

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

**Modelo de optimización para la selección de estrategias en la Gestión de Riesgos de la
Cadena de Suministros**

Tatiana Andrea Castillo Jaimes

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

Director:

Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

M.Sc. en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2017

DEDICATORIA

A Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de estos años, por haber puesto en mi camino a las personas correctas aun cuando yo me empeñaré en tropezarme con las equivocadas, por darme la fuerza para seguir adelante en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad.

A mis padres, Saúl y Yolanda, por entenderme y apoyarme. Especialmente a ella, mi madre, quien, a pesar de los tropiezos, las decepciones y los altibajos que nos presenta la vida, siempre me ha brindado lo mejor de sí. Y, aunque casi nunca se lo digo: la amo.

A mi hermano, Jorge Saúl, porque a pesar de nuestras diferencias ha sido una voz de apoyo cuando lo he necesitado. Deseo que él también encuentre el camino.

A Román Alberto, por ser parte importante en mi vida y yo de la suya. Porque a pesar de no estar juntos, siempre ha sido mi amigo; no olvidaré su paciencia para conmigo y su amor incondicional. Su apoyo en todo momento, sobre todo en los malos, no me ha dado tregua a desfallecer; porque gracias a su insistencia empecé este camino del que me he enamorado y deseo continuar. Porque este logro es tan mío como suyo.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Carlos, por su amistad y su apoyo; por confiar y creer en mí a pesar de mis debilidades. Pero, sobre todo, por su calidez humana y su enseñanza a través del ejemplo, la alegría y la verraquera.

Al profesor Henry, por sus sabios consejos.

A mis amigos y compañeros, por compartir un pedacito de vida conmigo.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	12
1. Revisión de Literatura.....	16
1.1. Gestión de Riesgos de la Cadena de Suministros	16
1.1.1. Identificación.....	17
1.1.2. Evaluación.....	18
1.1.3. Mitigación, control y/o gestión.	18
1.2. Modelos de Optimización para la selección de estrategias en la Gestión de Riesgos de la Cadena de Suministros.....	19
1.3. Las redes bayesianas y los riesgos en las cadenas de suministro	23
1.4. Red Bayesiana.....	25
2. Modelo matemático en la selección de estrategias	28
2.1. Modelo de optimización	28
2.2. Perfil de riesgo	30
2.3. Generación de instancias de prueba	31
2.4. Generación de los escenarios de simulación.....	35
3. Resultados Obtenidos.....	37
3.1. Modelo de optimización	37
3.2. Simulación	40
Conclusiones	45
Futuras Investigaciones.....	48
Referencias Bibliográficas	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grafo dirigido	27
Figura 2. Grafo acíclico dirigido de 4 nodos	27
Figura 3. Red de la cadena de suministro	33
Figura 4. Riesgos modelados como una red bayesiana.....	33
Figura 5. Intervalos de confianza para la media del Costo para cada escenario ($\alpha = 0.05$)	41
Figura 6. Intervalos de confianza para la media del Costo en los 2 escenarios ($\alpha = 0.05$).....	42
Figura 7. Efectos principales para el Costo obtenido por simulación.....	43
Figura 8. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias pequeñas	63
Figura 9. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias medianas.....	65
Figura 10. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias grandes	65
Figura 11. Efectos principales para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando este es optimizado.....	72
Figura 12. Interacción de los efectos para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando este es optimizado	73
Figura 13. Efectos principales para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando el perfil es optimizado.....	73
Figura 14. Interacción de los efectos para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando el perfil es optimizado	73
Figura 15. Efectos principales para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando la relación beneficio/costo es optimizado.....	74

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Figura 16. Interacción de los efectos para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando la relación beneficio/costo es optimizado.....	74
Figura 17. Efectos principales para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando esta es optimizada.....	75
Figura 18. Interacción de los efectos para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando esta es optimizada.....	75
Figura 19. Hojas de un libro de datos para cada instancia.....	78
Figura 20. Hojas de un libro de datos para cada escenario de simulación.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción modelos matemáticos	21
Tabla 2. Anova para los tres enfoques: Costo vs Escenarios; Enfoques	41
Tabla 3. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes): Costo vs Escenarios; Enfoques ..	41
Tabla 4. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes) con presupuesto bajo: Costo vs Escenarios; Enfoques	44
Tabla 5. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes) con presupuesto alto: Costo vs Escenarios; Enfoques	44
Tabla 6. Descripción de las Instancias de prueba	61
Tabla 7. Probabilidad total de los riesgos	68
Tabla 8. Soluciones de Pareto del modelo de optimización	70
Tabla 9. Valor de los objetivos en cada solución de Pareto.....	71
Tabla 10. Promedios resultados de las simulaciones	76

RESUMEN

TITULO: MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN LA GESTIÓN DE RIESGOS DE LA CADENA DE SUMINISTROS*

AUTOR: TATIANA ANDREA CATILLO JAIMES†

PALABRAS CLAVE: GESTIÓN DE RIESGOS EN LA CADENA DE SUMINISTRO, SCRM, OPTIMIZACIÓN, REDES BAYESIANAS, MODELOS MATEMÁTICOS, GESTIÓN DE RIESGOS, GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO, ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

El aumento de la globalización en los últimos años, los diversos eventos que han ocurrido recientemente (ataques terroristas, catástrofes naturales, crisis económicas, incendios, etc.) y las acciones tendientes a aumentar la productividad, han causado que la vulnerabilidad de las cadenas de suministro, ante imprevistos, aumente considerablemente. Para tratar de contrarrestar y reducir dicha situación ha surgido la Gestión de Riesgos en la Cadena de Suministro (SCRM – *Supply Chain Risk Management*) como un proceso que permite evaluar la situación actual del negocio e implementar actividades y/o estrategias que permitan aumentar la resiliencia de la cadena. Sin embargo, dada la misma incertidumbre que gobierna las actividades entorno a la Cadena de Suministro (SC – *Supply Chain*), evaluar el resultado que conllevaría la implementación de dichas estrategias y del mismo proceso SCRM es difícil y en ocasiones recae sobre los gerentes o un grupo de expertos; donde adicionalmente, toda acción adicional que se realice sobre el estado actual de una cadena requiere inversión de capital. Diversas investigaciones han mencionado las ventajas de modelar los riesgos de la SC por medio de redes bayesianas (BN – *Bayesian Networks*) como método para capturar fiablemente la realidad, sin embargo, son pocas las que han incursionado en esta línea y ninguna ha contrastado sus diferencias al considerar los eventos de forma independiente. Esta investigación buscó la forma de modelar práctica y cuantitativamente los riesgos, la posible relación existente entre ellos para posteriormente seleccionar las estrategias óptimas que conlleven a su mitigación. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos con la presunción de independencia existente entre los eventos.

* Trabajo de Investigación.

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez, Magister en Ingeniería Industrial.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZATION MODEL FOR THE SELECTION OF STRATEGIES IN THE SUPPLY CHAIN RISK MANAGEMENT*

AUTHOR: TATIANA ANDREA CATILLO JAIMES†

KEYWORDS: SUPPLY CHAIN RISK MANAGEMENT, SCRM, BAYESIAN NETWORKS, OPTIMIZATION, MATHEMATICAL MODELS, RISK MANAGEMENT, SUPPLY CHAIN MANAGEMENT, MITIGATION STRATEGIES.

DESCRIPTION:

The rise of globalization in recent years, the various events that have occurred recently (terrorist attacks, natural catastrophes, economic crisis, fires, etc.) and actions to increase productivity have greatly increased the vulnerability of supply chains to unforeseen. In order to counteract and reduce this situation, Supply Chain Risk Management (SCRM) has emerged as a process to evaluate the current situation of the business and implement activities and / or strategies to increase resilience of the chain. However, given the same uncertainty that governs activities around the Supply Chain (SC), evaluating the outcome of the implementation of these strategies and the SCRM process itself is difficult and sometimes falls on managers or panel of experts. Additionally, in this situation any further action on the current state of a chain requires capital investment. Several investigations have mentioned the advantages of modeling SC's risks through Bayesian networks (BN) as a method as reliably capture reality. However, few of them have ventured into this line and none has contrasted their differences when considering the independent events. This research looked at how to practically and quantitatively model the risks through BN, the possible relationship between them and then select the optimal strategies that lead to their mitigation. Finally, we compare the results obtained with the presumption of independence between events.

* Research paper

† Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Advisor: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez, Magister of Industrial Engineering.

Introducción

La Gestión de la Cadena de Suministro (*Supply Chain Management – SCM*) ha sido una de las filosofías de gestión más importantes desde 1982. Aunque la logística es el principal componente de cada cadena de suministro (*Supply Chain – SC*), SCM difiere de esta al requerir un enfoque integrado y coordinado para gestionar los flujos de material, información y dinero en entornos competitivos (Asgari, Nikbakhsh, Hill y Zanjirani, 2016).

Terremotos, huelgas, atentados terroristas, crisis económicas, devaluación de la moneda, entre otros eventos, han interrumpido las operaciones de la cadena de suministro en varias ocasiones en los últimos años. Estas interrupciones unidas al aumento de la subcontratación, la creciente variedad de productos y la globalización han hecho que las cadenas de suministro se vuelvan más complejas y por lo tanto más vulnerables. Esto ha dificultado una gestión eficiente de las SCs e impactado el rendimiento de las organizaciones.

La Gestión de Riesgos en la Cadena de Suministro (*Supply Chain Risk Management – SCRM*) se muestra como un área de fuerte crecimiento (Asgari et al., 2016 y Fahimnia, Tang, Davarzani y Sarkis, 2015) dentro de SCM. SCRM tiene como fin controlar y mitigar los efectos negativos causados por estos y otros eventos valiéndose de la utilización de métodos y herramientas cualitativas y cuantitativas que permitan ayudar a decidir qué riesgos gestionar y, en donde es necesaria la ideación de estrategias que conlleven a su mitigación. Adicionalmente, se ha encontrado que, en su mayoría, estos riesgos son causados por el crecimiento de las SCs a nivel

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

mundial donde oferta y demanda han venido aumentando al igual que el nivel de incertidumbre en sus operaciones (Yang y Yang, 2010; Simangunsong, Hendry, y Stevenson, 2012; Hosseini et al., 2014).

La gestión de riesgos dentro de las organizaciones no es un fenómeno nuevo (Ghadge y Dani, 2012; Colicchia y Strozzi, 2012 y; Monroe, Teets y Martin, 2014). Sin embargo, se cree que esta se enfocó e impulsó sólo después de los ataques del 11 de septiembre en los EEUU, tuvo un crecimiento significativo debido al brote de SARS en Asia en 2003 y al Huracán Katrina en 2005 (Wagner y Bode, 2006) que unidos a la amplia gama de otros acontecimientos que ocurrieron alrededor del mundo en fechas cercanas y causaron una disminución en la eficiencia de algunas organizaciones. Adicionalmente, de acuerdo a lo hallado por Liu, Li y Wu (2014), las empresas que sufrieron riesgos en la cadena de suministro experimentaron una baja entre un 33 y un 40% en los rendimientos de sus acciones con respecto a otras marcas de la misma industria.

En otras palabras, a medida que el mundo se vuelve más desordenado y turbulento, la gestión de riesgos irá desempeñando un papel más importante (Fahimnia et al., 2015; Ghadge y Dani, 2012), que según Fawcett, Wallin, Allred, Fawcett, y Magnan (2011) apoya tanto el diseño de la red de la cadena de suministro global y operativa. Por lo tanto, comprender los factores que pueden crear incertidumbre y cómo mitigar de forma eficiente el riesgo es un desafío continuo a medida que cambian los entornos empresariales (Liberatore, Pizarro, Simon de Blas, Ortuño y Vitoriano, 2013; Farahani, Rezapour, Drezner y Fallah, 2014; Hasani, Zegordi y Nikbakhsh, 2015). En consecuencia, las organizaciones buscan continuamente maneras de mejorar su desempeño bajo incertidumbre (Hill, Doran y Stratton, 2012). Sin embargo, Black y Ray (2011) encontró que sólo

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

el 10 por ciento de las empresas tienen planes detallados para hacer frente a los riesgos en la cadena de suministro.

La SCRM se presenta como un proceso en el que la Gestión o Mitigación es la última gran etapa. En esta fase se busca definir un conjunto de estrategias que encaminen a la reducción de los riesgos hallados y evaluados en las etapas predecesoras y, de acuerdo a los criterios establecidos por la cadena de suministro, seleccionar aquellas estrategias que más se adecuen a sus objetivos haciendo más resiliente a la cadena.

Sin embargo, la implementación de estrategias de mitigación requiere de la inversión de capital ya que es una acción atenuante que se realiza antes de la ocurrencia del evento. Esto hace que muchas organizaciones se muestren prevenidas ante la implementación de forma proactiva de un proceso de gestión de riesgo (Colicchia y Strozzi, 2012).

Dada la importancia de la fase de Gestión dentro de SCRM, así como esta misma, el presente proyecto de investigación se centra en diseñar un modelo de optimización como herramienta para la selección de estrategias de mitigación en SCRM tomando como base los modelos presentados hasta el momento e incluyendo aspectos aún no involucrados en este tipo de modelos, cómo la evaluación beneficio-costos y la captura de las interdependencias de los riesgos dentro del cálculo de los parámetros de entrada del modelo. Para dar cumplimiento al objeto de la investigación se propone seguir una metodología cuantitativa propia de los proyectos en Investigación de Operaciones presentada por Hiller y Lieberman (2010) que ha sido adaptada a las necesidades del mismo. Se realiza una revisión de literatura de los modelos de optimización propuestos, así como

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

de la teoría y uso de redes bayesianas para modelar la relación de los riesgos en las SCs. Se formula el modelo matemático y se crean instancias bajo distintos escenarios para probar el modelo y verificar su eficiencia en la SCM. Ayudados de la simulación se evalúan los escenarios y los resultados arrojados por el modelo con el fin de observar el mejoramiento del desempeño de la cadena a través de la disminución del impacto esperado de los riesgos.

El presente documento está organizado de la siguiente forma: en el capítulo 1 se expone la revisión de literatura que soporta la investigación realizada; en el capítulo 2 se plantea el modelo matemático para la solución del problema, se definen los criterios de creación de las instancias de prueba y los escenarios de simulación para posteriormente en el capítulo 3 analizar y discutir los resultados obtenidos. En el capítulo 4 se presentan las conclusiones para posteriormente dar algunas recomendaciones y sugerir futuras investigaciones; finalmente se detalla la bibliografía consultada a lo largo de la investigación.

1. Revisión de Literatura

La revisión de literatura que enmarca este trabajo de investigación orienta su atención en los artículos científicos publicados en torno a la Gestión de Riesgos de la Cadena de Suministros en los que posteriormente se realiza un análisis exhaustivo y minucioso de los modelos de optimización utilizados en la última fase del proceso y culmina realizando una recopilación de información acerca del modelamiento de los riesgos por medio del uso de redes bayesianas.

1.1. Gestión de Riesgos de la Cadena de Suministros

Actualmente en la literatura académica no existe una definición unánime, universal y ampliamente aceptada de SCRM. La mayoría de los trabajos proponen definiciones que no se utilizan en otros artículos. Sin embargo, se observa que cada definición propuesta enmarca a SCRM como un conjunto de enfoques y prácticas para la identificación, evaluación, análisis y tratamiento de los riesgos en las cadenas de suministro para reducir su vulnerabilidad (Norrman y Jansson, 2004; Jüttner, Peck y Christopher, 2003; Ho, Zheng, Yildiz y Talluri, 2015; Manuj y Mentzer, 2008; Goh, Lim y Meng, 2007; Thun y Hoenig, 2011; Wieland, y Wallenburg, 2012; Kilubi, y Haasis, 2015; Kajuter, 2003; Christopher, Peck, Rutherford y Juttner, 2003). Otro hecho importante que aparece en la mayoría de las definiciones es la participación colaborativa y coordinada entre los miembros de las cadenas (Norrman y Jansson, 2004; Jüttner et al., 2003; Ho et al., 2015; ; Manuj y Mentzer, 2008; Goh et al., 2007; Kajuter, 2003; Christopher et al., 2003; Brindley, 2004; Lavastre, Gunasekaran y Spalanzani, 2012; Giunipero y Eltantawy, 2004; Mahapatra, Narasimhan

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM y Barbieri, 2010; Tang, 2006), haciendo hincapié en la idea de que la competencia se produce entre cadenas, y no a nivel de empresas individuales. Es decir, la gestión de riesgos a lo largo de la cadena depende de la relación y la integración entre sus miembros. Finalmente, se entrevistó que SCRM puede ser concebido como un proceso (cíclico) de gestión del riesgo que identifica los riesgos, los evalúa y genera e implementa planes de mitigación y/o control de los mismos.

