

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Administración de la cadena de suministros

**MODELOS DE NEGOCIACIÓN COOPERATIVOS EN CADENAS DE
SUMINISTROS DE DOS NIVELES, PRODUCTOR-COMPRADOR, A TRAVÉS
DEL ESQUEMA DE ÉPOCAS COMUNES DE RESURTIDO (CRE)**

Estudiante: José Luis Velásquez Riobó

Código: 201014211

Asesor: Jose Fidel Torres Delgado

Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería

Tesis de grado 2 – Primer semestre 2016

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	OBJETIVOS.....	4
2.1.	Objetivo General	4
2.2.	Objetivos Específicos	4
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	5
4.	METODOLOGÍA	6
5.	MARCO TEÓRICO	7
5.1.	Estrategias de coordinación de inventarios	7
5.1.1.	Modelo de Épocas Comunes de Resurtido (CRE)	9
5.1.2.	Modelo de Inventario Administrado por el Proveedor (VMI)	11
5.1.3.	Modelo de Desarrollo Conjunto de Órdenes (DCO)	12
6.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	14
6.1.	Notaciones y supuestos	14
6.2.	Modelos matemáticos.....	15
6.2.1.	Modelo 1. Modelo con el proveedor como líder absoluto.	15
6.2.2.	Modelo 2. Modelo con el comprador como líder absoluto.	16
6.2.3.	Modelo 3. Integración completa de la cadena de suministros.	17
6.2.4.	Modelo 4. Negociación entre el proveedor y el comprador con el primero como líder (Juego de Stackelberg).....	18
6.2.5.	Modelo 5. Negociación entre el proveedor y el comprador con el segundo como líder (Juego de Stackelberg).....	18
7.	ESTUDIO NUMÉRICO.....	19
8.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	21
8.1.	Escenario para la variación de $H B_i, t$	22
8.2.	Escenario para la variación de $K B_i, t$	27
8.3.	Escenario para la variación de $H P_i, t$	31
8.4.	Escenario para la variación de $K P_i, t$	35
8.5.	Escenario para la variación de $K T_i, t$	37
9.	ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE LA DEMANDA.....	39
10.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	41
11.	BIBLIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCIÓN

La cadena de suministros está compuesta por todas aquellas partes, ya sean directas o indirectas, que se encuentran relacionadas con el objetivo final de satisfacer las necesidades del cliente. Las partes de dicha cadena no son solamente los fabricantes y los proveedores como comúnmente se piensa, sino también transportadores, almacenistas, minoristas e inclusive los mismos clientes. Con el objetivo de poder lograr el mejor funcionamiento posible de esta cadena, se hace necesaria una correcta administración de la misma mediante la planeación y control del flujo de productos, información y fondos por parte de los agentes involucrados para así maximizar los beneficios del sistema (Chopra & Meindl, 2007). En la búsqueda de poder mejorar permanentemente el rendimiento de la cadena de suministros, en los últimos años se han desarrollado múltiples modelos de integración y coordinación que resultan ser muy efectivos.

Actualmente, uno de los modelos más conocidos de coordinación es la denominada Época de Reposición Común o CRE (por sus siglas en inglés: Common Replenishment Epochs). De acuerdo a Viswanathan y Piplani (2001). El sistema CRE se define como un modelo en el que un vendedor distribuye un producto a varios compradores, a través de la definición de órdenes de reabastecimiento para el producto en específicos momentos de tiempo y es necesario que estos últimos estén sujetos a dichos periodos. Para que esto suceda, el vendedor debe ofrecer un descuento para compensar los incrementos en los costos de mantener en inventario que asumen los compradores.

De esta manera, los autores modelan la situación del CRE como el juego de Stackelberg, donde el líder del juego (el vendedor) toma la primera decisión (el valor del descuento y el periodo de reabastecimiento) para que el comprador o seguidor tome su decisión propia. Dado que los parámetros de costos del comprador y la demanda son previamente conocidos, entonces el vendedor puede anticiparse a la reacción del comprador para tomar una decisión óptima.

El modelo de coordinación de inventarios CRE propuesto por primera vez por Viswanathan y Piplani (2001), ha tenido un desarrollo importante en la última década debido a que más allá de las modificaciones que se le han hecho (ver por ejemplo Yao y Chiou, 2009; Hwang, y Wu, 2013 o los mismos Piplani y Viswanathan, 2004), muchos autores reconocen los múltiples beneficios que ofrece en cuanto a una mejora en la administración de la cadena de suministros. Por medio de la implementación de la estrategia CRE, se puede lograr que el vendedor consolide una mayor cantidad de órdenes de reabastecimiento, sin necesidad

de estar procesando órdenes de cada comprador por separado y de esta manera se puedan economizar los costos de procesamiento y envío de órdenes. Adicionalmente los compradores se benefician en cuanto no tienen que incurrir en costos de transporte y sólo se deben preocupar por los costos de ordenar y de mantener en inventario (este último se ve reducido por la bonificación ofrecida por el proveedor).

Reconociendo la importancia del modelo CRE desarrollado en los últimos años, es necesario destacar que todavía son muchos los avances e innovaciones que se pueden generar dentro de este modelo de inventarios, debido a que la literatura existente con respecto al tema no es tan extensa. Por lo anterior, este trabajo busca presentar una innovadora metodología para abordar el tema en cuestión, incluyendo un importante análisis de teoría de juegos dónde se pueda examinar los beneficios de la coordinación de la cadena de suministros mediante cinco modelos diferentes: juego donde tanto el proveedor y el cliente pueden ser líderes absolutos y el otro actor se ve obligado a seguirlo (a pesar de que los costos no lo favorezcan), modelo cooperativo (juego de Stackelberg) donde a pesar que tanto el proveedor como el cliente pueden ser líderes, ambos estén dispuestos a negociar y por último, un modelo integrado donde se minimizan conjuntamente y de manera simultánea los costos del proveedor y el cliente.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Desarrollar y proponer múltiples modelos que junto a la teoría de juegos permitan estudiar y analizar los beneficios de coordinar la cadena de suministros multi-producto, compuesta por un sólo productor y comprador, a través del uso de la metodología de las Épocas Comunes de Resurtido.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar y comprender las principales estrategias para la coordinación de inventarios en la cadena de suministros, haciendo énfasis en el modelo CRE.
- Identificar los principales supuestos, variables de decisión y parámetros que componen un modelo de inventarios CRE.
- Diseñar los modelos que representen de manera adecuada el comportamiento no sólo individual, sino también en conjunto de los agentes en la cadena de suministros bajo un esquema CRE.

- Implementar los modelos propuestos a través de diversos escenarios teóricos, donde se puedan construir análisis de sensibilidad sobre los parámetros.
- Desarrollar un análisis de los resultados obtenidos para los costos totales de la cadena de suministros, comparando los diversos impactos sobre las decisiones de los agentes.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con Jiménez (2005), la mayor eficiencia posible en cuanto a la administración de la cadena de suministros está asociada a la coordinación entre las diferentes partes que la componen, esto con el fin de maximizar el beneficio total de la cadena. En el momento en que no se contemple la coordinación y en contraparte, cada uno de los agentes de la cadena se preocupe por maximizar su función de utilidad propia, los costos totales del sistema crecen de manera exponencial. Las grandes ventajas de integrar la cadena de suministros están asociadas con la reducción de tiempos de entrega, mayor confiabilidad de los envíos, reducción de costos, mejoramiento en la programación de la producción y los transportes, etc.

Una de las principales limitaciones que cuentan los modelos actuales aplicados a la cadena de suministros es que la integración de la misma no se evalúa de manera muy profunda. Lo anterior, en razón a que muchos sugieren que la posibilidad de llegar a un acuerdo entre agentes es prácticamente imposible debido a la falta de confianza y la creciente competitividad actual (Viswanathan & Piplani, 2001). Adicional a lo anteriormente dicho, se ha demostrado que la solución propuesta para enfrentar el modelo de la estrategia CRE, fundamentado en el juego de Stackelberg, no necesariamente provee el mejor resultado posible en la cadena de suministros y además sus resultados suelen favorecer de manera lejana únicamente al proveedor.

Otro de los importantes obstáculos que enfrentan la mayoría de estudios actuales, es que el estudio del modelo CRE se ha presentado de acuerdo a una completa dominación por parte del vendedor dentro del sistema general de la cadena de suministros. De esta forma, se hace necesario poder examinar otras posibles realidades de la industria, en las que no sólo el proveedor puede ser el agente dominante, sino también los compradores. Así, vale la pena identificar las posibles negociaciones tanto de comprador a vendedor o viceversa con relación a los tamaños de lote, periodos de reabastecimiento y además bonificaciones que permitan la cooperación entre los agentes.

