18,3

Tabla A18. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 3)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,5	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
B	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,0	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
C	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,0	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,0
D	11,0	11,5	12,0	12,5	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
E	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
F	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,4	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
G	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
H	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
I	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,3	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
J	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,1	18,6	19,1	19,6	20,0	20,5
K	11,0	11,5	12,0	12,4	12,9	13,4	13,9	14,3	14,8	15,3	15,8	16,2	16,7	17,2	17,7	18,2	18,6	19,1	19,6	20,1	20,5

Tabla A19. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 4)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
B	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,0	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
C	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,0	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
D	12,0	12,4	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
E	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
F	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,7	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
G	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
H	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
I	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,2	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
J	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,6	18,0	18,4	18,8	19,1	19,5
K	12,0	12,4	12,8	13,1	13,5	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,1	16,5	16,9	17,3	17,7	18,0	18,4	18,8	19,2	19,5

Tabla A20. Resultados para el promedio de envío PP-CD (φ_3 en el periodo 5)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
B	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
C	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
D	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
E	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
F	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
G	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
H	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
I	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
J	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
K	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,5	5,7	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

Tabla A21. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 1)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,0	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
B	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
C	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
D	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4
E	4,0	4,1	4,3	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7
F	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
G	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,6	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2
H	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,4	6,6	6,6	6,7	6,8	6,8	6,9	7,0	7,0	7,1	7,2
I	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9	6,9	7,0	7,1	7,1	7,2
J	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7	6,9	7,0	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8	8,0
K	4,0	4,1	4,3	4,4	4,5	4,7	4,8	4,9	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,7

Tabla A22. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 2)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
B	5,2	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
C	5,2	5,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
D	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
E	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
F	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,0	9,3	9,4	9,6	9,7	9,9	10,0
G	5,4	5,8	6,1	6,5	6,8	6,9	7,6	7,9	7,9	8,4	8,5	8,7	8,8	9,0	9,1	9,2	9,1	9,6	9,7	9,9	10,0
H	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	7,8	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,9	9,9	9,9
I	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	7,8	8,4	8,7	9,0	9,2	9,6	9,9	9,9	9,8
J	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,4	9,3	9,2
K	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	5,8	6,3	6,6	6,6	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7	9,0	9,3	9,6	9,4	9,3	9,2

Tabla A23. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 3)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,0	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
B	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
C	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,0
D	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
E	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
F	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
G	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
H	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
I	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
J	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2
K	4,4	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2

Tabla A24. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 4)

CONJUNTO DE ESTRUCTURAS	PARÁMETRO δ																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7	7,9	8,1	8,3	8,5	8,8	9,0
A	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
B	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,0	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
C	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,0	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
D	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
E	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
F	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
G	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
H	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
I	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
J	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8
K	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,6	5,7	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,4	7,5	7,7	7,8

Tabla A25. Resultados para el promedio de envío CD-CC (φ_4 en el periodo 5)