Por otro lado, Asgari et al. (2016) y Movahedipour, Yang, Zeng, Wu y Salam (2016) encuentran que las herramientas y técnicas de optimización y simulación son las más utilizadas y son consideradas absolutamente necesarias para alcanzar la efectividad en la SC y por ende son una buena opción a implementar en SCRM. La optimización soporta la toma de mejores decisiones dentro de una SC, mientras que la simulación se utiliza para evaluar los efectos de la incertidumbre y/o probar nuevas ideas para la gestión de SC complejas. Además, las técnicas de optimización multiobjetivo han tomado fuerza en los últimos años ya que permiten equilibrar mejor el impacto de objetivos y decisiones conflictivas dentro de una SC.

1.1.1. Identificación.

La identificación de riesgos es el primer paso del SCRM. Como su nombre lo indica, se trata de identificar los tipos de riesgo, los factores que los desencadenan o ambos. Se ha encontrado que algunos métodos utilizados para identificar potenciales riesgos en la SC han sido: Proceso Análisis Jerárquico – AHP (Tsai, Liao y Han, 2008; Gaudenzi y Borghesi, 2006), Mapa de vulnerabilidad de la cadena de suministro (Blos, Quaddus, Wee, Watanabe, 2009), Modelo conceptual (Trkman y McCormack, 2009) y Análisis Funcional de Peligros y Operatividad – HAZOP (Adhitya, Srinivasan y Karimi, 2009).

1.1.2. Evaluación.

La evaluación de riesgos es una fase intermedia antes de la escogencia e implantación de una estrategia. De acuerdo con Heckmann, Comes y Nickel (2015), esta etapa está estrechamente relacionada con los objetivos que se propone la cadena de suministro donde de acuerdo a lo expuesto anteriormente, la probabilidad de que ocurra un evento y el impacto de sus consecuencias son el eje central de esta etapa. Esto con el fin de poder categorizar y listar los diferentes riesgos de acuerdo a su importancia objetiva.

1.1.3. Mitigación, control y/o gestión.

La mitigación es la última gran etapa de SCRM. En esta fase lo que se pretende es definir un conjunto de estrategias que encaminen a la reducción de los riesgos hallados y evaluados en las secciones anteriores y, de acuerdo a los criterios establecidos por la cadena de suministro, seleccionar aquellas estrategias que más se adecuen a sus objetivos haciendo más resiliente a la cadena de suministros. Algunas de las opciones de las estrategias pueden llevar a aceptar, transferir, evitar o mitigar el riesgo.

Kleindorfer y Saad (2005) definen las estrategias de mitigación como aquellas en las que los miembros de la cadena realizan alguna acción con antelación a la ocurrencia del evento, por lo tanto, los socios incurren en el costo de la acción atenuante. Se ha establecido que esta es una de las razones por la que las organizaciones no implementan de forma proactiva un proceso de gestión de riesgo (Colicchia y Strozzi, 2012), donde la premisa "nadie se lleva el crédito para la solución de problemas que nunca ocurrieron" ha ido ganando más adeptos (Tang, 2006; Repenning y

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Sterman, 2001). Además, la incertidumbre que gobierna el proceso hace difícil llevar a cabo un análisis costo/beneficio o de rentabilidad de la inversión para justificar un plan de SCRM.

Sumado a lo anterior, Craighead, Blackhurst, Rungtusanatham y Handfield (2007) encontraron que la estructura de la cadena de suministro influye en la selección de las estrategias óptimas que mitiguen los riesgos de la misma. Además, las múltiples fuentes potenciales de riesgos producen diversos efectos en una cadena de suministro y complican la selección de las estrategias (Talluri, Kull, Yildiz y Yoon, 2013). Por otro lado, las investigaciones realizadas por Knemeyer, Zinn y Eroglu (2009), Norrman y Jansson (2004), Thun y Hoenig (2011) muestran que el impacto de un riesgo se debilita cuando las empresas implementan estrategias de mitigación.

Todos estos hallazgos, dan relevancia a la fase de mitigación en el proceso de SCRM. A continuación, se pretende analizar los modelos de optimización matemática enfocados en la selección de estrategias con miras a gestionar el impacto de los riesgos presentes en la cadena.

1.2. Modelos de Optimización para la selección de estrategias en la Gestión de Riesgos de la Cadena de Suministros

Afirmaciones realizadas por Ghadge y Dani (2012), Rao y Goldsby (2009), Tang y Musa (2011), Micheli, Mogre y Perego (2014) dan cuenta que la mayor parte de la investigación realizada hasta el momento en torno a SCRM se centra en modelos o herramientas cualitativas y a su vez destacan la necesidad de mejorar la gestión del riesgo por medio de herramientas cuantitativas (como modelos de programación matemática y modelos de simulación). Esto se corrobora con la variada

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

gama de métodos y herramientas que se han usado para gestionar los riesgos hallados durante la revisión y mencionado anteriormente.

A pesar de esto, siguiendo el patrón observado en la SCM, el modelamiento matemático cuenta con un espacio dentro de SCRM que crece constantemente. Aquí, este cobra gran importancia e interés dado su carácter normativo y prescriptivo encontrando la mejor respuesta a partir de un conjunto de datos y soportando la toma de decisiones de manera racional. En la presente revisión se encontraron 5 diferentes modelos que serán analizados a continuación donde en la Tabla 1 se podrá encontrar un cuadro resumen de cada uno.

- Zhao y Li (2013) formulan un modelo sin restricciones que muestra sobre qué riesgos debe realizarse una gestión eficaz por medio de la evaluación de tres objetivos: (1) Minimizar la probabilidad de ocurrencia del total de los riesgos obtenida a partir de una evaluación de expertos; (2) Minimizar la pérdida esperada de todos los riesgos; y (3) Minimizar el costo de gestión de los riesgos. Para dar solución al modelo diseñan un código basado en Algoritmos Genéticos.
- Liu et al. (2014) desarrollan un modelo de programación con restricciones estocásticas que permiten la selección de estrategias de mitigación de riesgos maximizando el porcentaje de reducción del riesgo que tiene cada estrategia sobre los mismos. Tienen como limitantes un presupuesto y una reducción de riesgo esperada a partir de una distribución normal.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Micheli et al. (2014) idean un DSS (*Decision support system* - Sistema de soporte a la toma de decisiones) basado en un modelo de optimización matemática donde se busca disminuir el perfil del riesgo total de una combinación de estrategias a partir de un presupuesto dado usando números difusos triangulares en los parámetros de incertidumbre.

Tabla 1. Descripción modelos matemáticos

Autor (es)	Tipo		Objetivo				Variables			Restricciones					Valid.		Características							
	1A	2A	1O	2O	3O	4O	1V	2V	3V	1R	2R	3R	4R	5R	1P	2P	1C	2C	3C	4C	5C	6C	7C	8C
Zhao y Li (2013)	x			x		x	x			x					x					x		x		x
Liu y otros (2014)		x	x		x		x				x		x		x									x
Micheli y otros (2014)	x		x			x	x				x					x				x				
Qazi y otros (2015a)	x		x		x		x			x					x		x		x	x		x	x	x
Aqlan y Lam (2015)	x		x		x		x				x	x	x			x			x	x		x		x

1A: Modelo Determinístico

2A: Modelo Estocástico

1O: Mono Objetivo

2O: Multi Objetivo

3O: Maximización

4O: Minimización

1V: Variable (s) Binaria (s)

2V: Variable (s) Entera (s)

3V: Variable (s) Continua (s)

1R: Modelo irrestricto

2R: Restricción de presupuesto de inversión

3R: Restricción de una mínima reducción total del riesgo de la cadena esperada

4R: Restricción de reducción de cada riesgo positiva

5R: Restricción de indicador financiero y/o económico

1P: Validación numérica

2P: Validación por caso de estudio

1C: Se tiene en cuenta la relación entre los riesgos

2C: Se realiza una ponderación o categorización de los riesgos

3C: Se considera la probabilidad de ocurrencia del riesgo

4C: Se considera la consecuencia o el impacto generado por el riesgo

5C: Se tiene en cuenta el cambio del riesgo en el tiempo

6C: Se considera la independencia de las estrategias (no influyen entre ellas)

7C: Se asume que cada estrategia gestiona un único riesgo

8C: Se contempla una comparación entre de situación actual y la seleccionada por el modelo

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Qazi, Quigley, Dickson y Gaudenzi (2015) proponen un modelo de optimización para la evaluación de las diferentes combinaciones de estrategias preventivas y reactivas por medio de la utilización de redes bayesianas de modo que se determine la solución óptima sobre la base de la máxima mejora en la red de la pérdida esperada, validando el modelo a través de un estudio de simulación que tiene en cuenta 12 riesgos o desencadenadores de riesgos en una cadena de suministro de 4 niveles.
- Aqlan y Lam (2015) consideran un modelo para seleccionar estrategias de gestión. El modelo busca maximizar el total de la relación (cociente) entre la reducción del riesgo una vez implementadas las estrategias y el nivel de riesgo inicial donde se cuenta con un presupuesto disponible. De igual forma se debe cumplir con una diferencia mínima en la reducción de cada riesgo partiendo del estado inicial y la reducción de un riesgo del total de estrategias implementadas debe ser positiva. Esta última contemplada porque una estrategia puede llegar a disminuir la probabilidad de ocurrencia de un riesgo, pero aumentar la de otro.

Como se pudo apreciar, sólo un modelo ha sido multi-objetivo. Adicionalmente, todas las variables usadas han sido binarias. Finalmente, ningún modelo ha tenido en cuenta algún tipo de factor financiero y/o económico ni el cambio que pudieran llegar a tener los riesgos con el paso del tiempo.

1.3. Las redes bayesianas y los riesgos en las cadenas de suministro

Gurnani, Mehrotra y Ray, (2011) y Håkansson y Prekert (2004) mencionan la importancia (y necesidad) de considerar la interdependencia de los riesgos en las investigaciones futuras de SCRM, puesto que el estudio del posible efecto dominó de los riesgos generados en el exterior y las dependencias mutuas de estos a la hora de hacer la evaluación no ha sido verificada (Gurnani et al., 2011; Håkansson y Prekert, 2004) y sólo se ha cuantificado la evaluación de los riesgos como eventos independientes (Badurdeen et al., 2014; Dogan y Aydin, 2011). Sin embargo, no es suficiente modelar la interacción probabilística entre los riesgos y las pérdidas resultantes. La evaluación de riesgos es la etapa previa a la selección de estrategias de mitigación y por lo tanto es igualmente importante durante el proceso de gestión de riesgos donde se requiere evaluar los costos, beneficios e impactos asociados con diferentes combinaciones de estrategias de mitigación del riesgo. Esto conlleva a investigar de forma eficaz, el comportamiento de las diferentes estrategias de mitigación dentro de un marco de riesgos interconectados.

Sumado a esto, investigaciones como las realizadas por Garvey, Carnovale y Yenyurt (2015), Abolghasemi, Khodakarami y Tehranifard (2015), Badurdeen et al. (2014), Lockamy III (2014), Qazi, Quigley, Dickson y Gaudenzi (2015) señalan a las redes bayesianas como una buena herramienta para modelar dichas relaciones. Sus investigaciones modelan las interdependencias de los riesgos presentes en la cadena con el fin de mejorar la evaluación y por ende mitigación del riesgo:

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Garvey et al. (2015) por medio del uso de redes Bayesianas, modelan una cadena de suministro de 4 niveles y a partir de esta asumen las interdependencias de los riesgos presentes en cada nivel; con este modelamiento tienen en cuenta la estructura de la red de suministro y las interdependencias entre los riesgos. El objetivo es determinar cuáles son los riesgos más importantes o con mayor repercusión en la cadena para focalizarse en la mitigación de estos. Además, introducen diferentes medidas de riesgo sobre la base de este modelo y llevan a cabo un estudio de simulación con el fin de demostrar el uso de medidas de riesgo en un entorno de red de suministro. Sin embargo, advierten que la evaluación de esas medidas de riesgo no es factible en el caso de una estructura de red compleja.
- Abolghasemi et al. (2015) diseñan una metodología para mitigar los riesgos de la cadena de suministro mediante la creación de un modelo bayesiano usado en métricas SCOR (*Supply Chain Operations Reference*), teniendo en cuenta tanto información cualitativa como cuantitativa. El modelo tiene la capacidad de mostrar el SCP (*Supply Chain Performance – Desempeño de la cadena de suministro*) y su estructura permite evaluar los riesgos potenciales, su impacto sobre SCP y tomar decisiones proactivas. La metodología es evaluada a modo de caso de estudio en una empresa de fabricación de automóviles y sugieren el uso de simulación para mostrar la eficacia del modelo.
- Badurdeen et al. (2014) realizan un análisis a partir del modelamiento cuantitativo de la interdependencia de los riesgos en una cadena de suministro por medio del uso de redes bayesianas con el fin de priorizar los riesgos de abastecimiento de la cadena de suministro a los que se ve expuesta una empresa. Hacen una validación del modelo con el estudio del caso

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

de la Compañía Boeing para sus proveedores. Para determinar el valor de las probabilidades que se utilizan en la red bayesiana consolidan las valoraciones de múltiples expertos. El modelo presenta una herramienta eficaz para capturar la interacción de los factores de riesgo y ayuda en la identificación de los proveedores clave. La propagación del riesgo a través de múltiples niveles no se explora en su estudio. Por otra parte, el modelado de las pérdidas resultantes y estrategias de mitigación con costos asociados no se considera.

- Lockamy III (2014) proporciona una metodología para el modelado y la evaluación de los riesgos de desastres en las redes de la cadena de suministro. La metodología utiliza redes bayesianas para el desarrollo de perfiles de riesgo de la cadena de suministro: determina las probabilidades de riesgos (operativos y externos de la red de un proveedor) y el impacto potencial de ingresos que un proveedor pueden tener en una organización utilizando la métrica valor en riesgo (*Value at Risk* - VAR). La técnica se ofrece como una herramienta para ayudar a los administradores en la evaluación de los niveles de riesgo de desastres correspondientes a su base de suministro. Validan el modelo en una industria automotriz, con una cadena de suministro de 2 niveles en donde se evalúan los riesgos en los proveedores que puedan causar interrupción en la cadena.

1.4. Red Bayesiana

Una red bayesiana (*Bayesian Network* - BN) es una representación ilustrada de dependencias para razonamiento probabilístico. Dicha representación se realiza a través de un grafo orientado y sin ciclos en el que los nodos representan variables aleatorias y los arcos que los unen expresan las

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

relaciones de dependencia directa entre dichas variables. En la red o grafo, cada variable aleatoria recibe la asignación de su probabilidad de comportamiento, así como las probabilidades condicionales correspondientes. Las redes bayesianas son ampliamente usadas en la solución de problemas de decisión cuando hay incertidumbre. Actualmente, BN es una herramienta de novedosa aplicación a la gestión de riesgos, en particular para modelar el riesgo operacional (Dávila Aragón, Cruz Aranda, Cabrera Llanos y Ortiz Arango, 2015).