Por último, vale la pena destacar que la mayoría de estudios en el campo de la metodología CRE, están encaminados a modelos de único producto cuyas demandas son determinísticas pero al mismo tiempo constantes (Jiménez, 2005). Por lo anterior, es una limitación no poder conocer la manera en que los agentes de la cadena toman decisiones cuando se enfrentan a escenarios donde existen múltiples productos cuyas demandas son determinísticas y dinámicas en el tiempo.

4. METODOLOGÍA

A fin de poder cumplir con los diferentes objetivos planteados para esta investigación, se propone llevar a cabo los siguientes pasos: revisión de la literatura, identificación de las variables clave, construcción de los modelos matemáticos, implementación práctica de los modelos, validación de los resultados y por último, análisis y conclusiones. De acuerdo a lo anteriormente dicho, a continuación se presenta un diagrama sobre la metodología propuesta:

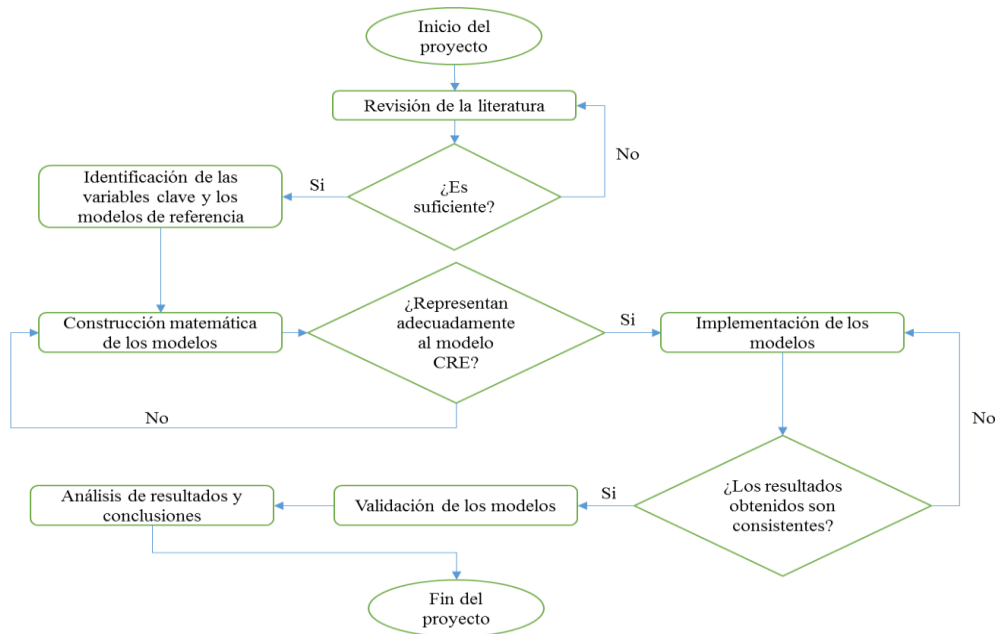


Ilustración 1. Marco metodológico

En una primera medida, es importante realizar una exhaustiva revisión de literatura que permita establecer un marco claro sobre los diferentes modelos de inventarios (haciendo énfasis en el modelo CRE) que proponen la integración de la cadena de suministros. Luego de construir un estado del arte acerca de la temática en cuestión, se busca posteriormente identificar las variables más relevantes con el objetivo de realizar una adecuada aproximación al momento de la construcción de los modelos matemáticos.

A continuación, es necesaria una implementación computacional de los modelos con el fin de estudiar su funcionamiento y poder entender si estos están en capacidad de representar la realidad de manera adecuada. A través de los resultados obtenidos luego de la construcción computacional de los modelos, se espera validar y verificar de manera formal que los modelos si buscan integrar la cadena de suministros mediante la guía del modelo CRE. Finalmente, con los modelos matemáticos y computacionales ya validados, se desarrollarán múltiples instancias que permitan formalizar los últimos análisis y conclusiones sobre el estudio y los objetivos propuestos.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Estrategias de coordinación de inventarios

En cualquier compañía, el correcto manejo y administración de los inventarios juega un papel fundamental en el proceso de cumplimiento de la demanda, incremento de los niveles de servicio (probabilidad de no llegar a una situación de desabastecimiento), la satisfacción final del cliente, entre otros. Si bien todos estos indicadores son de vital importancia para la empresa, es necesario siempre tener en consideración uno de los aspectos más significativos: el económico o financiero.

El aspecto económico es sin lugar a duda uno de los elementos más importantes en cualquier organización, puesto que en la mayoría de los casos el objetivo final de toda firma es generar valor, es decir, maximizar las utilidades percibidas para cada una de sus partes. Por lo anterior y sabiendo que la reducción de los costos propicia un incremento en las utilidades, es necesario establecer que una apropiada gestión de los inventarios conlleva a un adecuado rendimiento financiero.

Los costos asociados al manejo de inventarios se pueden catalogar principalmente en seis grupos (Slack, Brandon-Jones, & Johnston, 2011):

1. Costo de colocación de una orden: Cada vez que una orden es realizada para incrementar los niveles de inventario, se incurren en costos relacionados con: la preparación de toda la documentación necesaria, la gestión de los procesos de entrega de la orden, los pagos realizados al proveedor por la entrega del pedido y también los procesos respectivos de manejos informáticos de la información de inventario.

2. Costos asociados a los descuentos: En múltiples industrias los proveedores ofrecen descuentos sobre las cantidades que venden a sus clientes siempre y cuando éstas sean lo suficientemente grandes o pequeñas según sea el caso.
3. Costos por faltantes: Cada vez que el inventario se acaba y por tanto la empresa no cuenta con el *Stock* suficiente para satisfacer la demanda de sus clientes, incurre en ciertos costos que pueden verse como pérdida de imagen, costo de oportunidad, entre otros.
4. Costos por capital de trabajo: Durante el tiempo en el que una orden se encuentra en inventario, se incurre en un costo conocido como capital de trabajo el cual corresponde a poder usar el dinero de dicho pedido (que se encuentra en bodega) en otra cosa.
5. Costos de almacenamiento: Son los costos asociados al mantenimiento físico en la bodega de cierto producto. En este rubro se incluyen por ejemplo costos de arriendo de la bodega, servicios de luz o agua, seguridad, etc.
6. Costos por obsolescencia: Con el tiempo los productos se van dañando en la bodega o sencillamente van perdiendo su vida útil. Por lo anterior, después de cierto tiempo se incurre en el costo de esas unidades que ya no sirven para nada.

De acuerdo a lo previamente descrito, se ratifica necesariamente la permanente búsqueda para muchas organizaciones de tener una correcta gestión de los inventarios, con el fin de garantizar la mayor competitividad posible en el mercado minimizando sus costos.

En el proceso de encontrar la correcta gestión de los inventarios, se ha venido desarrollando un interés significativo por la coordinación de los mismos, de manera que todos los eslabones de una cadena de suministro (proveedor/productor, cliente/minorista) se alineen con el objetivo final de poder entregar los mejores resultados económicos a la compañía. Algunas de las más importantes estrategias de coordinación de inventarios son: Desarrollo conjunto de órdenes (DCO), Justo a tiempo (JIT), Respuesta rápida (QR), Reaprovisionamiento Eficiente (RE), Reaprovisionamiento Continuo (CR), Planeación, Pronóstico y Reabastecimiento Colaborativo (CPFR), Inventario Administrado por el Proveedor (VMI), Gestión de la Disponibilidad por el Proveedor (SMA) y Épocas Comunes de Resurtido (CRE).

Dadas las necesidades de la presente investigación y reconociendo las afinidades de algunos modelos de coordinación de inventarios a los objetivos propuestos, a continuación se presenta un estado del arte sobre aquellos modelos que son relevantes para el problema en cuestión: Épocas Comunes de Resurtido, Inventario Administrado por el Proveedor y Desarrollo Conjunto de Órdenes.

5.1.1. Modelo de Épocas Comunes de Resurtido (CRE)

La estrategia CRE (Common Replenishment Epochs) fue desarrollada por primera vez por los autores Viswanathan y Piplani en el año 2001. Para su trabajo, ellos proponen una cadena de suministros compuesta por un único vendedor, múltiples compradores y adicionalmente un único producto. La principal idea de su estudio es que el vendedor, el cual tiene un poder de negociación mucho mayor que el de los compradores, determine un ciclo de reabastecimiento fijo para cada comprador (no necesariamente debe ser el mismo para todos) de manera que el primero pueda minimizar sus costos de alistamiento, de transporte y de mantenimiento de inventario. A cambio de aceptar dichos periodos de reabastecimiento, el proveedor ofrece un descuento en el precio de los productos, el cual debe compensar el aumento en los costos de mantener inventario que asumen los compradores. Existe la posibilidad en que el comprador decida no aceptar los periodos de reabastecimiento, porque la compensación económica recibida no es lo suficientemente favorable.