La definición matemática de una BN está dada por los siguientes elementos (Dávila Aragón, Ortiz Arango y Cruz Aranda, 2016):

- Existe un conjunto de variables aleatorias unidas por un conjunto de arcos. En la Figura 1 se presenta un ejemplo en donde, $x_1 = A$ y $x_2 = B$ son los nodos y representan las variables aleatorias x_1 y x_2 . El arco dirigido de x_1 a x_2 implica una relación de causalidad entre la variable aleatoria x_1 y x_2 e indica que un cambio en la información a-priori de x_1 causa un cambio en la información a-priori de x_2 . Este cambio se produce como consecuencia de nueva información sobre x_1 ; esta nueva información es llamada evidencia. Además, la relación de causalidad entre las variables da nombre a los nodos; así, el nodo x_1 se conoce como “padre” y el nodo x_2 como “hijo”. La relación causal entre las variables aleatorias x_1 y x_2 indica que la distribución conjunta puede ser expresada como un producto de probabilidades: $P(x_1)P(x_2|x_1)$. En general, los grafos dirigidos forman parte de una red de nodos que conectan variables mediante algún tipo de relación.
- Cada variable tiene asociado un conjunto finito de estados mutuamente excluyentes.
- Las variables junto con los arcos forman un grafo acíclico dirigido (*Directed Acyclic Graph - GAD*). Las BN contienen relaciones de causalidad y, por lo tanto, sus nodos están conectados

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

por segmentos dirigidos. En la Figura 2 se presenta un ejemplo básico de las relaciones con que se pueden construir un GAD de 4 nodos. Asociado con cada GAD se tiene un conjunto de probabilidades condicionales que señalan el comportamiento del nodo condicionado a sus “padres”. En la Figura 2, el “padre” del nodo x_4 es el conjunto de nodos $\{x_1, x_2, x_3\}$.

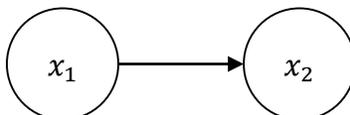


Figura 1. Grafo dirigido

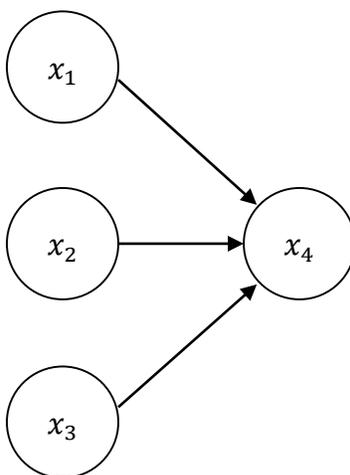


Figura 2. Grafo acíclico dirigido de 4 nodos

- Para cada variable x_i con “padres” x_1, x_2, \dots, x_n existe una probabilidad asociada definida por $P(X_i|x_1, x_2, \dots, x_n)$. Si x_i no tiene “padres”, la probabilidad $P(x_i)$ es independiente.

2. Modelo matemático en la selección de estrategias

2.1. Modelo de optimización

A partir de la revisión y análisis de los modelos de optimización mencionados en el capítulo anterior se ha diseñado el siguiente:

$$\min z_1 = \sum_{\pi \in U} x_{\pi} \cdot \alpha_{\pi} \quad (1)$$

$$\max z_2 = \sum_{\pi \in U} \frac{B_{\pi}}{c_{\pi}} x_{\pi} \quad (2)$$

s.a.:

$$\sum_{\pi \in U} x_{\pi} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{\pi \in U} c_{\pi} \cdot x_{\pi} \leq p \quad (4)$$

$$p_i^0 \cdot s_i^0 - \sum_{\pi \in U} p_{i\pi} \cdot s_{i\pi} \cdot x_{\pi} \geq 0 \quad \forall i \quad (5)$$

$$x_{\pi} \in \{0,1\} \quad (6)$$

Donde,

i , representa cada uno de los riesgos a los que está expuesta la cadena de suministro

π , representa cada una de las posibles combinaciones de estrategias disponibles

x_{π} , variable binaria que representa la implementación del π -esimo conjunto de estrategias

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

p_i^0 , probabilidad de ocurrencia del riesgo i antes de la implementación del plan de gestión

s_i^0 , severidad (impacto) del riesgo i antes de la implementación del plan de gestión

$p_{i\pi}$, probabilidad de ocurrencia del riesgo i bajo el π -esimo conjunto de estrategias

$s_{i\pi}$, severidad (impacto) del riesgo i bajo el π -esimo conjunto de estrategias

p , presupuesto disponible para el plan de gestión de riesgos

B_π , beneficio de implementar el π -esimo conjunto de estrategias (costo reducido)

c_π , costo de implementar el π -esimo conjunto de estrategias

α_π , perfil de riesgo de la cadena de suministro al implementar el π -esimo conjunto de estrategias

U , conjunto potencia de las estrategias

Como puede apreciarse, el modelo diseñado es bi-objetivo; esto con el fin de involucrar la participación de los tomadores de decisión y la importancia que estos suelen darle al tema financiero en las empresas (Ecuación (2): maximizar la relación beneficio-costos de la política π a implementar) sin dejar de lado la razón de ser del modelo y de un plan de SCRM en general: minimizar el riesgo al que está expuesta la cadena de suministro (Ecuación (1): minimizar el perfil del riesgo de la cadena de suministro bajo la política π a implementar).

Dado que las políticas son una combinación de estrategias conformadas a partir del conjunto potencia de estas últimas, existe una relación mutuamente excluyente entre ellas que se refleja en la primera restricción (ver Ecuación (3)).

La segunda restricción (ver Ecuación (4)) es la de presupuesto límite para invertir en un plan de SCRM.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Cabe la posibilidad que una política afecte negativamente a un riesgo, lo cual haría que su implementación aumente la consecuencia esperada en una cadena dada su ocurrencia. Para evitar esto, la tercera restricción (ver Ecuación (5)) sólo admite políticas que por lo menos no influyan de forma negativa a cada riesgo. La última restricción (ver Ecuación (6)) define la naturaleza de la variable de decisión.

2.2. Perfil de riesgo

El perfil del riesgo es un parámetro que busca reunir la información de cada riesgo encontrada en las primeras etapas del SCRM (identificación y evaluación) a modo de “valor esperado estandarizado” con el fin de cuantificar, en términos de exposición, la influencia que tiene cada riesgo dentro de la cadena.

De acuerdo a lo propuesto por Michelli et al. (2014), para cada riesgo i es posible identificar un peso $w_i \in [0,1]$ que refleje la importancia relativa subjetiva que tiene i para la cadena de suministro. Sin embargo, a diferencia del modelo expuesto por Michelli et al. (2014), w_i no depende de ninguna función adicional sino es un valor dado por los tomadores de decisión o quienes estén implementando el plan de gestión de riesgos es decir, es un valor netamente subjetivo.

Dependiendo de la política considerada, también se puede identificar los valores de probabilidad de ocurrencia $p_{i\pi} \in [0,1]$ e impacto $s_{i\pi} \in [0,1]$ asociados a cada riesgo. El impacto $s_{i\pi}$ es el costo relativo que incurre la cadena si el riesgo i llega a presentarse. El producto de estos

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

tres elementos (peso, probabilidad e impacto) da como resultado el aporte esperado del riesgo i al perfil de riesgo de la cadena de suministro. Finalmente, la suma de dichos aportes para todos los riesgos, da como resultado el perfil de riesgo de la cadena de suministro bajo la política π , tal y como se presenta en la Ecuación (7):

$$\alpha_{\pi} = \sum_{i \in I} w_i \cdot p_{i\pi} \cdot s_{i\pi} \quad (7)$$

Donde,

I , conjunto de todos los riesgos identificados en la cadena de suministro

w_i , peso ponderado (importancia subjetiva) dada al riesgo i

2.3. Generación de instancias de prueba

En vista que los riesgos presentes en cada cadena de suministros son únicos y que además el problema abordado en esta investigación no ha sido tratado anteriormente en ese nivel de detalle, no se encuentra en la literatura instancias diseñadas para probar el modelo matemático creado. Por esto, para evaluar y validar el modelo matemático creado y probar la hipótesis de la investigación, se diseñaron 72 instancias que fueron generadas de la siguiente manera (ver Apéndice A):

- Numero de riesgos presentes en la cadena: 15 (ver Figura 3 y Figura 4)
- Costo de las políticas a implementar: para calcular el costo de las políticas a implementar primero se asignó un costo a cada estrategia de forma independiente y aleatoria a partir de una distribución uniforme entre 10 y 250 millones de pesos (unidad monetaria) para cuando cada estrategia se implementa de forma única (la política sólo está compuesta por dicha estrategia).

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRUM

Para cuando la política está compuesta por una combinación de 2 o más estrategias se seleccionó una variación de su costo de forma aleatoria a partir de una distribución uniforme entre 50% al -50% para cada estrategia cuando se encontraba en presencia de otra (Ver Apéndice B para más detalle).

- Impacto de los riesgos: se supone que cada riesgo genera un impacto entre 30 y 570 millones de pesos (unidad monetaria). El valor del impacto de cada riesgo fue seleccionado de forma aleatoria a partir de una distribución uniforme entre los valores mencionados.
- Nivel de dependencia entre los riesgos (relación de causalidad de la red bayesiana): para los riesgos iniciales, sin eventos predecesores, la probabilidad de ocurrencia se asignó de forma aleatoria a partir de una distribución uniforme entre 20% y 30%. Para los demás riesgos se establecieron 3 niveles de dependencia (para mayor detalle ver Apéndice C):
 - ◆ Alto: sin importar cuantos riesgos predecesores tuviera un evento, la probabilidad de ocurrencia fue tomada de forma aleatoria de una distribución uniforme entre 81% al 95%. Si alguno de los riesgos predecesores era gestionado, la probabilidad de ocurrencia se tomaba entre 8.1% y 9.5%, del 2.025% al 2.375% cuando eran 2 los riesgos antecesores gestionados y cuando eran 3 los padres gestionados del 1.0125% al 1.1875%.
 - ◆ Medio: de la misma forma, la probabilidad de ocurrencia de un riesgo con predecesores era la misma (del 81% al 95%) pero cuando alguno de los riesgos padre se gestionaba, esta disminuía entre 48.6% y 57%, del 32.4% al 38% cuando eran 2 los padres que se gestionaban y del 16.2% al 19% cuando eran 3 los antecesores gestionados.
 - ◆ Bajo: igualmente, para cuando ningún riesgo padre era gestionado, la probabilidad de ocurrencia se obtenía a partir de la misma distribución uniforme (entre el 81% al 95%). Pero alguno de ellos era gestionado, la distribución era entre 72.9% y 85.5%, del 64.8%

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

al 76% cuando eran 2 los riesgos antecesores gestionados y cuando eran 3 los padres gestionados, la distribución se encontraba entre 56.7% al 66.5%.

- Importancia de los riesgos para la cadena (peso subjetivo del riesgo):
 - ◆ Con peso: peso ponderado generado de forma aleatoria de una distribución uniforme entre 0 y 1
 - ◆ Sin peso

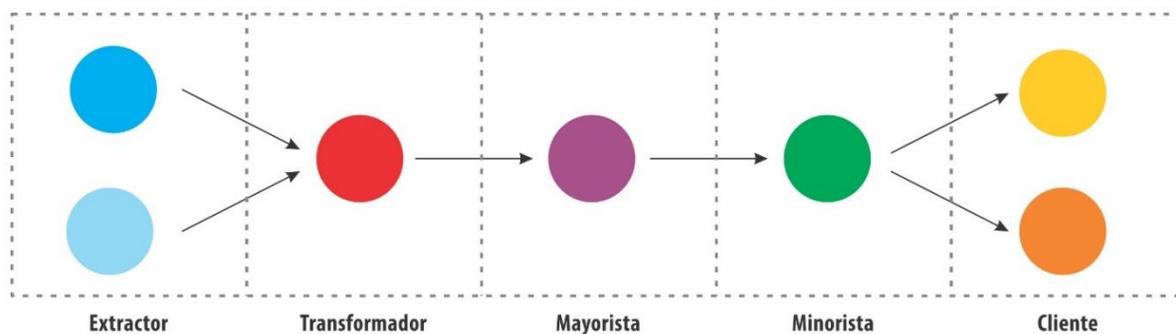


Figura 3. Red de la cadena de suministro

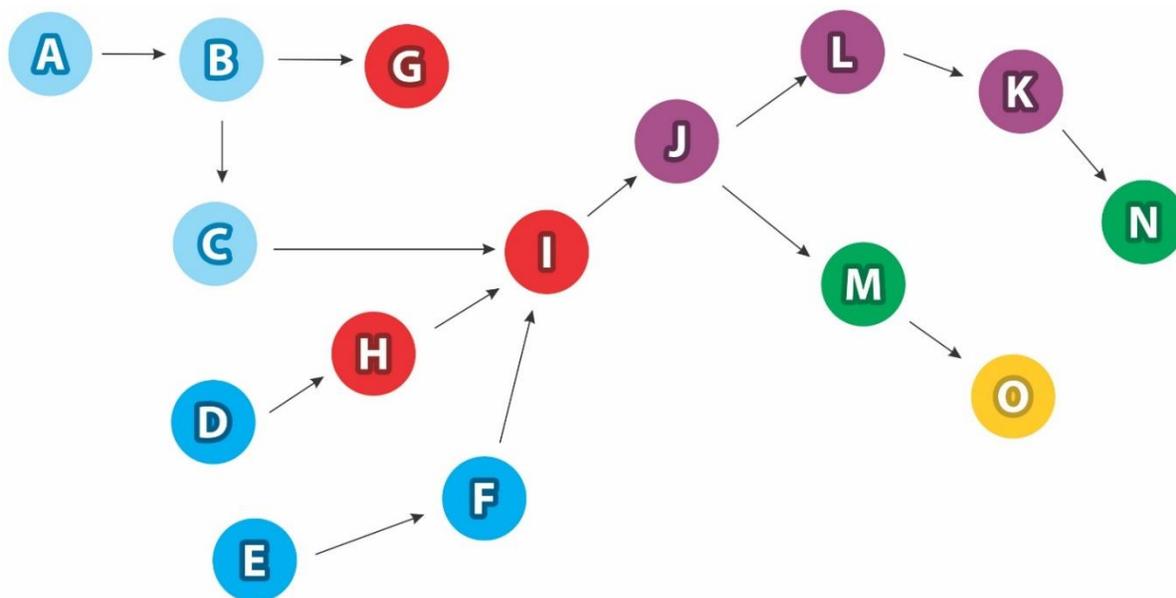


Figura 4. Riesgos modelados como una red bayesiana

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Numero de estrategias a implementar:
 - ◆ 0 estrategias: para cuando no se contempla un plan de SCRM
 - ◆ 5 estrategias (32 políticas)
 - ◆ 7 estrategias (128 políticas)
 - ◆ 10 estrategias (1024 políticas)
- Incidencia de las estrategias en los riesgos: para la presente investigación se determinó que cada estrategia gestionará un único riesgo. Para ello, de forma aleatoria se escogió un riesgo a ser minimizado por cada estrategia. Además, se asume que la implementación de una estrategia “elimina” la existencia del riesgo. Finalmente, se analizaron 3 tipos de incidencia de las estrategias sobre los riesgos.
 - ◆ Disminución del impacto: se supone que las estrategias a implementar son reactivas (Qazi, Quigley, Dickson, Gaudenzi, 2015; Kilubi y Haasis, 2015). Por tanto $s_{i\pi} = 0$ si en la política π se encuentra la estrategia que gestiona el riesgo i .
 - ◆ Disminución de la probabilidad asumiendo dependencia entre los riesgos: se supone que las estrategias a implementar son preventivas (Qazi et al., 2015; Kilubi y Haasis, 2015). Por tanto $p_{i\pi} = 0,00001$ si en la política π se encuentra la estrategia que incida sobre el riesgo i .
 - ◆ Disminución de la probabilidad asumiendo independencia entre los riesgos: se supone que las estrategias a implementar son preventivas (Qazi et al., 2015; Kilubi y Haasis, 2015). Sin embargo, aunque la disminución de probabilidad es, por definición, diferente a la disminución del impacto, matemáticamente se obtiene el mismo perfil de riesgo cuando se asume independencia entre estos. Por tal motivo se decidió tener en cuenta sólo una de ellas para la generación de las instancias.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Presupuesto de inversión: para cada escenario de políticas a implementar se calcula: el costo de cada política, el promedio aritmético del total de los costos y la desviación estándar de los mismos. Con ello se determinan dos tipos de presupuesto:
 - ◆ Bajo: es el promedio de los costos del total de las políticas en cada escenario menos media desviación estándar.
 - ◆ Alto: es el promedio de los costos del total de las políticas en cada escenario más una desviación estándar.

2.4. Generación de los escenarios de simulación

A partir de la creación de la instancia de prueba para el modelo matemático y su solución en Gams utilizando la metodología de pesos ponderados, se seleccionaron 32 escenarios de la cadena bayesiana a ser simulados en Matlab bajo 3 enfoques o situaciones diferentes:

- Cuando no se aplica ningún plan de gestión de riesgos y por lo tanto no hay mitigación/gestión de los mismos
- Cuando se instaura de plan de gestión de riesgos y la política a implementar fue escogida asumiendo independencia entre los riesgos (usando el modelo matemático diseñado en donde la probabilidad de cada riesgo es la probabilidad total obtenida de la red bayesiana)
- Cuando se implementa el SCRM pero la política a implementar es escogida asumiendo una relación entre los riesgos modelada a través de una red bayesiana

En la selección y generación de los 32 escenarios seleccionados para la simulación en Matlab se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Presupuesto:
 - ◆ Alto
 - ◆ Bajo
- Nivel de dependencia:
 - ◆ Alto
 - ◆ Bajo
- Peso ponderado:
 - ◆ Con peso
 - ◆ Sin peso
- Numero de estrategias (políticas):
 - ◆ 10 estrategias (1024 políticas)
 - ◆ 5 estrategias (32 políticas)
- Objetivo optimizado:
 - ◆ Minimización del perfil de riesgo
 - ◆ Maximización de la relación beneficio/costo

Adicionalmente, para la generación de la matriz de probabilidades de cada escenario para la simulación en caso de la ocurrencia de un evento (riesgo), fue necesaria la utilización del software para el desarrollo y solución de redes bayesianas Netica de la compañía Norsys Software Corp a partir de los resultados obtenidos de sus instancias relativas en el modelo de optimización.

3. Resultados Obtenidos

3.1. Modelo de optimización

Después de haber programado el modelo en Gams y resuelto las 72 instancias de implementación de políticas diseñadas, se comprobó que los resultados arrojados fueran acordes al planteamiento del problema que se buscaba resolver (ver resultados para cada instancia en el Apéndice D). Posteriormente se pasó a analizar las soluciones de Pareto halladas en donde se encontró que:

- Para las instancias pequeñas (con 32 políticas):
 - ◆ Para el objetivo de maximizar relación beneficio/costo, la solución siempre fue implementar la misma política en las diferentes instancias.
 - ◆ En el 41.67% de las instancias, el frente de Pareto sólo estuvo compuesto por 2 soluciones.
 - ◆ Sólo para el 12,5% se encontró una política diferente, en cada instancia, que no priorizara ninguno de los dos objetivos.
- Para las instancias medianas (con 128 políticas):
 - ◆ En una de las 24 instancias, sólo una política hace parte del frente de Pareto. Para el presupuesto dado (restricción) era la mejor combinación de estrategias en ambos objetivos. Sin embargo, esta misma política no aparece en ningún otro frente de Pareto del mismo grupo de instancias.
 - ◆ En las instancias con presupuesto alto, no se presentó gran variación en la respuesta cuando se buscaba optimizar la relación beneficio/costo y los riesgos se consideraban independientes pues en las 6 se seleccionó la misma solución. Mientras que cuando se

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

consideró la relación bayesiana, se presentó una solución por cada nivel de dependencia.

Sin embargo, cuando se buscaba minimizar el perfil del riesgo, a pesar que se presentaron diferencias en las políticas seleccionadas, no hubo divergencias entre considerar los riesgos independientes o con relaciones bayesiana.

- Para las instancias grandes (1024 políticas)
 - ◆ Ante la restricción de presupuesto bajo, se presentó mayor variación en las políticas escogidas cuando se buscaba minimizar el perfil del riesgo en comparación a cuando el presupuesto fue mayor.
 - ◆ Cuando el presupuesto se mostró alto y se buscaba minimizar el perfil de riesgo, siempre se seleccionó la misma política para cuando no había peso relativo de los riesgos. Pero, cuando el riesgo tiene un peso subjetivo asociado y los riesgos se modelan como una red bayesiana, se seleccionaron políticas diferentes; caso contrario se evidenció para cuando se asumió independencia entre los riesgos pues fue escogida la misma política en todo este grupo de instancias.

De lo anterior, se puede entrever que no se presenta una importante diferencia entre la asunción de independencia entre los riesgos y su modelamiento como red bayesiana, sobre todo cuando el grupo de posibles políticas a implementar es reducido.

Por otro lado, para un mayor análisis de los resultados se determinó observar el comportamiento de los parámetros tenidos en cuenta al momento de diseñar las instancias en los niveles extremos contemplados por medio de un análisis de diseño factorial 2^k . En dicho análisis se contemplaron 5 efectos (A: nivel de dependencia, B: importancia/peso del riesgo, C: # de políticas disponibles

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRUM

para ser implementadas, D: presupuesto y, E: incidencia de las políticas) y su influencia en 4 resultados:

- Perfil del riesgo cuando este es minimizado omitiendo la relación beneficio/costo
- Relación beneficio/costo cuando es minimizado el perfil del riesgo
- Perfil del riesgo cuando se maximiza la relación beneficio/costo omitiendo la minimización del primero
- Relación beneficio/costo cuando esta es maximizada omitiendo la minimización del perfil

Del análisis de los efectos principales y la interacción de estos en cada una de las 4 respuestas (ver figuras en Apéndice E), se pudo concluir que el nivel de dependencia influye fuertemente tanto en valor del perfil como de la relación beneficio/costo y que modelar la relación de dependencia entre los riesgos por medio de una red bayesiana nuevamente, y aparentemente, no se diferencia de asumir independencia entre estos. Por lo demás, se denota que no existe ninguna interacción con algunos de los otros parámetros, excepto para el nivel de dependencia, aunque es muy pequeña.

Finalmente, se observa que cuando la relación entre los riesgos es baja, tanto el perfil de riesgo como la relación beneficio/costo es alta. Esto es consecuente ya que para el cálculo de estos dos valores es necesaria la probabilidad de ocurrencia de cada riesgo. Además, el peso sólo tiene incidencia sobre el perfil del riesgo (por la misma razón) y no se observa una fuerte interacción entre los demás parámetros establecidos.

3.2. Simulación

El algoritmo de simulación de los riesgos fue programado en Matlab. Allí se realizaron 35 simulaciones de Monte Carlo de eventos discretos partiendo siempre de la situación inicial de la red de riesgos supuesta. Se corrieron 3.000 réplicas en las 35 simulaciones para cada uno de los 32 escenarios diseñados en las tres situaciones o enfoques a evaluar (sin gestionar los riesgos, gestionando los riesgos asumiendo independencia y gestionando los riesgos asumiendo comportamiento bayesiano de las probabilidades de los riesgos). En cada simulación se midió el costo esperado promedio en caso que se diera alguno de los riesgos de las 3.000 réplicas para posteriormente promediar los 35 costos en cada escenario dentro de los 3 enfoques (ver promedios en el Apéndice F).

Esta información se analizó en Minitab ®. Primero se realizó un ANOVA por bloques en el que cada tratamiento era una de los enfoques a evaluar y los bloques correspondían a cada escenario (ver Tabla 2). Del ANOVA se pudo determinar que al menos una de las medias de los tratamientos es diferente a las demás. Por los intervalos de confianza suministrados por el software (ver Figura 5), se intuye que es la primera situación la que más pesa en este resultado así que se decide hacer otro ANOVA teniendo en cuenta solamente las 2 últimas situaciones: gestionar los riesgos asumiendo independencia o modelando su relación con una red bayesiana (ver Tabla 3).

Del análisis general de la relación de independencia de los riesgos vs comportamiento bayesiano realizado, se determina que las medias para las situaciones contempladas presentan diferencias significativas. Lo cual lleva a decir que el costo futuro esperado de una cadena de suministro que

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

gestiona sus riesgos asumiendo independencia vs modelándolos a través de una red bayesiana es diferente.

Tabla 2. Anova para los tres enfoques: Costo vs Escenarios; Enfoques

Fuente	GL	SC	MC	F	P
ESCENARIOS	31	22067752	711863	4,88	0,000
ENFOQUES	2	19722156	9912563	67,92	0,000
Error	62	9047996	145935		
Total	95	50940874			

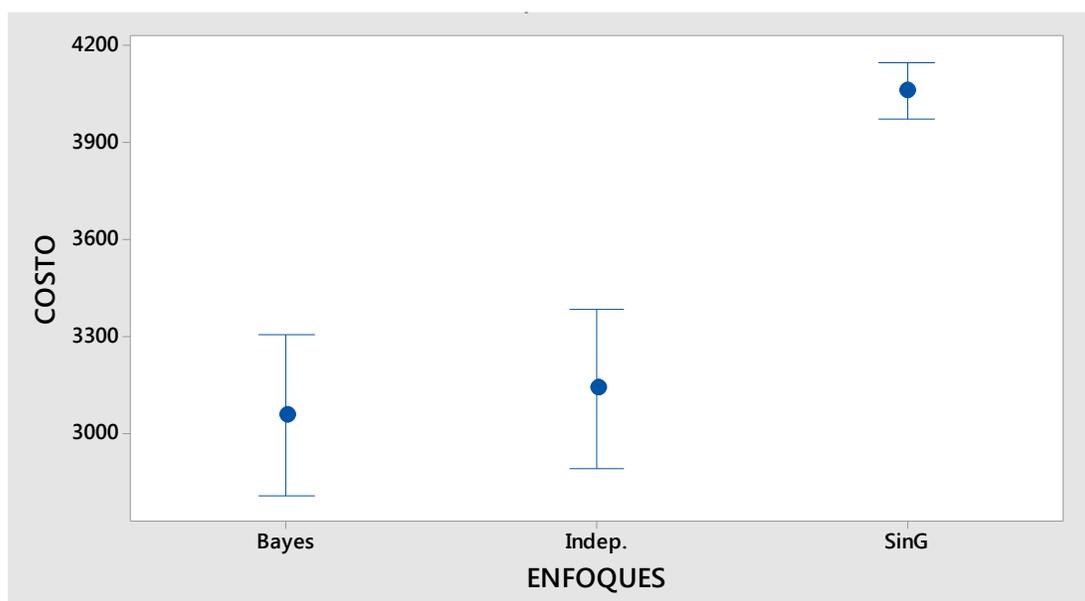


Figura 5. Intervalos de confianza para la media del Costo para cada escenario ($\alpha = 0.05$)

Tabla 3. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes): Costo vs Escenarios; Enfoques

Fuente	GL	SC Sec.	MC Ajust.	F	P
ESCENARIOS	31	28809692	929345	52,05	0,000
ENFOQUES	1	105701	105701	5,92	0,021
Error	31	553527	17856		
Total	63	29468920			

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Observando los intervalos de confianza de los datos (ver Figura 6) se vislumbra que, en promedio, el costo futuro esperado de la cadena de suministro es menor cuando los riesgos son modelados y gestionados asumiendo sus relaciones como una red bayesiana.

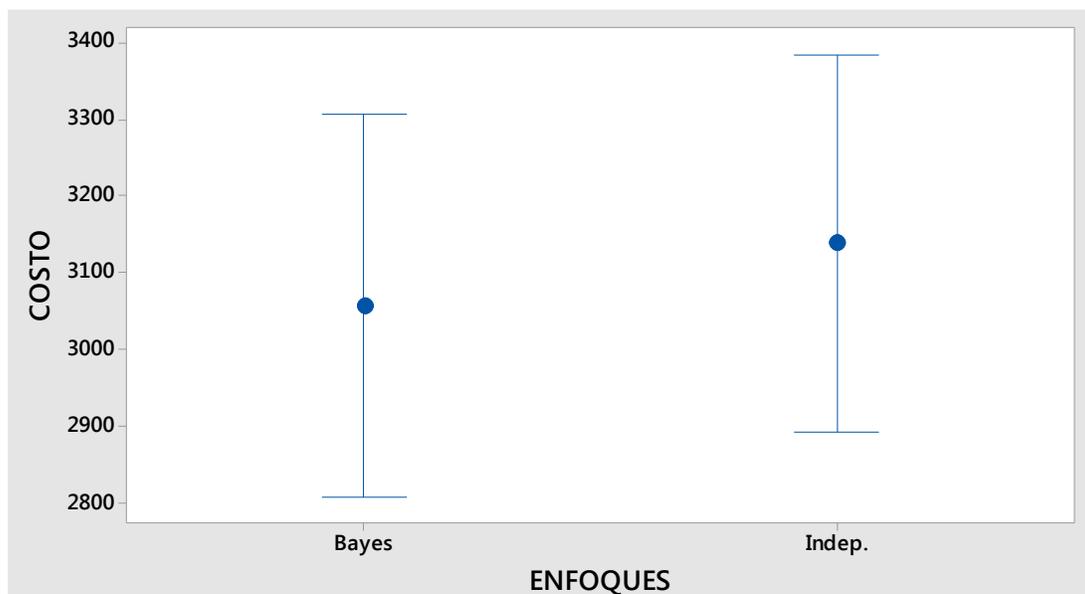


Figura 6. Intervalos de confianza para la media del Costo en los 2 escenarios ($\alpha = 0.05$)

A partir de esto se decide realizar un análisis de diseño factorial 2^k a fin de tratar de determinar si existen parámetros para los cuales no habría diferencia en modelar los riesgos por medio de redes bayesianas o asumir independencia. Los 6 factores que se miraron fueron: A: nivel de dependencia, B: importancia/peso del riesgo, C: # de políticas disponibles para ser implementadas, D: presupuesto, E: relación de los riesgos y, F: Objetivo optimizado.

Con la observación de los efectos principales (Figura 7) se comprueba que la gestión de riesgos teniendo en cuenta su relación a través de una red bayesiana influye muy poco en comparación con otros factores como el objetivo priorizado o el número de políticas a implementar o el

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

presupuesto disponible. De esto último, se puede asegurar que optimizar el perfil del riesgo siempre dará mejores resultados futuros en comparación con maximizar la relación beneficio/costo; sin embargo, y como se evidenció anteriormente, la optimización de esta relación será una buena opción en lugar de no realizar la gestión de los riesgos.

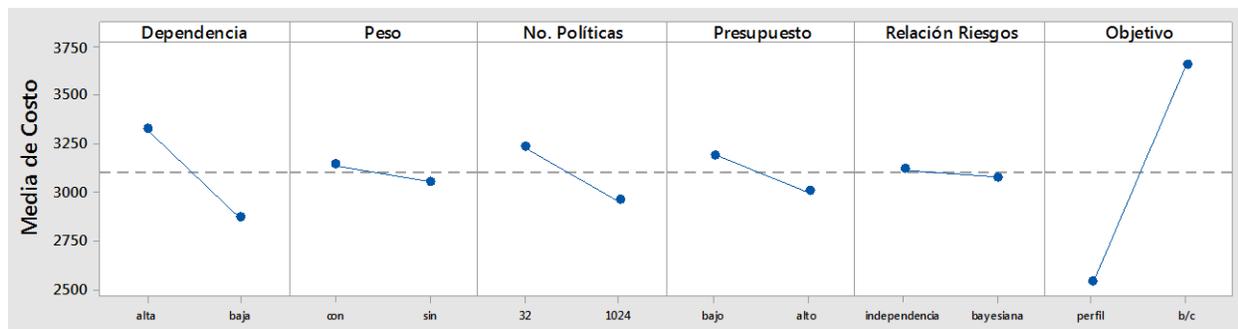


Figura 7. Efectos principales para el Costo obtenido por simulación

Adicionalmente, ante una relación fuerte entre los riesgos, gestionarlos de alguna forma será significativo para la disminución del costo de los impactos futuros. Pero, si esta gestión se realiza teniendo como objetivo una minimización del perfil del riesgo, se espera que la resiliencia de la cadena sea mayor.