Una de las grandes ventajas de la estrategia CRE, es que el vendedor al contar con periodos de reabastecimiento fijos, puede consolidar una mayor cantidad de órdenes y de esta forma puede economizar en los costos de procesamiento y envío de las mismas. En términos de los mismos autores, la estrategia puede ser comparada con el juego de Stackelberg en donde el líder del juego (el proveedor) toma la primera decisión acerca de la cantidad del descuento y los periodos de reabastecimiento, y el seguidor (el comprador) actúa de acuerdo a la decisión del líder e implementa su propia decisión respecto a la política de inventarios (Viswanathan y Piplani, 2001).

Luego de una amplia revisión de literatura, a continuación se presenta un resumen con algunos de los trabajos más destacados en el ámbito académico con respecto al tema de Épocas Comunes de Resurtido:

Autor(es) del documento	Año de publicación	Tipo de demanda	Estructura de costos		Observaciones adicionales
			Cliente	Vendedor ¹	
Viswanathan y Piplani	2001	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento	Juego de Stackelberg donde el Proveedor es el primer jugador.
Chang y Tsai	2003	Determinista y constante	Ordenar, mantener y reposición	Alistamiento y transporte	
Mishra	2003	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento	El proveedor hace descuentos selectivos de acuerdo al cliente y puede que hasta no haga propuestas a algunos.
Piplani y Viswanathan	2004	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento	El proveedor propone dos posibles CRE para que los clientes escojan al menos uno.
Feng y Viswanathan	2007	Estocástica	Ordenar y mantener	Alistamiento	Se establece un nivel de servicio para el cliente sobre el cual él optimiza sus decisiones.
Hwang, Wu y Huang	2008	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento	Relaja varios supuestos del modelo original. Los costos de inventario son compartidos por el proveedor y el cliente.
Yao y Chiu	2009	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento	Todos los compradores están dispuestos a cooperar. Solución óptima a través de un algoritmo.
Hwang y Wu	2013	Determinista y constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y transporte	Programación entera mixta para la minimización de costos del proveedor.

Tabla 1. Resumen sobre las investigaciones más destacadas de la estrategia CRE.

Además de lo mostrado en el anterior cuadro de resumen para las diferentes investigaciones, es necesario agregar que todos ellos tienen en común los siguientes supuestos: usan un único producto, el horizonte de planeación es infinito, el precio del producto es constante en el tiempo y la cadena de suministros está compuesta por un vendedor y varios clientes.

La mayoría de los estudios en la literatura sobre la coordinación de inventarios en la cadena de suministros (específicamente sobre la metodología CRE), trabajan con el supuesto de demanda determinística y constante en un marco donde el vendedor siempre es el líder en

¹ El vendedor compra el producto de un tercero mediante una estrategia lote a lote, razón por la cual no es necesario incurrir en costos de mantener en inventario para este agente de la cadena de suministro.

el canal de distribución. De acuerdo a la revisión de literatura, la siguiente investigación no sólo es una de las primeras en explorar el impacto de la demanda dinámica sobre el modelo de CRE, sino también en analizar la dominancia por parte del comprador en la cadena de suministros. De igual manera, esta investigación establece un cambio fundamental en la manera como se aborda este problema: el vendedor está en la capacidad de producir el mismo las unidades que se venden a sus compradores y por lo tanto incurre en costos de mantenimiento de inventario.

5.1.2. Modelo de Inventario Administrado por el Proveedor (VMI)

La estrategia conocida como Inventario Administrado por el Proveedor (VMI, por sus siglas en inglés), es una de las estrategias de coordinación de inventarios más aceptadas en la literatura y se encuentra caracterizada porque el proveedor es autorizado a manejar los inventarios de sus clientes, a partir de la información que estos últimos le suministran con respecto a la demanda. Bajo esta estrategia, el proveedor tiene la libertad de tomar las decisiones de reabastecimiento sobre las cantidades y el tiempo de suministro en lugar del comprador.

A pesar de ser muy similar al modelo CRE, la estrategia VMI se diferencia en un aspecto fundamental: mientras que en el modelo VMI el proveedor se hace cargo de los costos de mantener en inventario del comprador, en el CRE, el vendedor ofrece descuentos al comprador a cambio de que este último se haga cargo del costo de sus propios inventarios. Si bien se ha demostrado que en el modelo CRE, el vendedor es ampliamente beneficiado en términos de costos debido a su amplio poder de negociación, en el VMI es común creer que éste se encuentra en desventaja por incurrir en los costos de inventarios de terceros, sin embargo, algunos autores proponen que este esquema permite una consolidación más organizada y favorable de los inventarios para la planeación del proveedor (Dong & Xu, 2002)

Uno de los aspectos más importantes y revolucionarios de este modelo, es que es una iniciativa de comercio colaborativo dónde todos los eslabones de la cadena de suministros están dispuestos a la cooperación y de esta manera comparten la información necesaria (sin miedo a verse perjudicado) con el fin de reducir costos y aumentar competitividad (Villa Marulanda & Torres Delgado, 2012).

A continuación se presenta un resumen con algunos de los trabajos más destacados con respecto al tema de Inventario Administrado por el Proveedor:

Autor(es) del documento	Año de publicación	Tipo de demanda	Estructura de costos		Observaciones adicionales
			Cliente	Proveedor	
Dong, et al	2001	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Se examina teoría de juegos (competencia de Stackelberg) para los casos en que tanto cliente como proveedor son líderes.
Yao, Evers y Dresner	2005	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Beneficios a nivel comparativo al usar o no la metodología VMI.
Yu, Liang y Huang	2006	Determinista constante	Adquisición y mantener	Mantener, producción y transporte	Modelo que examina el equilibrio de Stackelberg mediante un modelo clásico VMI con capacidad de producción para el proveedor.
Yu, Huang y Liang	2008	Determinista dinámica	Adquisición, inversión en publicidad y mantener	Producción, transporte, publicidad y mantenimiento	Se desarrolla un algoritmo para encontrar el equilibrio de Stackelberg con el proveedor como líder.
Yu y Huang	2010	Determinista constante	Adquisición, inversión en publicidad y mantener	Producción, transporte, publicidad y mantenimiento	El problema es modelado como un modelo no-cooperativo simultáneo con dos sub-juegos (Juego dual de Nash).
Marulanda y Torres	2012	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Uso de teoría de juegos para examinar un modelo VMI cooperativo y no cooperativo.
Yu, Wang y Liang	2012	Determinista constante	Ordenar, mantener y deterioro	Mantener y deterioro (Materia prima)	Desarrollo del modelo clásico VMI con el posible deterioro de productos en el inventario.

Tabla 2. Resumen sobre las investigaciones más destacadas de la estrategia VMI.

Además de lo mostrado en la anterior tabla de resumen para las diferentes investigaciones, es necesario agregar que todas ellas tienen en común los siguientes supuestos: usan un único producto (a excepción del trabajo de Yu y Huang), el horizonte de planeación es infinito (a excepción del trabajo Dong, et al. y el de Yu, Huang y Liang), el precio del producto es constante en el tiempo y la cadena de suministros está compuesta por un proveedor y un cliente (a excepción del trabajo Yu, Wang y Liang, el de Yu y Huang y los de Yu, Huang y Liang).

La revisión de literatura de estos modelos es de vital importancia, debido a que por lado el modelo VMI tiene muchas similitudes con el modelo CRE y por otro los enfoques relacionados con la teoría de juegos presentados en algunos de estos estudios harán parte de los modelos propuestos.

5.1.3. Modelo de Desarrollo Conjunto de Órdenes (DCO)

La estrategia de desarrollo conjunto de órdenes (DCO), es uno de los primeros y más clásicos estudios para la coordinación de inventarios. Dentro de su enfoque, se busca la

uniformidad en los tamaños de lote de producción por parte del proveedor y los tamaños de lote de pedido por parte del cliente. La estrategia que lleva a la solución de este modelo de inventarios está direccionada a favor de aquel agente con mayor poder de negociación y el de menor poder, emplea sus propias decisiones a fin de lograr un equilibrio. En términos prácticos, este tipo de estrategia sigue el modelo clásico de lote económico de pedido (EOQ), el cual siempre es complementado con algún mecanismo de coordinación.

A continuación se presenta un resumen con algunos de los trabajos más destacados en el ámbito académico con respecto al tema de Desarrollo Conjunto de Órdenes:

Autor(es) del documento	Año de publicación	Tipo de demanda	Estructura de costos		Observaciones Adicionales
			Cliente	Proveedor	
Goyal	1976	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento, mantenimiento y transporte	Mediante la cooperación (descuento del proveedor), se alcanza un tamaño de lote que minimiza los costos totales de la cadena de suministros.
Monahan	1986	Determinista constante	Ordenar, adquisición y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Encontrar los esquemas de descuentos óptimos para que el proveedor maximice sus ganancias.
Benerjee	1986	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Se establece que la cooperación entre partes permite el beneficio de ambos o al menos ninguno pierde.
Goyal y Gupta	1989	En este documento se presenta de manera detallada, una metodología para la clasificación de modelos DCO de acuerdo a la literatura existente.			
Lu ²	1995	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento.	Método heurístico para la solución del problema de manera aproximada.
Sucky	2003	Determinista constante	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Algoritmo para establecer los contratos óptimos entre partes. Información asimétrica (proveedor desconoce los costos del cliente)
Ben-Daya y Hariga	2004	Estocástica	Ordenar y mantener	Alistamiento y mantenimiento	Algoritmo para la solución del problema sin garantizar el óptimo. Se contempla un lead time en la llegada del pedido para el cliente.

Tabla 3. Resumen sobre las investigaciones más destacadas de la estrategia DCO.

² Este trabajo en particular, difiere un poco del resto debido a que el modelo de inventarios que plantea contiene: múltiples productos, la cadena de suministros se compone de un proveedor y varios clientes y tiene un horizonte finito de planeación.

Además de lo mostrado en el anterior cuadro de resumen para las diferentes investigaciones, es necesario agregar que todos ellos tienen en común los siguientes supuestos: usan un único producto, el horizonte de planeación es infinito (a excepción del trabajo de Ben-Daya y Hariga), el precio del producto es constante en el tiempo y la cadena de suministros está compuesta por un proveedor y un cliente.

Es importante la revisión de literatura de estos modelos, debido a que se piensa implementar como parte del trabajo un modelo integrado donde ambos eslabones de la cadena están dispuestos a trabajar conjuntamente.

6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

6.1. Notaciones y supuestos

Para la definición del problema, sea \mathcal{P} el conjunto de productos; \mathcal{T} el conjunto de periodos a lo largo del horizonte de planeación y \mathcal{R} el conjunto de periodos en \mathcal{T} correspondientes a los ciclos de reposición. Para el comprador se define: $HB_{i,t}$ como el costo unitario de mantenimiento de inventario para el producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $KB_{i,t}$ como el costo fijo de ordenar para el producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; IOB_i como el inventario inicial del producto $i \in \mathcal{P}$; $D_{i,t}$ como la demanda del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$ y M como un número muy grande. Las variables de decisión son: $IB_{i,t}$ como el inventario final del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$ y $Y_{i,t}$ como el tamaño de la orden del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$.

Para el productor se define: $HP_{i,t}$ como el costo unitario de mantenimiento de inventario para el producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $KP_{i,t}$ como el costo fijo de iniciar una corrida de producción del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $KT_{i,t}$ el costo fijo de transportar una orden (sin importar el tamaño) del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $PC_{i,t}$ como la capacidad de producción del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$ y IOP_i , como el inventario inicial del producto $i \in \mathcal{P}$. Las variables de decisión son: $IP_{i,t}$ como el inventario final del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $Q_{i,t}$ como el nivel de producción del producto $i \in \mathcal{P}$ en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $X_{i,t} = 1$ si una orden del producto $i \in \mathcal{P}$ puede ser producida en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $XE_{i,t} = 1$ si una orden del producto $i \in \mathcal{P}$ es producida en el periodo $t \in \mathcal{T}$; $B_{i,t} = 1$ si una orden del producto $i \in \mathcal{P}$ es transportada en el periodo $t \in \mathcal{T}$ y $Z_{i,t} = 1$ si el producto $i \in \mathcal{P}$ tiene un ciclo de reposición de $t \in \mathcal{T}$ periods.

El sistema considerado tiene un único comprador el cual es atendido por un único proveedor en un ambiente de información completa. El comprador incurre en los costos de ordenar y mantenimiento de inventario y adicionalmente se enfrenta a una demanda dinámica pero determinística durante todo el horizonte de planeación para todos los productos. También, el comprador tiene una capacidad infinita de ordenar para cada producto en cada periodo del horizonte de planeación. La demanda debe ser totalmente satisfecha, por lo tanto no es posible la presencia de faltantes. El proveedor asume los costos de transporte, mantenimiento de inventario y la preparación de la producción. De igual manera, el vendedor define un ciclo de reposición de producción compuesto por un número entero de periodos y produce únicamente (bajo una capacidad finita de producción) al principio de cada ciclo. Finalmente, se asume que el tiempo de entrega es despreciable, por lo tanto los costos asociados al inventario en tránsito no son tenidos en cuenta.

6.2. Modelos matemáticos

Usando la definición del problema presentada previamente, cinco modelos matemáticos son construidos. El problema de loteo dinámico con el vendedor como líder absoluto de la cadena de suministros, puede ser formulado con programación lineal de la siguiente manera:

6.2.1. Modelo 1. Modelo con el proveedor como líder absoluto.

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_t (HP_{i,t} * IP_{i,t} + KP_{i,t} * XE_{i,t} + KT_{i,t} * B_{i,t}) \quad (1)$$

Sujeto a,

$$IP_{i,t} = IP_{i,t-1} + Q_{i,t} - Y_{i,t} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (2)$$

$$IP_{i,t} = IOP_i + Q_{i,t} - Y_{i,t} \quad \forall i, t = 1 \quad (3)$$

$$\sum_t Z_{i,t} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$Z_{i,k} \leq X_{i,t} \quad \forall i, \forall t, \forall k \mid t \text{ es un entero múltiplo de } k \quad (5)$$

$$X_{i,t} \leq \sum_k Z_{i,k} \quad \forall i, \forall t \mid k \text{ es un divisor de } t \quad (6)$$

$$Q_{i,t} \leq PC_{i,t} * XE_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (7)$$

$$XE_{i,t} \leq X_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (8)$$

$$Q_{i,t} \geq XE_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (9)$$

$$IB_{i,t} = IB_{i,t-1} + Y_{i,t} - D_{i,t} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (10)$$

$$IB_{i,t} = IOB_i + Y_{i,t} - D_{i,t} \forall i, t = 1 \quad (11)$$

$$Y_{i,t} \leq M * B_{i,t} \forall i, \forall t \quad (12)$$

$$X_{i,t}, XE_{i,t}, Z_{i,t}, B_{i,t} \in \{1,0\} \forall i, \forall t \quad (13)$$

$$Q_{i,t}, Y_{i,t}, IP_{i,t}, IB_{i,t} \geq 0 \forall i, \forall t \quad (14)$$

La función objetivo (1) minimiza los costos de transporte, mantenimiento de inventario y de preparación de la producción para el proveedor. Las ecuaciones (2)-(3) y (10)-(11) son las restricciones de balance de inventario para el proveedor y comprador respectivamente. La familia de restricciones (4) define un único ciclo de reposición para cada producto. Las restricciones (5)-(6) garantizan la posibilidad de producción exclusivamente en los periodos de tiempo que son múltiplos del ciclo de reposición para cada producto. La familia de restricciones (7) establece la capacidad de producción real para cada producto durante el horizonte de planeación. Para esta formulación, es importante definir la relación entre las variables $X_{i,t}$ and $XE_{i,t}$; esto se alcanza mediante el conjunto de restricciones (8) que establecen la diferencia entre las capacidades potenciales y reales de producción para el proveedor. Las restricciones (9) aseguran que si la producción es nula, entonces no hay orden de producción. La familia de restricciones (12) asegura que si el comprador solicita productos, estos deben ser transportados por el proveedor. Finalmente, (13) y (14) definen la naturaleza de las variables de decisión.

Considerando que este modelo incluye la familia de restricciones para ambos, el proveedor y el comprador, entonces la solución para las variables de decisión de estos es hallada simultáneamente pero priorizando la función objetivo del proveedor.