Por otro lado, se observa que existe una pequeña interacción entre el presupuesto y la relación entre los riesgos. Esto sería útil analizarlo para el caso en que se cuente con un presupuesto corto. De ahí que se realiza un ANOVA para los costos separando aquellos en los que se contemplaba un presupuesto bajo vs un presupuesto alto (ver Tabla 4 y Tabla 5). De dichos análisis de varianza, se puede determinar que sólo valdría la pena modelar la supuesta relación de los riesgos por medio de una red bayesiana cuando se cuente con un presupuesto alto. Ya que cuando este es bajo, no se aprecian diferencias significativas entre los dos enfoques.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Tabla 4. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes) con presupuesto bajo: Costo vs

Escenarios; Enfoques

Fuente	GL	SC	MC	F	P
ESCENARIOS	15	10591723	706115	23,00	0,000
ENFOQUES	1	557	557	0,02	0,895
Error	15	460499	30700		
Total	15	10591723	706115	23,00	0,000

Tabla 5. Anova para dos enfoques (Independencia & Bayes) con presupuesto alto: Costo vs

Escenarios; Enfoques

Fuente	GL	SC	MC	F	P
ESCENARIOS	15	17655775	1177052	116,41	0,000
ENFOQUES	1	46509	46509	4,60	0,049
Error	15	151663	10111		
Total	31	17655775	1177052	116,41	0,000

Conclusiones

En general, los modelos disponibles en el ámbito de la gestión de riesgos de la cadena de suministro abordan problemas específicos, mientras que los pocos modelos que captan la interdependencia entre los riesgos no abarcan todas las etapas del proceso de gestión de riesgos. Con esta investigación se ha buscado superar esta brecha y se ha propuesto un nuevo enfoque para modelar la interdependencia entre riesgos y evaluar diferentes estrategias de control (preventivas y reactivas).

Investigadores señalados a lo largo del documento indican que una buena estrategia para empezar un plan de SCRM inicia con la identificación de todos los eslabones y niveles que configuran la cadena de suministro y a partir de allí identificar los riesgos en cada eslabón con el fin de tener una visión general del grado de exposición al que se encuentra enfrentada la cadena y poder así diseñar estrategias que conduzcan a su minimización.

La medida de riesgo propuesta, y adaptada de la presentada en investigaciones anteriores, es fácil de calcular e interpretar y refleja la contribución de cada riesgo a la pérdida esperada de la red.

El modelo de optimización presentado requiere de la captura de la configuración de la red de suministro, el conocimiento o inferencia de la probabilidad de ocurrencia de los riesgos y por tanto sus relaciones, las pérdidas resultantes al presentarse un riesgo y los costos asociados con

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

diferentes estrategias de mitigación del riesgo. Todo esto con el fin de determinar la combinación de estrategias que permita mejorar el desempeño de la cadena de suministros de forma óptima.

De igual forma, el modelo es práctico, sencillo y fácilmente adaptable a cualquier configuración de riesgos haciendo un aporte adicional a investigaciones anteriores. Además, es posible encontrar la solución exacta en un tiempo de cómputo razonable siendo innecesario el uso de algoritmos de aproximación como heurísticas o metaheurísticas.

Las instancias diseñadas, aunque específicas para el modelo y problema a investigar, son fácilmente adaptables y contienen información útil para probar otros tipos o estructuras de modelos matemáticos que se diseñen en el futuro. Además, son las primeras creadas para tratar el tema de la gestión de riesgos, que se tenga conocimiento.

Ha quedado evidenciado fuertemente que no importa el lineamiento que se siga para la gestión de los riesgos ni el objetivo que se busque, en el tiempo, siempre va a ser mucho más beneficioso entablar alguna acción en busca de minimizar la exposición de la cadena y aumentar su resiliencia.

Corroborando lo afirmado por Gurnani et al. (2011), Håkansson y Prenkert (2004) Craighead et al. (2007) y Talluri et al. (2013) se aprecia una diferencia significativa en la pérdida futura esperada cuando los riesgos son gestionados modelando su relación como una red bayesiana o asumiendo la independencia entre ellos. Esto suponiendo que las inferencias realizadas sobre la probabilidad de ocurrencia de los riesgos sean fidedignas.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Además, quedó comprobado que incluir un indicador financiero de fácil cálculo e interpretación no supone un impedimento para implementar un plan de SCRM sino todo lo contrario ya que permite realizar un primer acercamiento a la gestión de riesgos sin necesitar una gran inversión de capital y plasmando las ventajas que conllevan la SCRM.

Finalmente, dados los resultados obtenidos se insta a las organizaciones y sus cadenas de suministro a emprender un plan de SCRM ya que, a pesar que la parametrización de la situación actual de los riesgos a los que se encuentren expuestos sea difícil, una aproximación a la misma puede ser suficiente para su gestión en vez de esperar a que estos ocurran lo cual resulta mucho más costo. Para ello se requiere una comunicación eficaz entre los eslabones que componen la cadena.

Futuras Investigaciones

De acuerdo a lo encontrado en la literatura, otra de las alternativas a contrastar y evaluar de forma cuantitativa es la inferencia en el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de los riesgos y el impacto de los mismos y cómo una posible mala estimación de estos podría afectar el plan de SCRM y, en la misma medida, el desempeño futuro de la cadena de suministros. De igual forma, cómo podría ser su parametrización a través de números difusos o grises en casos de alta incertidumbre.

Adicionalmente, se sugiere determinar que otro indicador financiero o económico podría incluirse en el modelo y esto cómo cambiaría las soluciones encontradas y el desempeño esperado de la cadena.

De igual forma, se insta a indagar en el modelamiento dinámico de los riesgos y por tanto su variación en el tiempo. De esta forma, se puede asegurar una evolución y por tanto mejoramiento continuo del desempeño de la cadena a través de la gestión de los riesgos.

También sería interesante analizar el comportamiento del sistema cuando a partir de un significativo grupo de estrategias (más estrategias que riesgos) se varía su disponibilidad a ser implementadas por medio de una política. Esto para verificar el impacto real sobre el perfil del riesgo y de esta forma las posibles pérdidas futuras.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Finalmente, se sugiere investigar e incluir desencadenadores de riesgos y la posible relación entre ellos.

Referencias Bibliográficas

Abolghasemi, M., Khodakarami, V., & Tehranifard, H. (2015). A new approach for supply chain risk management: Mapping SCOR into Bayesian network. *Journal Of Industrial Engineering And Management*, 8(1), 280-302. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.1281>

Adhitya, A., Srinivasan, R., & Karimi, I. (2009). Supply chain risk identification using a HAZOP-based approach. *Aiche Journal*, 55(6), 1447-1463. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.11764>

Aqlan, F., & Lam, S. (2015). Supply chain risk modelling and mitigation. *International Journal Of Production Research*, 53(18), 5640-5656. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1047975>

Asgari, N., Nikbakhsh, E., Hill, A., & Farahani, R. (2016). Supply chain management 1982–2015: a review. *IMA Journal Of Management Mathematics*, 27(3), 353-379. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1093/imaman/dpw004>

Badurdeen, F., Shuaib, M., Wijekoon, K., Brown, A., Faulkner, W., & Amundson, J. et al. (2014). Quantitative modeling and analysis of supply chain risks using Bayesian theory. *Journal Of Manufacturing Technology Management*, 25(5), 631-654. <http://dx.doi.org/10.1108/jmtm-10-2012-0097>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Badurdeen, F., Shuaib, M., Wijekoon, K., Brown, A., Faulkner, W., & Amundson, J. et al. (2014). Quantitative modeling and analysis of supply chain risks using Bayesian theory. *Journal Of Manufacturing Technology Management*, 25(5), 631-654. <http://dx.doi.org/10.1108/jmtm-10-2012-0097>

Blos, M., Quaddus, M., Wee, H., & Watanabe, K. (2009). Supply chain risk management (SCRM): a case study on the automotive and electronic industries in Brazil. *Supply Chain Management: An International Journal*, 14(4), 247-252. <http://dx.doi.org/10.1108/13598540910970072>

Brindley, C. (2004). *Supply chain risk*. Aldershot: Ashgate.

Christopher, M., Peck, H., Rutherford, C., & Juttner, U., (2003). *Understanding Supply Chain risk: A Self-assessment Workbook*. Department for Transport, Cranfield University, Cranfield.

Colicchia, C., & Strozzi, F. (2012). Supply chain risk management: a new methodology for a systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(4), 403-418. <http://dx.doi.org/10.1108/13598541211246558>

Craighead, C., Blackhurst, J., Rungtusanatham, M., & Handfield, R. (2007). The Severity of Supply Chain Disruptions: Design Characteristics and Mitigation Capabilities. *Decision Sciences*, 38(1), 131-156. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-5915.2007.00151.x>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Dávila Aragón, G., Cruz Aranda, F., Cabrera Llanos, A., & Ortiz Arango, F. (2015). Análisis de la Productividad Mediante Redes Bayesianas en una Pyme Desarrollada de Tecnología. *Revista Mexicana De Economía Y Finanzas*, 10(1), 61-71. <http://dx.doi.org/10.21919/remef.v10i1.66>

Dávila Aragón, G., Ortiz Arango, F., & Cruz Aranda, F. (2016). Cálculo del valor en riesgo operacional mediante redes bayesianas para una empresa financiera. *Contaduría Y Administración*, 61(1), 176-201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cya.2015.09.009>

Dogan, I., & Aydin, N. (2011). Combining Bayesian Networks and Total Cost of Ownership method for supplier selection analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 61(4), 1072-1085. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.06.021>

Fahimnia, B., Tang, C., Davarzani, H., & Sarkis, J. (2015). Quantitative models for managing supply chain risks: A review. *European Journal Of Operational Research*, 247(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.034>

Farahani, R., Rezapour, S., Drezner, T., & Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 45, 92-118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>

Fawcett, S., Wallin, C., Allred, C., Fawcett, A., & Magnan, G. (2011). Information technology as an enabler of supply chain collaboration: A dynamic capabilities perspective. *Journal Of Supply Chain Management*, 47(1), 38-59. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-493x.2010.03213.x>

Garvey, M., Carnovale, S., & Yeniyurt, S. (2015). An analytical framework for supply network risk propagation: A Bayesian network approach. *European Journal Of Operational Research*, 243(2), 618-627. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.034>

Gaudenzi, B., & Borghesi, A. (2006). Managing risks in the supply chain using the AHP method. *The International Journal Of Logistics Management*, 17(1), 114-136. <http://dx.doi.org/10.1108/09574090610663464>

Ghadge, A., Dani, S., & Kalawsky, R. (2012). Supply chain risk management: present and future scope. *The International Journal Of Logistics Management*, 23(3), 313-339. <http://dx.doi.org/10.1108/09574091211289200>

Giunipero, L., & Aly Eltantawy, R. (2004). Securing the upstream supply chain: a risk management approach. *International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(9), 698-713. <http://dx.doi.org/10.1108/09600030410567478>

Goh, M., Lim, J., & Meng, F. (2007). A stochastic model for risk management in global supply chain networks. *European Journal Of Operational Research*, 182(1), 164-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.028>

Gurnani, H., Mehrotra, A., & Ray, S. (2012). *Supply chain disruptions*. London: Springer.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Hasani, A., Zegordi, S., & Nikbakhsh, E. (2014). Robust closed-loop global supply chain network design under uncertainty: the case of the medical device industry. *International Journal Of Production Research*, 53(5), 1596-1624. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2014.965349>

Håkansson, H., Harrison, D., & Waluszewski, A. (2005). *Rethinking Marketing*. Chichester: John Wiley & Sons.

Heckmann, I., Comes, T., & Nickel, S. (2015). A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. *Omega*, 52, 119-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2014.10.004>

Hendricks, K., & Singhal, V. (2009). An Empirical Analysis of the Effect of Supply Chain Disruptions on Long-Run Stock Price Performance and Equity Risk of the Firm. *Production And Operations Management*, 14(1), 35-52. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00008.x>

Hill, A., Doran, D., & Stratton, R. (2012). How should you stabilise your supply chains?. *International Journal Of Production Economics*, 135(2), 870-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.10.027>

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9th ed.). McGraw-Hill Interamericana.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., & Talluri, S. (2015). Supply chain risk management: a literature review. *International Journal Of Production Research*, 53(16), 5031-5069. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>

Hosseini, S., Farahani, R., Dullaert, W., Raa, B., Rajabi, M., & Bolhari, A. (2013). A robust optimization model for a supply chain under uncertainty. *IMA Journal Of Management Mathematics*, 25(4), 387-402. <http://dx.doi.org/10.1093/imaman/dpt014>

Jüttner, U., Peck, H., & Christopher, M. (2003). Supply chain risk management: outlining an agenda for future research. *International Journal Of Logistics Research And Applications*, 6(4), 197-210. <http://dx.doi.org/10.1080/13675560310001627016>

Ray, S., & Black, T. (2011). The Downside of Just-in-Time Inventory. *Bloomberg Bussinessweek*, 24, 17-18. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2011-03-24/the-downside-of-just-in-time-inventory>

Seuring, S., Muller, M., Goldbach, M., & Schneidewind, U. (2003). *Strategy and organization in supply chains* (pp. 321–336). Heidelberg: Physica-Verlag.

Kilubi, I., & Haasis, H. D. (2015). Supply Chain Risk Management Enablers - A Framework Development Through Systematic Review of the Literature from 2000 to 2015. *International Journal of Business Science & Applied Management*, 10(1), 35-54.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Kleindorfer, P., & Saad, G. (2009). Managing Disruption Risks in Supply Chains. *Production And Operations Management*, 14(1), 53-68. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2005.tb00009.x>

Knemeyer, A., Zinn, W., & Eroglu, C. (2009). Proactive planning for catastrophic events in supply chains. *Journal Of Operations Management*, 27(2), 141-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2008.06.002>

Lavastre, O., Gunasekaran, A., & Spalanzani, A. (2012). Supply chain risk management in French companies. *Decision Support Systems*, 52(4), 828-838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2011.11.017>

Liberatore, F., Pizarro, C., Simon de Blas, C., Ortuño, M., & Vitoriano, B. (2013). Uncertainty in humanitarian logistics for disaster management - a review. In B. Vitoriano, J. Montero & D. Ruan eds, *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies* (pp. 45–74). Berlin: Springer.

Liu, L., Li, S., & Wu, Y. (2014). Supply Chain Risk Management in Chinese Chemical Industry based on Stochastic Chance-Constrained Programming Model. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 8(3), 1201-1206. <http://dx.doi.org/10.12785/amis/080333>

Lockamy III, A. (2014). Assessing disaster risks in supply chains. *Industrial Management & Data Systems*, 114(5), 755-777. <http://dx.doi.org/10.1108/imds-11-2013-0477>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Mahapatra, S., Narasimhan, R., & Barbieri, P. (2010). Strategic interdependence, governance effectiveness and supplier performance: A dyadic case study investigation and theory development. *Journal Of Operations Management*, 28(6), 537-552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2010.04.001>

Manuj, I., & Mentzer, J. (2008). Global supply chain risk management. *Journal Of Business Logistics*, 29(1), 133-155. <http://dx.doi.org/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00072.x>

Micheli, G., Mogre, R., & Perego, A. (2014). How to choose mitigation measures for supply chain risks. *International Journal Of Production Research*, 52(1), 117-129. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2013.828170>

Monroe, R., Teets, J., & Martin, P. (2014). Supply chain risk management: an analysis of sources of risk and mitigation strategies. *International Journal Of Applied Management Science*, 6(1), 4. <http://dx.doi.org/10.1504/ijams.2014.059291>

Movahedipour, M., Yang, M., Zeng, J., Wu, X., & Salam, S. (2016). Optimization in supply chain management, the current state and future directions: A systematic review and bibliometric analysis. *Journal Of Industrial Engineering And Management*, 9(4), 933. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2035>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Norrman, A., & Jansson, U. (2004). Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. *International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 434-456. <http://dx.doi.org/10.1108/09600030410545463>

Pettit, T., Croxton, K., & Fiksel, J. (2013). Ensuring Supply Chain Resilience: Development and Implementation of an Assessment Tool. *Journal Of Business Logistics*, 34(1), 46-76. <http://dx.doi.org/10.1111/jbl.12009>

Qazi, A., Quigley, J., Dickson, A., & Gaudenzi, B. (2015). A New Modelling Approach of Evaluating Preventive and Reactive Strategies for Mitigating Supply Chain Risks. *Lecture Notes In Computer Science*, 9335, 569-585. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24264-4_39

Rao, S., & Goldsby, T. (2009). Supply chain risks: a review and typology. *The International Journal Of Logistics Management*, 20(1), 97-123. <http://dx.doi.org/10.1108/09574090910954864>

Repenning, N., & Sterman, J. (2001). Nobody Ever Gets Credit for Fixing Problems That Never Happened: Creating and Sustaining Process Improvement. *California Management Review*, 43(4), 64-88. <http://dx.doi.org/10.2307/41166101>

Simangunsong, E., Hendry, L., & Stevenson, M. (2012). Supply-chain uncertainty: a review and theoretical foundation for future research. *International Journal Of Production Research*, 50(16), 4493-4523. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2011.613864>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Talluri, S., Kull, T., Yildiz, H., & Yoon, J. (2013). Assessing the Efficiency of Risk Mitigation Strategies in Supply Chains. *Journal Of Business Logistics*, 34(4), 253-269.