El problema de loteo dinámico con el comprador como líder absoluto de la cadena de suministros, puede ser formulado con programación lineal de la siguiente manera:

6.2.2. Modelo 2. Modelo con el comprador como líder absoluto.

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_t (HB_{i,t} * IB_{i,t} + KB_{i,t} * B_{i,t}) \quad (15)$$

Sujeto a,

$$IB_{i,t} = IB_{i,t-1} + Y_{i,t} - D_{i,t} \forall i, \forall t > 1 \quad (16)$$

$$IB_{i,t} = IOB_i + Y_{i,t} - D_{i,t} \forall i, t = 1 \quad (17)$$

$$Y_{i,t} \leq M * B_{i,t} \forall i, \forall t \quad (18)$$

$$B_{i,t} \in \{1,0\} \forall i, \forall t \quad (19)$$

$$Y_{i,t}, IB_{i,t} \geq 0 \forall i, \forall t \quad (20)$$

La función objetivo (15) minimiza los costos totales por ordenar y mantenimiento de inventario para el comprador. Las ecuaciones (16)-(17) son las restricciones de balance de inventarios. La familia de restricciones (18) asegura que si el comprador solicita productos, estos deben ser transportados por el proveedor. Finalmente, (19) y (20) definen la naturaleza de las variables de decisión.

Dado que este modelo solamente incluye las restricciones para el comprador, es necesario primero determinar los valores de $Y_{i,t}$, $IB_{i,t}$ y $B_{i,t}$ para posteriormente usarlos como parámetros del modelo 1 y así solucionar el problema para el vendedor. La metodología de solución del modelo 2 es un claro ejemplo del supuesto de información completa definido anteriormente: el vendedor y el comprador conocen sus funciones objetivo y restricciones.

El problema de loteo dinámico para la integración completa de la cadena de suministros, puede ser formulado con programación lineal de la siguiente manera:

6.2.3. Modelo 3. Integración completa de la cadena de suministros.

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_t (HP_{i,t} * IP_{i,t} + KP_{i,t} * XE_{i,t} + KT_{i,t} * B_{i,t} + HB_{i,t} * IB_{i,t} + KB_{i,t} * B_{i,t}) \quad (21)$$

La función objetivo (21) minimiza de manera conjunta los costos totales de la cadena de suministros: por un lado los costos de transporte, mantenimiento de inventario y de preparación de la producción para el proveedor y por otro, los costos totales por ordenar y mantenimiento de inventario para el comprador. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que las restricciones usadas para este modelo son exactamente las mismas que las usadas para el caso en que el vendedor es el líder absoluto de la cadena de suministros (modelo 1).

Considerando que este modelo incluye la familia de restricciones para ambos, el proveedor y el comprador, entonces la solución para las variables de decisión de estos es hallada simultáneamente pero priorizando la función objetivo de la cadena de suministros. Este modelo garantiza los costos mínimos para la cadena de suministros en comparación con los otros cuatro modelos.

El problema de loteo dinámico con el vendedor como líder (dispuesto a negociar) y el comprador como seguidor, puede ser formulado con programación lineal de la siguiente manera:

6.2.4. Modelo 4. Negociación entre el proveedor y el comprador con el primero como líder (Juego de Stackelberg).

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_t (HB_{i,t} * IB_{i,t} + KB_{i,t} * B_{i,t}) + Z \quad (22)$$

Sujeto a,

$$\sum_i \sum_t (HP_{i,t} * IP_{i,t} + KP_{i,t} * XE_{i,t} + KT_{i,t} * B_{i,t}) - Z \quad (23)$$

\leq Costos totales del vendedor en el modelo 1.

La función objetivo (22) minimiza los costos totales por ordenar y mantenimiento de inventario para el comprador pero incluyendo un bono que éste entrega al vendedor. La restricción (23) garantiza que el vendedor obtiene un bono del comprador y que el primero alcanza la misma estructura de costos que cuando era el líder absoluto de la cadena de suministros. También, este modelo incluye todas las mismas restricciones que el modelo 1.

Para este modelo, el líder es el vendedor; entonces, el comprador soluciona el problema determinando la mínima bonificación posible mientras se garantiza que los costos totales del vendedor permanecen exactamente iguales a los del primer modelo.

El problema de loteo dinámico con el comprador como líder (dispuesto a negociar) y el vendedor como seguidor, puede ser formulado con programación lineal de la siguiente manera:

6.2.5. Modelo 5. Negociación entre el proveedor y el comprador con el segundo como líder (Juego de Stackelberg).

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_t (HP_{i,t} * IP_{i,t} + KP_{i,t} * XE_{i,t} + KT_{i,t} * B_{i,t}) + Z \quad (24)$$

Sujeto a,

$$\sum_i \sum_t (HB_{i,t} * IB_{i,t} + KB_{i,t} * B_{i,t}) - Z \quad (25)$$

\leq Costos totales del comprador en el modelo 2.

La función objetivo (24) minimiza los costos de transporte, mantenimiento de inventario y de preparación de la producción para el proveedor pero incluyendo un bono que éste entrega al comprador. La restricción (25) garantiza que el comprador obtiene un bono del vendedor y que el primero alcanza la misma estructura de costos que cuando era el líder absoluto de la cadena de suministros. También, este modelo incluye todas las mismas restricciones que el modelo 1.

Para este modelo, el líder es el comprador; entonces, el vendedor soluciona el problema determinando la mínima bonificación posible mientras se garantiza que los costos totales del comprador permanecen exactamente iguales a los del segundo modelo.

7. ESTUDIO NUMÉRICO

En esta sección, un ejemplo numérico para un único producto es llevado a cabo para demostrar los beneficios de usar la metodología CRE a través de la comparación de los cinco modelos lineales presentados en la definición del problema. Los valores para la demanda a lo largo de diez periodos en el horizonte de planeación, generados aleatoriamente por medio de una distribución de probabilidad uniforme discreta con parámetros [100,600], son presentados en la tabla 4.

Periodo	Demanda
1	100
2	200
3	100
4	400
5	300
6	200
7	100
8	200
9	500
10	600

Tabla 4. Demanda del comprador para el caso de estudio.

Dadas las notaciones presentadas en la definición del problema, los parámetros para el vendedor y el comprador son los que se presentan a continuación: $HB_t = 5$, $KB_t = 100$, $IOB = 40$, $HP_t = 1$, $KP_t = 300$, $KT_t = 500$, $PC_t = 500$ y $IOP = 300$. Con el objetivo de simplificar este estudio numérico, los costos presentados anteriormente serán constantes a lo largo de todo el horizonte de planeación, sin embargo, de acuerdo a la construcción del modelo matemático es posible variar cada uno en cada periodo de tiempo.

Adicionalmente, es importante explicar que la generación de los parámetros iniciales (costos) para este primer análisis numérico se realizó teniendo en cuenta la revisión de la literatura desarrollada en la sección cinco del presente documento. También, el cálculo de los inventarios iniciales y las capacidades de producción se fijaron aleatoriamente garantizando la factibilidad de los problemas lineales. Por último, es necesario aclarar que este estudio tiene un enfoque particularmente teórico y por lo tanto la esencia del mismo no está fundamentada en la creación de instancias.

La tabla 5 presenta los principales resultados para el estudio numérico teniendo en cuenta los cinco diferentes modelos propuestos para esta investigación.

		Dominancia del vendedor (Modelo 1)	Dominancia del comprador (Modelo 2)	Integrado (Modelo 3)	Negociación (Líder: vendedor) (Modelo 4)	Negociación (Líder: comprador) (Modelo 5)
Costos del vendedor	Preparación	\$1,500	\$2,100	\$2,100	\$2,100	\$2,100
	Inventario	\$360	\$580	\$440	\$440	\$440
	Transporte	\$2,000	\$5,000	\$4,000	\$4,000	\$4,000
	Total	\$3,860	\$7,680	\$6,540	\$3,860	\$7,340
Costos del comprador	Ordenar	\$400	\$1,000	\$800	\$800	\$800
	Inventario	\$24,100	\$0	\$1,000	\$1,000	\$1,000
	Total	\$24,500	\$1,000	\$1,800	\$4,480	\$1,000
Costos de la cadena de suministros		\$28,360	\$8,680	\$8,340	\$8,340	\$8,340
				Bonificación	\$2,680	\$800

Tabla 5. Resultados del estudio numérico.

Sin una coordinación entre los agentes y asumiendo que el vendedor es el líder absoluto de la cadena de suministros, los costos totales para el sistema son los más altos posibles de todos los escenarios alcanzando un valor de \$28,360. Mientras el proveedor reduce su función objetivo a través de la disminución de los costos de mantenimiento de inventario, la situación para el comprador es exactamente opuesta porque el incremento en sus costos totales están explicados en un 98.4% por los costos de inventario. Si ahora, el comprador es el líder absoluto de la cadena y no hay intereses de cooperación, los costos totales del sistema son \$8,680 y los costos del vendedor se incrementan en un 98.9% en comparación con el primer modelo explicado. El principal resultado para este escenario es que el comprador no incurre en costos de mantenimiento de inventario porque se usa una política de lote por lote.

Siguiendo con el modelo integrado, los mínimos costos posibles para la cadena de suministros son logrados con un valor total de \$8,340. Mientras por un lado los costos de ambos, productor y comprador, incrementan en un 69.4% y 80% respectivamente comparados con los modelos en que cada uno de ellos era líder absoluto, por otro lado, la proporción de aquellos costos relativo a los totales de la cadena de suministros son mucho más balanceados.

También, los modelos de negociación (incluyendo la bonificación según sea el caso) alcanzan la misma estructura total de costos para la cadena de suministros que el modelo integrado. Con una coordinación a través de la metodología CRE y el vendedor asumido como líder y el comprador como seguidor, los costos totales para el vendedor son 69.43% mayores que el escenario cuando él era el líder absoluto de la cadena. No obstante, después de descontar el bono recibido por el comprador, los costos totales para el vendedor permanecen exactamente iguales a los del modelo 1. Asimismo, continuando con una coordinación CRE en la cual el comprador es el líder, los costos totales para este serán 80% mayores que en el escenario en que era líder absoluto. Sin embargo, después de descontar la bonificación recibida por el proveedor, los costos totales para el comprador permanecen exactamente iguales a los del modelo 2.

Finalmente, cuando los agentes de la cadena de suministros deciden negociar y coordinarse mediante la metodología CRE se alcanzan ahorros realmente significativos. En una primera medida, si se comparan los resultados en términos de costos para el comprador en el escenario en que es dominado (modelo 1) versus el caso en que hay disposición a cooperar (modelo 4), se obtienen ahorros hasta del 82%. De igual manera, si se comparan los resultados económicos del vendedor para la situación en que es dominado (modelo 2) frente al momento en que hay cooperación, se obtienen ahorros del 5%. Ahora bien, si se compara el desempeño económico de la cadena de suministros en los escenarios de no-cooperación, modelos 1 y 2, hacia los que sí, modelos 4 y 5, es posible obtener ahorros del 70% y 4% respectivamente.

8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta sección se presenta un estudio más detallado sobre los beneficios de coordinar la cadena de suministros mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros más relevantes de los actores. Para desarrollar el análisis previamente descrito, en una primera medida se generaron 100 instancias para la demanda del comprador, utilizando un horizonte de planeación de diez periodos, a través de una distribución de probabilidad

uniforme continua entre 100 y 500. Posteriormente y con cada una de las instancias anteriores, se variaron los siguientes parámetros:

Agente	Parámetro	Rango	Incremento
Comprador	Costo de mantenimiento de inventario ($HB_{i,t}$)	[0.5-10]	0.5
	Costo fijo de ordenar ($KB_{i,t}$)	[0-2000]	200
Proveedor	Costo de mantenimiento de inventario ($HP_{i,t}$)	[0.5-10]	0.5
	Costo fijo de preparación de una corrida de producción ($KP_{i,t}$)	[0-600]	20
	Costo fijo de transporte ($KT_{i,t}$)	[0-1000]	50

Tabla 6. Variación de los parámetros para el análisis de sensibilidad.

Es necesario aclarar que para poder hacer más estable el modelo, los costos presentados anteriormente serán constantes a lo largo de todo el horizonte de planeación. De la misma manera, cada una de las variaciones de parámetros corresponde a un escenario aislado en el cual únicamente se evalúa el costo en cuestión mientras los demás permanecen constantes de acuerdo a la inicialización realizada en la sección 7.

8.1. Escenario para la variación de $HB_{i,t}$

En primer lugar y como se esperaba, para el modelo en que el comprador es el líder absoluto de la cadena de suministros, se establece una política inventarios mínimos y para lograrlo se genera un esquema de pedidos lote por lote. De esta manera, a pesar de la variación en los costos de mantenimiento de inventario, los costos totales para el comprador serán siempre constantes y representados al 100% por los costos de ordenar. Por otra parte y teniendo en cuenta que el comprador toma siempre la misma decisión, el caso del vendedor es de igual manera constante en términos tanto de política de inventarios como de transporte y producción.

Con respecto al modelo en que el proveedor es el líder absoluto de la cadena de suministros y teniendo en cuenta que su estructura de costos permanece siempre constante, su proceso de toma de decisiones a lo largo del horizonte de planeación está sujeto en una política de inventarios, producción y transporte invariable. El comprador por su lado, se ve obligado a mantener una política de inventarios constante que conforme los costos de mantenimiento aumentan, su estructura de costos totales será creciente e inestable.

El modelo integrado ofrece un comportamiento de acuerdo a lo esperado: a medida que los costos de mantenimiento se incrementan para el comprador, su política de inventarios es decreciente hasta el punto de emular exactamente el comportamiento descrito para el caso en que este era el líder absoluto de la cadena de suministros. De manera contraria el

vendedor, conforme $HB_{i,t}$ aumenta, implementa una política de inventarios, producción y transporte crecientes hasta el punto de verse en la obligación de tomar la misma decisión en la que se encontraba cuando estaba dominado (modelo 2). A fin de dar un poco más de visibilidad a lo anteriormente dicho, a continuación se presenta la política de inventarios del comprador y vendedor de los modelos 2 y 3 respectivamente:

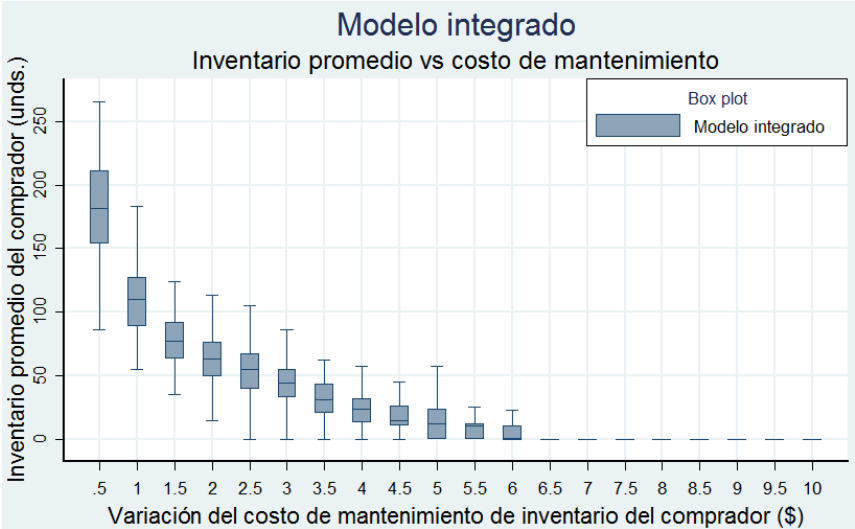


Ilustración 2. Inventario promedio para el comprador en el modelo integrado.

Como se puede apreciar en la ilustración 2, cuando los costos de mantenimiento de inventarios son mayores o iguales a \$6.5 el comprador alcanza una política de cero inventarios (equivalente a un esquema de pedidos lote por lote), al igual que como se había detallado previamente para el segundo modelo.

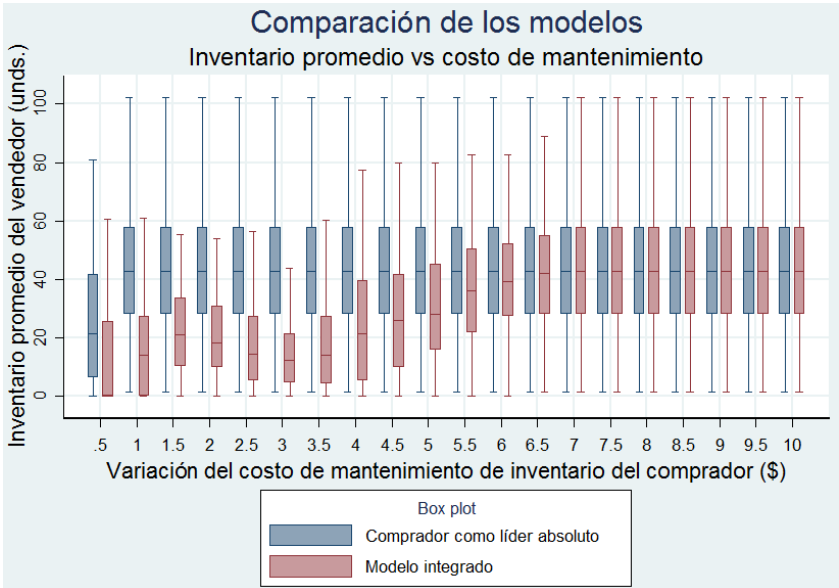


Ilustración 3. Inventario promedio para el vendedor en los modelos 2 y 3.