<http://dx.doi.org/10.1111/jbl.12025>

Tang, C. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal Of Production Economics*, 103(2), 451-488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>

Tang, O., & Nurmaya Musa, S. (2011). Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. *International Journal Of Production Economics*, 133(1), 25-34.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.06.013>

Thun, J., & Hoenig, D. (2011). An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. *International Journal Of Production Economics*, 131(1), 242-249.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.010>

Trkman, P., & McCormack, K. (2009). Supply chain risk in turbulent environments—A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal Of Production Economics*, 119(2), 247-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.002>

Tsai, M., Liao, C., & Han, C. (2008). Risk perception on logistics outsourcing of retail chains: model development and empirical verification in Taiwan. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(6), 415-424. <http://dx.doi.org/10.1108/13598540810905679>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Wagner, S., & Bode, C. (2006). An empirical investigation into supply chain vulnerability. *Journal Of Purchasing And Supply Management*, 12(6), 301-312.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.pursup.2007.01.004>

Wieland, A., & Marcus Wallenburg, C. (2012). Dealing with supply chain risks. *International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management*, 42(10), 887-905.

<http://dx.doi.org/10.1108/09600031211281411>

Wieland A. , y C. M. Wallenburg, “Dealing with supply chain risks: Linking risk management practices and strategies to performance”, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 42, no. 10, pp. 887-905, 2012.

Yang, B., & Yang, Y. (2010). Postponement in supply chain risk management: a complexity perspective. *International Journal Of Production Research*, 48(7), 1901-1912.

<http://dx.doi.org/10.1080/00207540902791850>

Zhao, L., & Li, C. (2013). Supply chain risk management decision model based on genetic algorithm. *2013 6Th International Conference On Information Management, Innovation Management And Industrial Engineering*, 3, 309-313.

<http://dx.doi.org/10.1109/iciiii.2013.6702936>

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Apéndice A. Listado de instancias para el modelo matemático

Tabla 6. Descripción de las Instancias de prueba

#	Nombre	Nivel de dependencia	Importancia del riesgo (peso)	# Estrategias	# Políticas	Incidencia estrategias	Presupuesto
1	A_OP_5E_PIND_A	Alto	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
2	A_OP_5E_PRB_A	Alto	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
3	A_OP_5E_PIND_B	Alto	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
4	A_OP_5E_PRB_B	Alto	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
5	A_OP_7E_PIND_A	Alto	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
6	A_OP_7E_PRB_A	Alto	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
7	A_OP_7E_PIND_B	Alto	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
8	A_OP_7E_PRB_B	Alto	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
9	A_OP_10E_PIND_A	Alto	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
10	A_OP_10E_PRB_A	Alto	Sin peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
11	A_OP_10E_PIND_B	Alto	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo
12	A_OP_10E_PRB_B	Alto	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo
13	A_1P_5E_PIND_A	Alto	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
14	A_1P_5E_PRB_A	Alto	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
15	A_1P_5E_PIND_B	Alto	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
16	A_1P_5E_PRB_B	Alto	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
17	A_1P_7E_PIND_A	Alto	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
18	A_1P_7E_PRB_A	Alto	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
19	A_1P_7E_PIND_B	Alto	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
20	A_1P_7E_PRB_B	Alto	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
21	A_1P_10E_PIND_A	Alto	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
22	A_1P_10E_PRB_A	Alto	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
23	A_1P_10E_PIND_B	Alto	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo
24	A_1P_10E_PRB_B	Alto	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo
25	M_OP_5E_PIND_A	Medio	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
26	M_OP_5E_PRB_A	Medio	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
27	M_OP_5E_PIND_B	Medio	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
28	M_OP_5E_PRB_B	Medio	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
29	M_OP_7E_PIND_A	Medio	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
30	M_OP_7E_PRB_A	Medio	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
31	M_OP_7E_PIND_B	Medio	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
32	M_OP_7E_PRB_B	Medio	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
33	M_OP_10E_PIND_A	Medio	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
34	M_OP_10E_PRB_A	Medio	Sin peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
35	M_OP_10E_PIND_B	Medio	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRUM

36	M_0P_10E_PRB_B	Medio	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo
37	M_1P_5E_PIND_A	Medio	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
38	M_1P_5E_PRB_A	Medio	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
39	M_1P_5E_PIND_B	Medio	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
40	M_1P_5E_PRB_B	Medio	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
41	M_1P_7E_PIND_A	Medio	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
42	M_1P_7E_PRB_A	Medio	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
43	M_1P_7E_PIND_B	Medio	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
44	M_1P_7E_PRB_B	Medio	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
45	M_1P_10E_PIND_A	Medio	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
46	M_1P_10E_PRB_A	Medio	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
47	M_1P_10E_PIND_B	Medio	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo
48	M_1P_10E_PRB_B	Medio	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo
49	B_0P_5E_PIND_A	Bajo	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
50	B_0P_5E_PRB_A	Bajo	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
51	B_0P_5E_PIND_B	Bajo	Sin peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
52	B_0P_5E_PRB_B	Bajo	Sin peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
53	B_0P_7E_PIND_A	Bajo	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
54	B_0P_7E_PRB_A	Bajo	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
55	B_0P_7E_PIND_B	Bajo	Sin peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
56	B_0P_7E_PRB_B	Bajo	Sin peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
57	B_0P_10E_PIND_A	Bajo	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
58	B_0P_10E_PRB_A	Bajo	Sin peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
59	B_0P_10E_PIND_B	Bajo	Sin peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo
60	B_0P_10E_PRB_B	Bajo	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo
61	B_1P_5E_PIND_A	Bajo	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Alto
62	B_1P_5E_PRB_A	Bajo	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Alto
63	B_1P_5E_PIND_B	Bajo	Con peso	5	32	Prob. Independientes	Bajo
64	B_1P_5E_PRB_B	Bajo	Con peso	5	32	Prob. Bayesianas	Bajo
65	B_1P_7E_PIND_A	Bajo	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Alto
66	B_1P_7E_PRB_A	Bajo	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Alto
67	B_1P_7E_PIND_B	Bajo	Con peso	7	128	Prob. Independientes	Bajo
68	B_1P_7E_PRB_B	Bajo	Con peso	7	128	Prob. Bayesianas	Bajo
69	B_1P_10E_PIND_A	Bajo	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Alto
70	B_1P_10E_PRB_A	Bajo	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Alto
71	B_1P_10E_PIND_B	Bajo	Con peso	10	1024	Prob. Independientes	Bajo
72	B_1P_10E_PRB_B	Bajo	Con peso	10	1024	Prob. Bayesianas	Bajo

Apéndice B. Cálculo del costo de las políticas

Cuando una política se encuentra compuesta por una sola estrategia, el costo de la política es directamente el costo de la estrategia. Sin embargo, cuando una política está conformada por 2 o más estrategias se presume el costo de la misma no es simplemente la suma algebraica de los costos unitarios de las mismas puesto que algunas estrategias, al estar juntas, podrían apoyarse y hacer más económica la política o podría ocurrir lo contrario y estar en conflicto, haciendo más costosa la política.

Con el fin de evitar sesgos subjetivos en la asignación de los costos para todas las políticas, se diseñó un procedimiento para tal fin. Se contempló una variación porcentual por pares de estrategias cuando estas están juntas en una política. Por tanto, el costo de esta última se calcula como se muestra a continuación (ejemplo para las instancias con 5 estrategias presentadas en la Figura 8):

		Estrategia				
		1	2	3	4	5
Riesgo		J	F	L	E	O
Costo		38	86	11	93	173
		Variación con estrategia				
Estrategia	1		0,4	-0,1	0,3	-0,13
	2			0,32	-0,06	-0,43
	3				-0,4	-0,22
	4					0,45

Figura 8. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias pequeñas

$$C_{\{1\}\epsilon\pi} = 38 \quad (8)$$

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

$$C_{\{1,2\}\epsilon\pi} = 38 + (86 * (1 + 0,4)) = 158,4 \quad (9)$$

En la Ecuación (8) se presenta el costo supuesto de la política que estaría compuesta exclusivamente por la estrategia 1. Sin embargo, cuando la política está compuesta por las estrategias 1 y 2, su costo es el costo unitario de la estrategia 1 más el costo unitario de la estrategia 2 con la variación porcentual por encontrarse en presencia de la primera (40%), así como se presenta en la Ecuación (9).

$$C_{\{1,3\}\epsilon\pi} = 38 + (11 * (1 + (-0,1))) = 47,9 \quad (10)$$

Pero, si la política está compuesta por las estrategias 1 y 3, su costo es el costo unitario de la estrategia 1 más el costo unitario de la estrategia 3 con su respectiva variación porcentual por encontrarse junto con la estrategia 1. Para este caso, a diferencia del anterior, el costo es mejor pues se presume que la estrategia 1 colabora con la 2 (ver Ecuación (10)).

$$\begin{aligned} C_{\{1,2,3\}\epsilon\pi} &= 38 + (86 * (1 + 0,4)) + (11 * (1 + (-0,1))) + (11 * (1 + 0,32)) \\ &= 182,82 \end{aligned} \quad (11)$$

Finalmente, si la política está conformada por las estrategia 1, 2 y 3, su costo es el costo unitario de la estrategia 1, más el costo de la estrategia 2 con su respectiva variación al estar en presencia de 1, más el costo y variación de la estrategia 3 al estar con 1 y el costo y variación de 3 al estar junto con 2 (ver Ecuación (11)).

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

En la Figura 9 y la Figura 10 se presentan el costo de cada estrategia, el riesgo que cada una apunta a gestionar y las variaciones de los costos para cada par de estrategias en las instancias medianas (128 políticas) y grandes (1024 políticas).

		Estrategia						
		1	2	3	4	5	6	7
Riesgo		L	C	G	H	M	K	F
Costo		162	163	34	31	229	108	63
		Variación con estrategia						
Estrategia	1		0,04	0,4	-0,21	-0,12	0,1	0,02
	2			-0,17	-0,18	-0,29	0,09	-0,11
	3				-0,08	-0,19	-0,06	0,29
	4					0,04	-0,13	-0,46
	5						-0,18	-0,1
	6							-0,22

Figura 9. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias medianas

		Estrategia									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Riesgo		E	N	G	F	O	D	K	H	L	I
Costo		31	244	241	66	19	73	156	195	59	126
		Variación con estrategia									
Estrategia	1		0,43	0,07	0,49	0,31	0,46	0,1	0	0,24	-0,18
	2			0,41	-0,25	-0,44	-0,05	0,15	-0,26	-0,15	0,39
	3				0,28	-0,05	-0,41	-0,11	-0,26	-0,15	-0,26
	4					0,2	0,12	-0,21	0,24	0,1	0,38
	5						-0,25	-0,04	0,31	-0,34	0,14
	6							0,18	0,04	0,23	0,02
	7								-0,15	-0,22	-0,16
	8									-0,05	-0,04
	9										0,03

Figura 10. Costos de las estrategias y sus variaciones para las instancias grandes

Apéndice C. Dependencias de los riesgos

Se establecieron tres niveles de dependencia (fortaleza de la relación causa-efecto) para las relaciones entre los riesgos de la red diseñada (ver Figura 4). Sin embargo, para los riesgos considerados “padre” se mantuvo la misma probabilidad de ocurrencia en los tres niveles. Dicha probabilidad de obtuvo de forma aleatoria a partir de una distribución uniforme entre 20% y 30%. De ahí en adelante, las relaciones de causa-efecto se establecieron como se enunció en el capítulo 2.3. Como resultado, a continuación, se presentan las tablas de probabilidad de cada riesgo:

- Nivel bajo:

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
A	0,266	0,734
D	0,205	0,795
E	0,214	0,786
K	0,232	0,768

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
L/J^K	0,887	0,113
L/¬J^K	0,846	0,154
L/J^¬K	0,796	0,204
L/¬J^¬K	0,751	0,249

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
I/C^F^H	0,898	0,102
I/¬C^F^H	0,743	0,257
I/C^¬F^H	0,803	0,197
I/C^F^¬H	0,732	0,268
I/¬C^¬F^H	0,703	0,297
I/¬C^F^¬H	0,675	0,325
I/C^¬F^¬H	0,663	0,337
I/¬C^¬F^¬H	0,661	0,339

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
B/A	0,92	0,08
B/¬A	0,806	0,194
C/B	0,866	0,134
C/¬B	0,802	0,198
G/B	0,853	0,147
G/¬B	0,751	0,249
F/E	0,841	0,159
F/¬E	0,812	0,188
H/D	0,873	0,127
H/¬D	0,743	0,257
J/I	0,832	0,168
J/¬I	0,822	0,178
M/J	0,831	0,169
M/¬J	0,808	0,192
N/K	0,935	0,065
N/¬K	0,808	0,192
O/M	0,908	0,092
O/¬M	0,761	0,239

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Nivel medio:

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
A	0,266	0,734
D	0,205	0,795
E	0,214	0,786
K	0,232	0,768

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
L/J^K	0,907	0,093
L/-J^K	0,514	0,486
L/J^~K	0,509	0,491
L/~J^~K	0,343	0,657

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
I/C^F^H	0,895	0,105
I/~C^F^H	0,489	0,511
I/C^~F^H	0,544	0,456
I/C^F^~H	0,515	0,485
I/~C^~F^H	0,337	0,663
I/~C^F^~H	0,36	0,64
I/C^~F^~H	0,369	0,631
I/~C^~F^~H	0,189	0,811

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
B/A	0,849	0,151
B/~A	0,495	0,505
C/B	0,929	0,071
C/~B	0,486	0,514
G/B	0,896	0,104
G/~B	0,509	0,491
F/E	0,83	0,17
F/~E	0,566	0,434
H/D	0,918	0,082
H/~D	0,525	0,475
J/I	0,886	0,114
J/~I	0,549	0,451
M/J	0,871	0,129
M/~J	0,545	0,455
N/K	0,939	0,061
N/~K	0,553	0,447
O/M	0,916	0,084
O/~M	0,544	0,456

- Nivel alto:

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
A	0,266	0,734
D	0,205	0,795
E	0,214	0,786
K	0,232	0,768

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
L/J^K	0,925	0,075
L/~J^K	0,093	0,907
L/J^~K	0,085	0,915
L/~J^~K	0,021	0,979

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
I/C^F^H	0,875	0,125
I/~C^F^H	0,087	0,913
I/C^~F^H	0,091	0,909
I/C^F^~H	0,089	0,911
I/~C^~F^H	0,022	0,978
I/~C^F^~H	0,022	0,978
I/C^~F^~H	0,022	0,978
I/~C^~F^~H	0,01	0,99

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Riesgo	P(riesgo=Si)	P(riesgo=No)
B/A	0,881	0,119
B/-A	0,083	0,917
C/B	0,939	0,061
C/-B	0,082	0,918
G/B	0,813	0,187
G/-B	0,094	0,906
F/E	0,893	0,107
F/-E	0,094	0,906
H/D	0,896	0,104
H/-D	0,088	0,912
J/I	0,864	0,136
J/-I	0,094	0,906
M/J	0,945	0,055
M/-J	0,089	0,911
N/K	0,938	0,062
N/-K	0,092	0,908
O/M	0,896	0,104
O/-M	0,091	0,909