La ilustración 3 muestra cómo a través del crecimiento del parámetro asociado al costo de mantenimiento de inventario para el comprador, la política de inventarios del vendedor poco a poco se aproxima, hasta que efectivamente lo logra en $HB_{i,t} = \$7$, al comportamiento obtenido para el caso en que este se encontraba dominado (modelo 2).

Los modelos de negociación por su parte, ofrecen soluciones (tanto para el productor como para el comprador) muy interesantes en términos de las políticas de inventarios, pedidos, transporte y producción. Las ilustraciones que se presentan a continuación presentan algunos de los resultados más destacados:

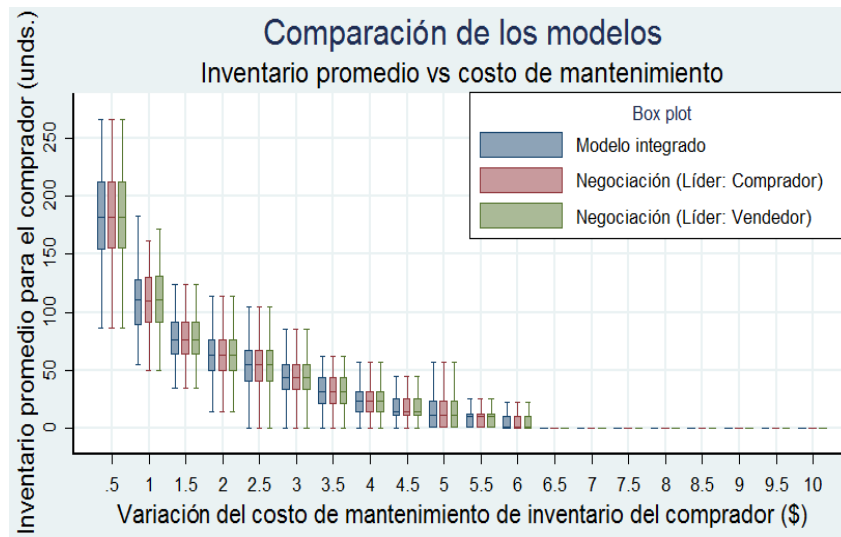


Ilustración 4. Inventario promedio para el comprador en los modelos 3, 4 y 5.

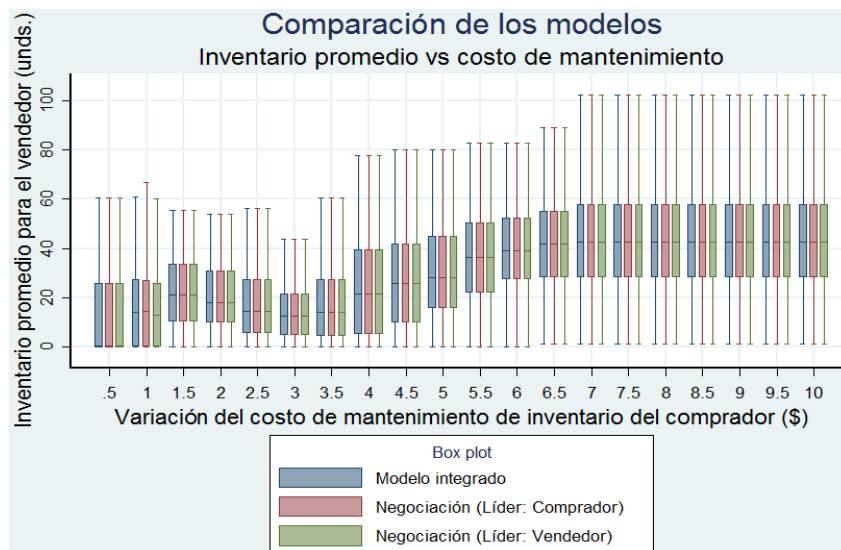


Ilustración 5. Inventario promedio para el vendedor en los modelos 3, 4 y 5.

Las anteriores gráficas permiten establecer una conclusión muy importante: los procesos de toma de decisiones tanto para el comprador como el vendedor en los modelos de negociación, son exactamente iguales que para el escenario del modelo integrado³. De esta manera, los modelos de negociación justifican el costo mínimo total de la cadena de suministros a pesar de la bonificación entregada por el agente dominado al dominante.

Continuando con los modelos de negociación, es de vital importancia hablar de uno de los elementos más relevantes para estos modelos: las bonificaciones. Para el caso en que hay cooperación y el proveedor es el líder, el comprador siempre está dispuesto a ofrecer la bonificación al vendedor debido a que aun entregando dicha cantidad de dinero, su estructura de costos nunca alcanzará el mismo valor que para el caso en que se encontraba 100% dominado y no había intenciones de cooperación. Asimismo, la compensación entregada por parte del comprador al vendedor, simula el comportamiento de los costos de transporte del último dado que estos son los más representativos (sobre los costos totales) del agente (ver ilustración 6).

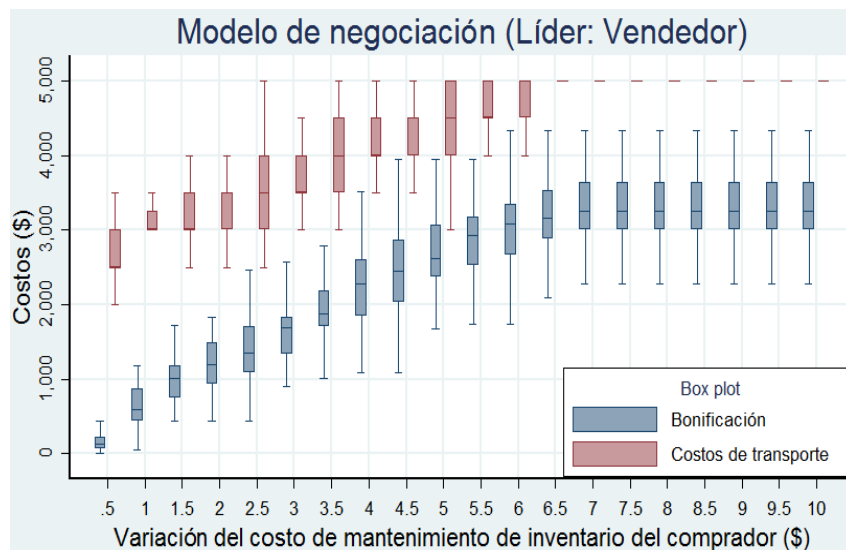


Ilustración 6. Costos y bonificación para el modelo 4.

Por otro lado, cuando hay cooperación y el comprador es el líder, el vendedor únicamente está dispuesto a ofrecer una bonificación al comprador hasta que su estructura de costos

³ A pesar de sólo se muestran los resultados para la política de inventarios, tanto la política de pedidos, transporte y producción son exactamente iguales para los modelos de negociación como el integrado.

sea equivalente a la obtenida en el caso en que se encontraba dominado. En el momento en que la estructura de costos para el vendedor sea la misma en ambos casos (modelo 2 y modelo 5), no hay incentivos a seguir dando bonificaciones (ver ilustración 7). En adición a lo previamente dicho, la compensación entregada por el vendedor, simula el comportamiento de los costos de inventario del comprador dado que estos son los más representativos del agente.

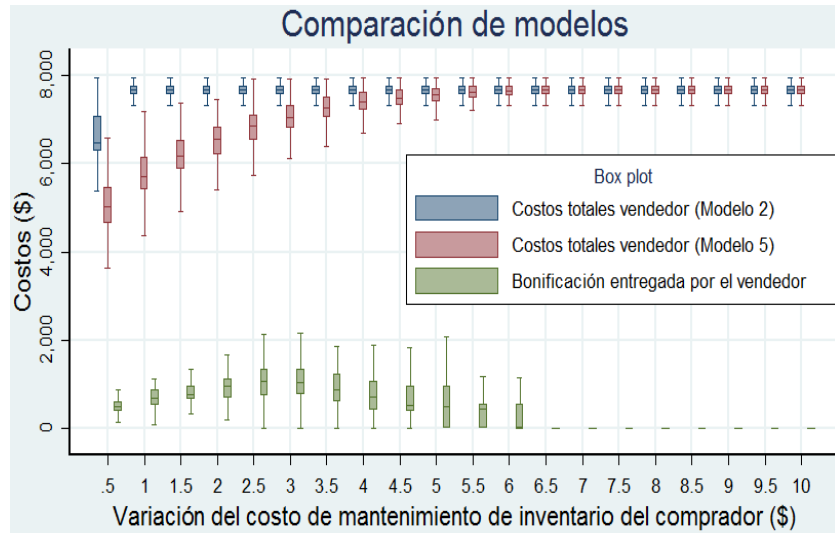


Ilustración 7. Costos y bonificación para la comparación de los modelos 2 y 5.