Estas relaciones son vitales para el cálculo de la matriz de probabilidades para la simulación (matriz en donde se relaciona la probabilidad total de cada riesgo en todas las posibles ocurrencias de los mismos). Sin embargo, para cuando se contempla independencia entre los riesgos, sólo es necesaria la probabilidad total original de cada riesgo. Esto porque la ocurrencia o no de un riesgo no afecta a los demás. Las probabilidades totales para cada nivel de dependencia de los riesgos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Probabilidad total de los riesgos

Riesgo	Nivel de dependencia					
	Bajo		Medio		Alto	
	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)
A	0,2658	0,7342	0,2658	0,7342	0,2658	0,7342
B	0,8363	0,1637	0,5891	0,4109	0,2955	0,7045
C	0,8556	0,1444	0,7471	0,2529	0,3351	0,6649
D	0,2051	0,7949	0,2051	0,7949	0,2051	0,7949

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Riesgo	Nivel de dependencia					
	Bajo		Medio		Alto	
	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)	P(Riesgo=Si)	P(Riesgo=No)
E	0,2142	0,7858	0,2142	0,7858	0,2142	0,7858
F	0,8185	0,1815	0,6221	0,3779	0,2652	0,7348
G	0,836	0,164	0,7371	0,2629	0,3065	0,6935
H	0,7697	0,2303	0,6054	0,3946	0,2538	0,7462
I	0,8262	0,1738	0,5758	0,4242	0,0487	0,9513
J	0,8304	0,1696	0,7426	0,2574	0,1319	0,8681
K	0,2319	0,7681	0,2319	0,7681	0,2319	0,7681
L	0,81	0,19	0,5453	0,4547	0,0695	0,9305
M	0,8268	0,1732	0,787	0,213	0,2023	0,7977
N	0,8376	0,1624	0,6425	0,3575	0,2879	0,7121
O	0,8827	0,1173	0,837	0,163	0,2536	0,7464

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Apéndice D. Resultados de las instancias del modelo en Gams

Tabla 8. Soluciones de Pareto del modelo de optimización

INSTANCIA	Soluciones de Pareto					Riesgos que se gestionan en cada solución				
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
B_0P_5E_PRB_A	27	17	4			JFLE	JFL	L		
B_0P_5E_PRB_B	23	8	4			FLE	JL	L		
B_0P_5E_PIND_A	27	4				JFLE	L			
B_0P_5E_PIND_B	23	8	4			FLE	JL	L		
B_0P_10E_PRB_A	1013	45				GFODKHLI	OL			
B_0P_10E_PRB_B	749	145	45			EFODLI	FOL	OL		
B_0P_10E_PIND_A	1013	145	45	6		GFODKHLI	FOL	OL	O	
B_0P_10E_PIND_B	621	145	45	6		FODHL	FOL	OL	O	
A_0P_5E_PRB_A	31	4				FLEO	L			
A_0P_5E_PRB_B	20	4				JLE	L			
A_0P_5E_PIND_A	31	27	4			FLEO	JFLE	L		
A_0P_5E_PIND_B	23	4				FLE	L			
A_0P_10E_PRB_A	997	961	6			EGFODKHL	GFODKHL	O		
A_0P_10E_PRB_B	583	6				GFODK	O			
A_0P_10E_PIND_A	997	6				EGFODKHL	O			
A_0P_10E_PIND_B	621	142	6			FODHL	FOD	O		
B_1P_5E_PRB_A	27	4				JFLE	L			
B_1P_5E_PRB_B	20	8	4			JLE	JL	L		
B_1P_5E_PIND_A	27	4				JFLE	L			
B_1P_5E_PIND_B	20	8	4			JLE	JL	L		
B_1P_10E_PRB_A	1001	45				EGFOKHLI	OL			
B_1P_10E_PRB_B	507	45				EOHLI	OL			
B_1P_10E_PIND_A	890	681	485	45	6	ENFOKHL	ENFOHL	EFOHL	OL	O
B_1P_10E_PIND_B	485	45	6			EFOHL	OL	O		
A_1P_5E_PRB_A	31	30	20	4		FLEO	JLEO	JLE	L	
A_1P_5E_PRB_B	20	4				JLE	L			
A_1P_5E_PIND_A	27	4				JFLE	L			
A_1P_5E_PIND_B	23	4				FLE	L			
A_1P_10E_PRB_A	1001	911	6			EGFOKHLI	EGFOKHL	O		
A_1P_10E_PRB_B	583	585	6			GFODK	GFODL	O		
A_1P_10E_PIND_A	890	997	6			ENFOKHL	EGFODKHL	O		
A_1P_10E_PIND_B	485	6				EFOHL	O			

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Tabla 9. Valor de los objetivos en cada solución de Pareto

INSTANCIA	Perfil del riesgo en cada solución					Relación Beneficio/Costo en cada solución				
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
B_0P_5E_PRB_A	3,28	3,35	4,62			4,59	6,43	36,2		
B_0P_5E_PRB_B	3,86	4,03	4,62			5,42	15,19	36,2		
B_0P_5E_PIND_A	3,3	4,69				4,52	32,4			
B_0P_5E_PIND_B	3,95	4,05	4,69			5,11	14,96	32,4		
B_0P_10E_PRB_A	2,36	4,11				1,82	11,71			
B_0P_10E_PRB_B	2,92	3,44	4,11			2,67	7,91	11,71		
B_0P_10E_PIND_A	2,58	3,61	4,27	4,91		1,68	7,17	10,22	12,4	
B_0P_10E_PIND_B	2,9	3,61	4,27	4,91		2,62	7,17	10,22	12,4	
A_0P_5E_PRB_A	1,11	1,65				1,28	6,45			
A_0P_5E_PRB_B	1,26	1,65				2,28	6,45			
A_0P_5E_PIND_A	1,3	1,32	1,72			0,91	1,01	2,78		
A_0P_5E_PIND_B	1,42	1,72				1,3	2,78			
A_0P_10E_PRB_A	0,27	0,28	1,41			0,91	1,08	10,59		
A_0P_10E_PRB_B	0,36	1,41				1,55	10,59			
A_0P_10E_PIND_A	0,84	1,65				0,57	3,56			
A_0P_10E_PIND_B	1,02	1,24	1,65			0,81	1,94	3,56		
B_1P_5E_PRB_A	1,98	2,66				4,59	36,2			
B_1P_5E_PRB_B	2,19	2,28	2,66			6,17	15,19	36,2		
B_1P_5E_PIND_A	1,99	2,71				4,52	32,4			
B_1P_5E_PIND_B	2,2	2,29	2,71			6,06	14,96	32,4		
B_1P_10E_PRB_A	1,7	2,54				1,78	11,71			
B_1P_10E_PRB_B	1,97	2,54				2,42	11,71			
B_1P_10E_PIND_A	1,82	1,83	1,9	2,63	3,08	1,53	1,72	2,51	10,22	12,4
B_1P_10E_PIND_B	1,9	2,63	3,08			2,51	10,22	12,4		
A_1P_5E_PRB_A	0,69	0,69	0,72	0,93		1,28	1,44	2,28	6,45	
A_1P_5E_PRB_B	0,72	0,93				2,28	6,45			
A_1P_5E_PIND_A	0,75	0,97				1,01	2,78			
A_1P_5E_PIND_B	0,82	0,97				1,3	2,78			
A_1P_10E_PRB_A	0,21	0,21	0,84			0,9	1,02	10,59		
A_1P_10E_PRB_B	0,29	0,3	0,84			1,55	1,78	10,59		
A_1P_10E_PIND_A	0,62	0,62	0,99			0,45	0,57	3,56		
A_1P_10E_PIND_B	0,65	0,99				0,7	3,56			

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Apéndice E. Graficas de efectos para los resultados del modelo de optimización

A continuación, se muestran las figuras de los efectos principales y sus interacciones en cada uno de los 4 resultados analizados.

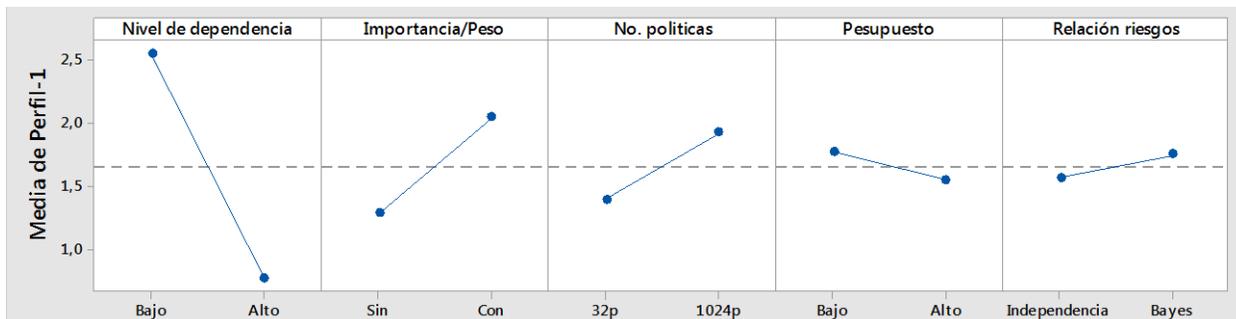
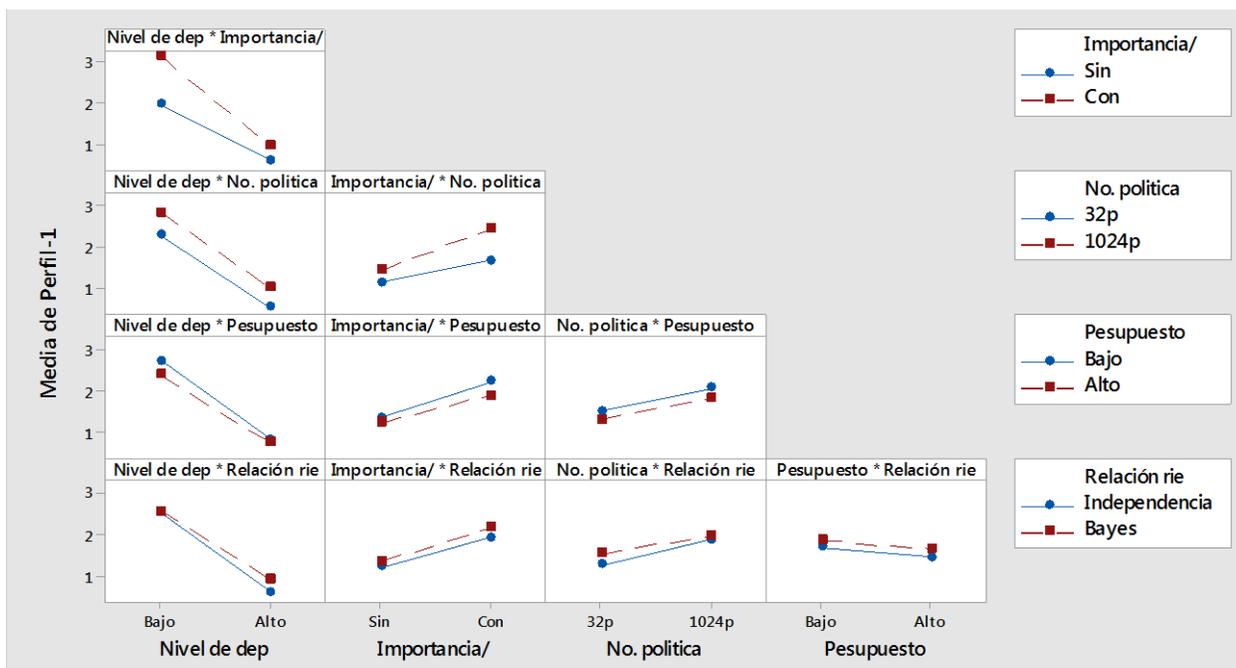


Figura 11. Efectos principales para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando este es optimizado



MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Figura 12. Interacción de los efectos para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando este es optimizado

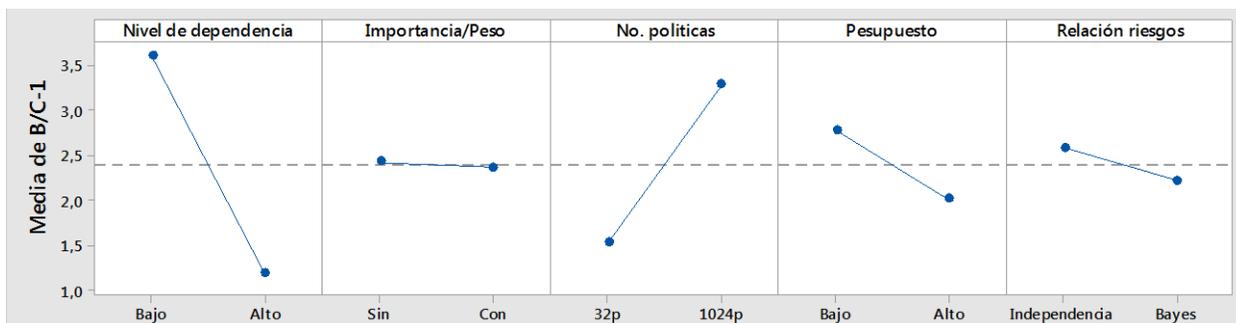


Figura 13. Efectos principales para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando el perfil es optimizado

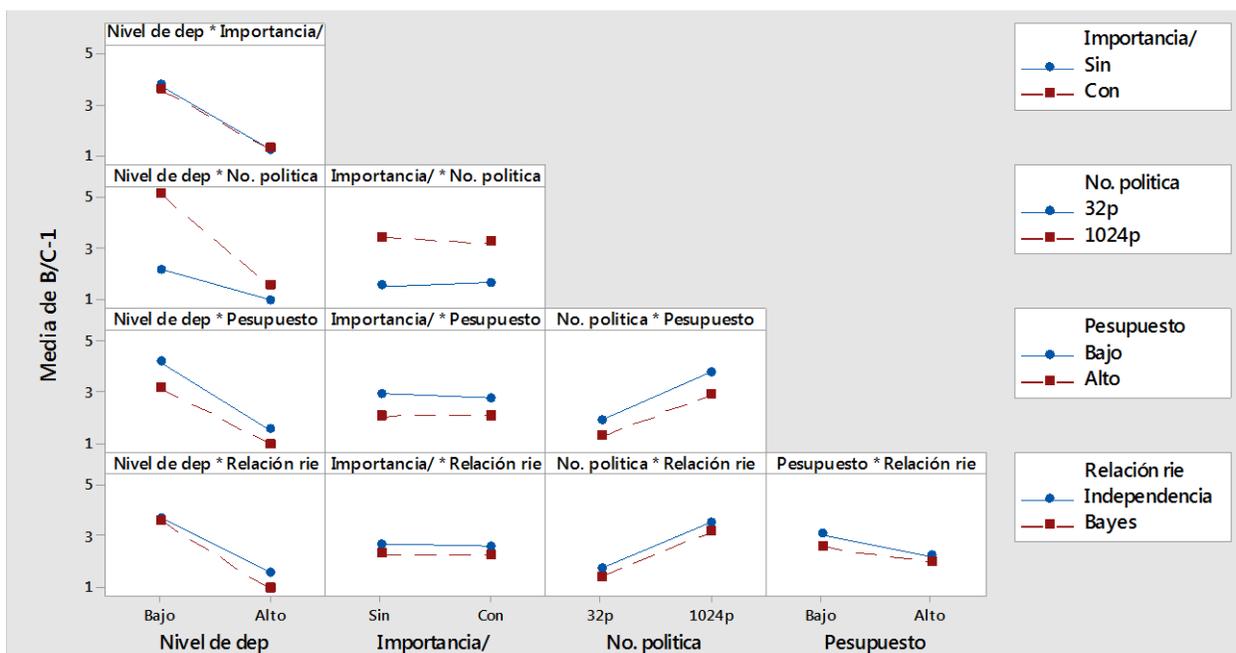


Figura 14. Interacción de los efectos para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando el perfil es optimizado

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRМ

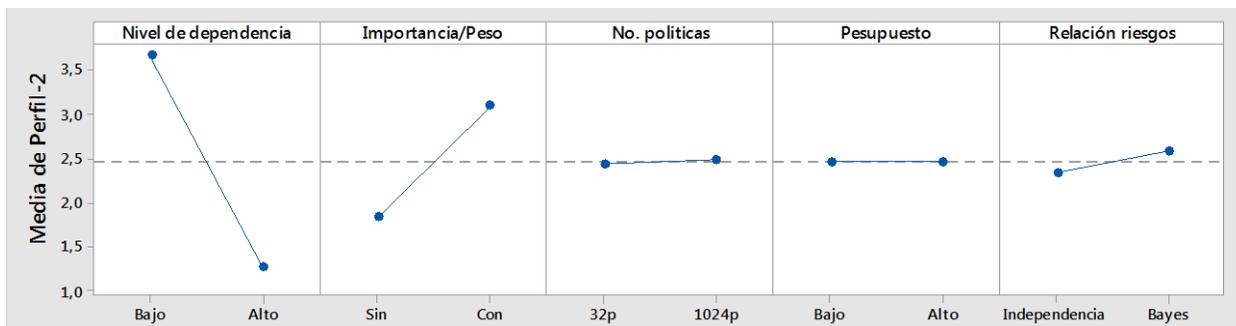


Figura 15. Efectos principales para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando la relación beneficio/costo es optimizado

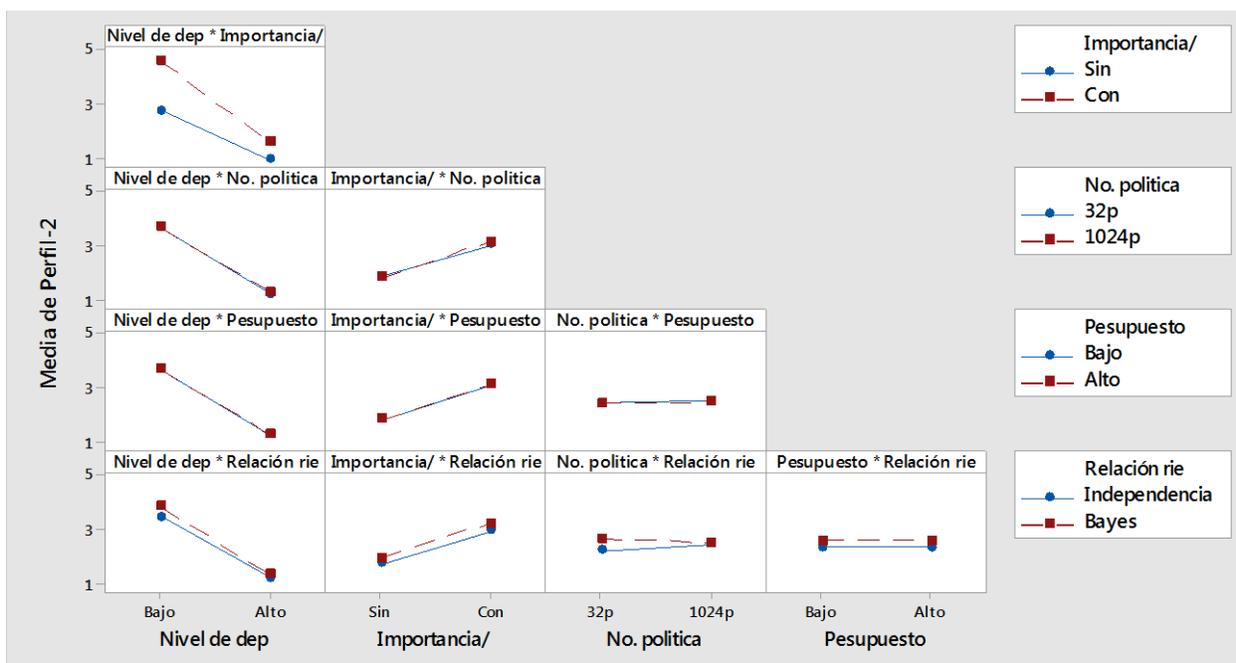


Figura 16. Interacción de los efectos para el objetivo de minimizar el perfil del riesgo cuando la relación beneficio/costo es optimizado

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

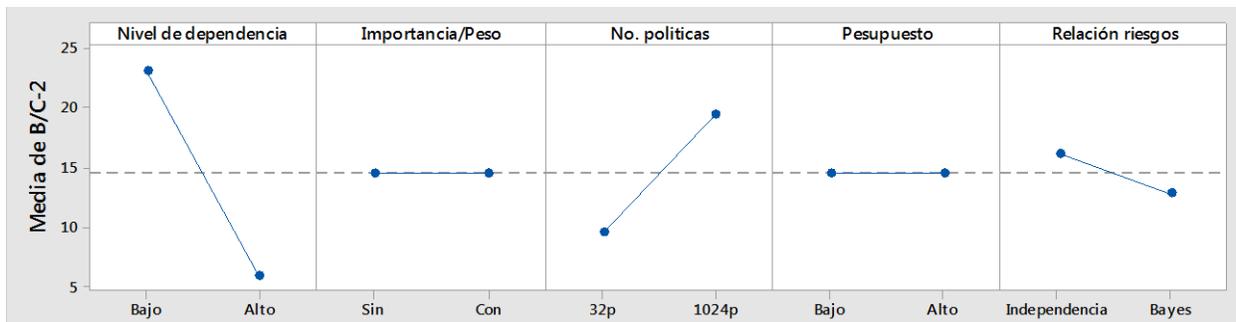


Figura 17. Efectos principales para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando esta es optimizada

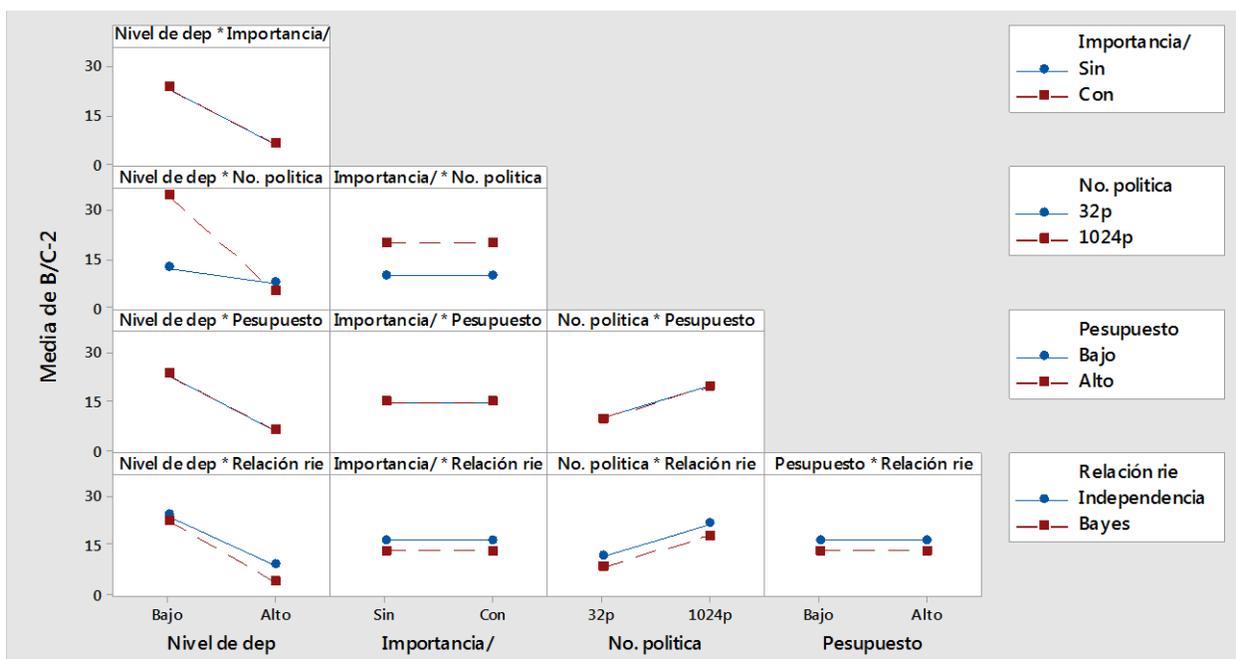


Figura 18. Interacción de los efectos para el objetivo de maximizar la relación beneficio/costo cuando esta es optimizada

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRUM

Apéndice F. Resultado de las simulaciones para cada enfoque

Tabla 10. Promedios resultados de las simulaciones

Nivel de Dependencia	Peso	No. Políticas	Presupuesto	Objetivo	Enfoque 1	Enfoque 2	Enfoque 3
Alta	Con	32	Alta	Perfil	4293,53057	2922,88703	2750,16009
Alta	Con	32	Alta	B/C	4293,53057	3835,20543	3835,20543
Alta	Con	32	Baja	Perfil	4293,53057	3178,35509	3191,03704
Alta	Con	32	Baja	B/C	4293,53057	3835,20543	3835,20543
Alta	Con	1024	Alta	Perfil	4293,53057	2430,0143	2319,43754
Alta	Con	1024	Alta	B/C	4293,53057	4040,54602	4040,54602
Alta	Con	1024	Baja	Perfil	4293,53057	2573,604	2894,55346
Alta	Con	1024	Baja	B/C	4293,53057	4040,54602	4040,54602
Alta	Sin	32	Alta	Perfil	4293,53057	2922,88703	2922,88703
Alta	Sin	32	Alta	B/C	4293,53057	3835,20543	3835,20543
Alta	Sin	32	Baja	Perfil	4293,53057	3178,35509	3191,03704
Alta	Sin	32	Baja	B/C	4293,53057	3835,20543	3835,20543
Alta	Sin	1024	Alta	Perfil	4293,53057	1894,82719	1894,82719
Alta	Sin	1024	Alta	B/C	4293,53057	4040,54602	4040,54602
Alta	Sin	1024	Baja	Perfil	4293,53057	2270,79748	2894,55346
Alta	Sin	1024	Baja	B/C	4293,53057	4040,54602	4040,54602
Baja	Con	32	Alta	Perfil	3825,48551	2483,23638	2483,23638
Baja	Con	32	Alta	B/C	3825,48551	3409,71633	3409,71633
Baja	Con	32	Baja	Perfil	3825,48551	2867,17121	2867,17121
Baja	Con	32	Baja	B/C	3825,48551	3409,71633	3409,71633
Baja	Con	1024	Alta	Perfil	3825,48551	2123,56448	2014,40175
Baja	Con	1024	Alta	B/C	3825,48551	3562,85977	3149,1172
Baja	Con	1024	Baja	Perfil	3825,48551	2560,5558	2265,61806
Baja	Con	1024	Baja	B/C	3825,48551	3562,85977	3149,1172
Baja	Sin	32	Alta	Perfil	3825,48551	2483,23638	2483,23638
Baja	Sin	32	Alta	B/C	3825,48551	3409,71633	3409,71633
Baja	Sin	32	Baja	Perfil	3825,48551	2835,6116	2835,6116
Baja	Sin	32	Baja	B/C	3825,48551	3409,71633	3409,71633
Baja	Sin	1024	Alta	Perfil	3825,48551	1722,32067	1722,32067
Baja	Sin	1024	Alta	B/C	3825,48551	3562,85977	3149,1172
Baja	Sin	1024	Baja	Perfil	3825,48551	1974,47148	1993,34753
Baja	Sin	1024	Baja	B/C	3825,48551	3562,85977	3149,1172

Apéndice G. Archivos Instancias

Cada uno de los archivos de MS Excel de las instancias de prueba que fueron usadas en el modelo de optimización contiene 6 hojas con diferente información de entrada necesaria para el modelo (ver Figura 19): costos, prob0, prob, perfil, benef, presup.

- Costos: contiene el costo de cada una de las políticas de que trata la instancia. La columna A indica el número de la política y la columna B contiene el costo de dicha política.
- Prob0: contiene la probabilidad total inicial de cada uno de los riesgos. Dicho valor hace referencia a la posibilidad de que el riesgo ocurra si un plan de SCRM no ha sido implementado.
- Prob: contiene la matriz de probabilidades totales de ocurrencia de cada uno de los riesgos en cada una de las diferentes políticas. Cada columna corresponde a un riesgo y cada fila a una política.
- Perfil: se encuentra almacenado de forma horizontal el perfil de la cadena de suministros en cada política.
- Benef: contiene el beneficio total esperado de cada política. Donde el beneficio se define como el costo reducido a partir de la situación inicial.
- Presup: se indica el valor del presupuesto con que cuenta la instancia para la gestión de los riesgos.

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	1	0,0001															
2	2	38															
3	3	86															
4	4	11															
5	5	93															
6	6	173															
7	7	158,4															
8	8	47,9															
9	9	158,9															
10	10	188,51															
11	11	100,52															
12	12	179															
13	13	259															
14	14	61,22															
15	15	184															
16	16	231,4															
17	17	171,82															
18	18	279,3															

Figura 19. Hojas de un libro de datos para cada instancia

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

Apéndice H. Archivos Escenarios de Simulación

Cada uno de los archivos de MS Excel de los escenarios de simulación que fueron escogidos para comprobar la hipótesis de investigación contiene 3 hojas (prob, impactos, mprob) con diferente información necesaria para emular la ocurrencia de los riesgos en los diferentes enfoques de gestión (ver Figura 20):

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	0,263	0,292	0,331	0,202	0,211	0,261	0,304	0,25	0,039	0,101	0,2	0	0,176	0,261	0,232								
2	1	0,88	0,835	0,199	0,208	0,257	0,726	0,245	0,074	0,128	0,195	0	0,199	0,257	0,251								
3	0,793	1	0,938	0,198	0,208	0,256	0,813	0,244	0,081	0,133	0,194	0	0,203	0,256	0,254								
4	0,664	0,828	1	0,198	0,207	0,255	0,69	0,244	0,086	0,136	0,193	0	0,206	0,255	0,257								
5	0,259	0,287	0,324	1	0,206	0,254	0,3	0,894	0,094	0,143	0,192	0	0,211	0,254	0,261								
6	0,259	0,287	0,325	0,197	1	0,891	0,3	0,243	0,091	0,14	0,193	0	0,209	0,255	0,259								
7	0,259	0,286	0,323	0,197	0,721	1	0,3	0,242	0,1	0,147	0,191	0	0,215	0,253	0,264								
8	0,629	0,781	0,751	0,2	0,209	0,257	1	0,246	0,068	0,123	0,196	0	0,195	0,257	0,248								
9	0,259	0,286	0,323	0,724	0,206	0,253	0,3	1	0,103	0,149	0,191	0	0,217	0,253	0,266								
10	0,5	0,608	0,726	0,487	0,492	0,668	0,532	0,659	1	0,825	0,059	0	0,795	0,141	0,731								
11	0,332	0,384	0,446	0,285	0,293	0,38	0,371	0,369	0,319	1	0,024	0	0,945	0,112	0,852								
12	0,257	0,283	0,32	0,194	0,203	0,249	0,298	0,238	0,011	0,012	1	0	0,1	0,938	0,171								
13	0,297	0,338	0,388	0,243	0,252	0,319	0,337	0,308	0,177	0,543	0,114	0	1	0,188	0,896								
14	0,259	0,286	0,324	0,197	0,206	0,254	0,3	0,242	0,021	0,043	0,719	0	0,127	1	0,193								
15	0,284	0,32	0,366	0,227	0,236	0,297	0,324	0,286	0,123	0,371	0,147	0	0,678	0,216	1								
16	1	1	0,938	0,198	0,208	0,256	0,813	0,244	0,081	0,133	0,194	0	0,203	0,256	0,254								
17	1	0,988	1	0,198	0,207	0,255	0,805	0,244	0,086	0,136	0,193	0	0,206	0,255	0,257								
18	1	0,877	0,83	1	0,197	0,24	0,724	0,892	0,195	0,219	0,177	0	0,277	0,242	0,313								

Figura 20. Hojas de un libro de datos para cada escenario de simulación

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS EN SCRM

- Prob: almacena la probabilidad total inicial de cada riesgo en ese escenario bajo el correspondiente enfoque.
- Impactos: contiene el impacto esperado de cada uno de los riesgos.
- Mprob: presenta la matriz de probabilidades totales esperadas para cada riesgo en cada una de las posibilidades de combinación de ocurrencia de los mismos a lo largo de la simulación.