En último lugar, se presentan los ahorros obtenidos por cada uno de los actores de la cadena de suministros. Para esto, es necesario definir el ahorro del agente "i" como la variación de sus costos totales para los casos en que se encontraba dominado antes y después de implementar la cooperación.

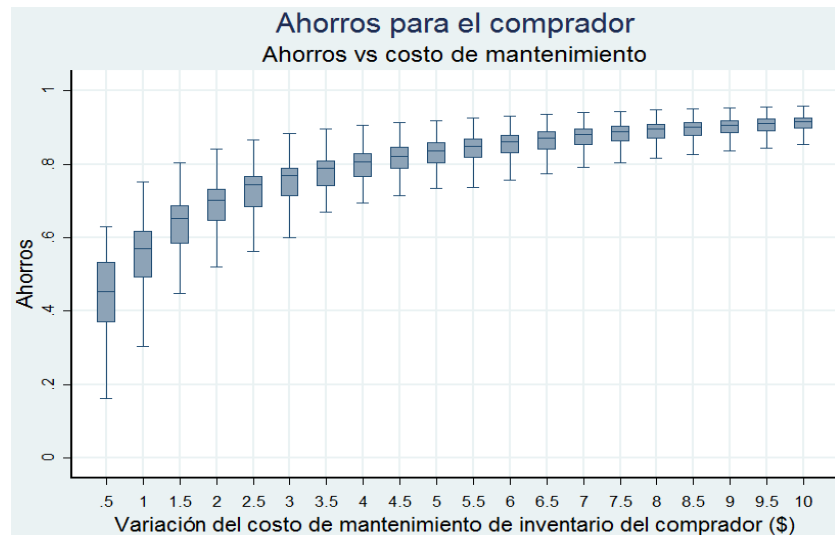


Ilustración 8. Ahorros para el comprador al utilizar los modelos cooperativos.

A partir de lo presentado en la ilustración 8, se puede ver cómo a medida que aumentan los costos de mantenimiento para el comprador sus ahorros se vuelven crecientes. Lo anterior se explica en que conforme mantener inventario es más caro, los modelos tratan de favorecer al comprador de tal manera que su estructura de costos, para el caso en que hay negociación, se acerque asintóticamente a aquella obtenida cuando era el agente dominante absoluto de la cadena de suministros.

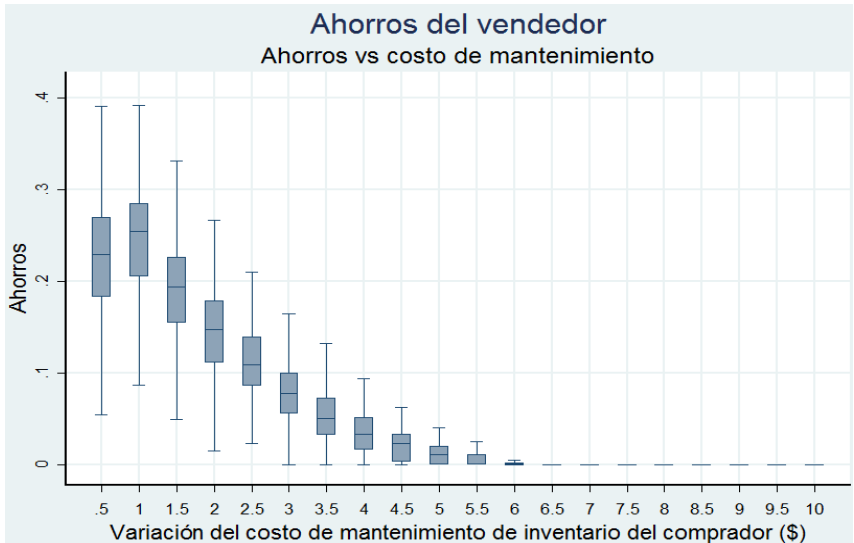


Ilustración 9. Ahorros para el vendedor al utilizar los modelos cooperativos.

La ilustración 9 muestra cómo a medida que aumentan los costos de mantenimiento para el comprador, los ahorros del vendedor decrecen hasta el punto de ser nulos. Dado que los costos que se están incrementando son los del comprador, los modelos desfavorecen al vendedor a tal punto que su estructura de costos, para el caso en que hay negociación, se acerque asintóticamente a aquella obtenida cuando el agente era dominado en la cadena de suministros (modelo 2).

8.2. Escenario para la variación de $KB_{i,t}$

De acuerdo a lo esperado, para el modelo en que el comprador es el líder absoluto de la cadena de suministros se establece una política inventarios creciente la cual busca favorecer un esquema de pedidos mínimos (el cual alcanza su punto mínimo en 5.77 veces de 10 posibles) los cuales no pueden reducirse a cero por obvias razones. Es así como a medida que se incrementan los costos fijos de realizar una orden, suceden tres cosas: primero, los costos de mantenimiento de inventario reducen su participación en los costos totales hasta alcanzar el 29%; segundo, los costos de pedido aumentan hasta representar

el 71% de los totales y tercero, los costos totales para el comprador son crecientes a lo largo de $KB_{i,t}$. Por otro lado, el vendedor se ve favorecido en este escenario porque a pesar de llevar una política de inventarios variable con el incremento del costo fijo de hacer un pedido, la política de producción y transporte es decreciente y por lo tanto sus costos totales también lo serán.

Al igual que como se describió en la subsección anterior, cuando el vendedor se convierte en el líder absoluto de la cadena de suministros y teniendo en cuenta que su estructura de costos permanece siempre constante, su proceso de toma de decisiones a lo largo del horizonte de planeación está sujeto en una política de inventarios, producción y transporte invariable. El comprador por su parte, se ve obligado a mantener una política de inventarios y de pedidos constante, que conforme los costos de pedido aumentan su estructura de costos totales se vuelve creciente e inestable.

El modelo integrado se comporta de acuerdo a lo esperado: a medida que los costos de pedido se aumentan para el comprador, su política de inventarios es creciente, mientras que la de pedidos es decreciente. Así, el modelo integrado emula (aunque no de manera exacta) las decisiones tomadas por el comprador de acuerdo a lo descrito para el escenario en que este era el líder absoluto de la cadena de suministros (ver ilustración 10). Para este mismo modelo el vendedor, conforme $KB_{i,t}$ aumenta, implementa políticas de inventarios, producción y transporte muy similares a las del modelo 2 a diferencia que la política de inventarios para este caso es creciente. De todas maneras, los costos totales para el vendedor se mantendrán decrecientes.

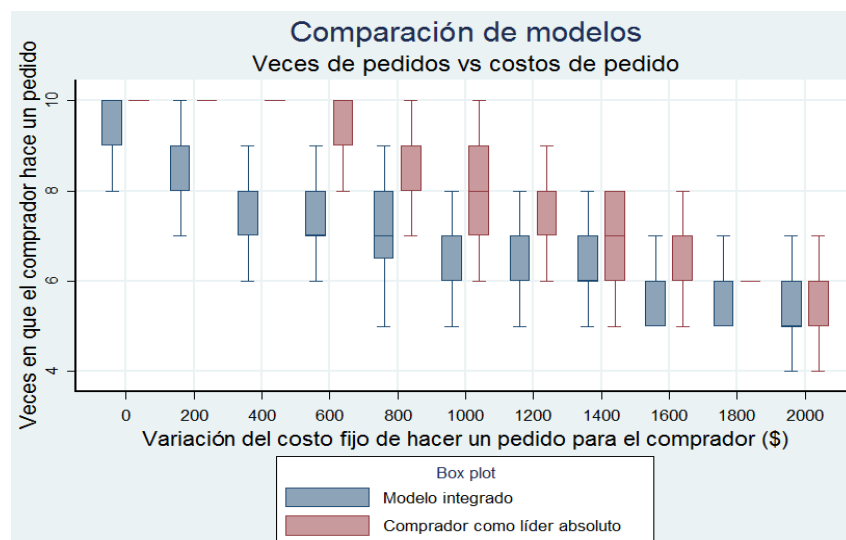


Ilustración 10. Política de pedidos para el comprador en los modelos 2 y 3.

Frente a los modelos de negociación y de acuerdo a lo encontrado en la anterior subsección, las políticas de inventario, pedido, transporte y producción son exactamente iguales a las obtenidas en el modelo integrado. Al obtener las mismas políticas, se garantiza así que los modelos de negociación alcanzan el costo mínimo total de la cadena de suministros a pesar de la bonificación. La gráfica que se presenta a continuación, ofrece un claro ejemplo sobre el comportamiento de la política de pedidos del comprador en los modelos de negociación y el integrado.

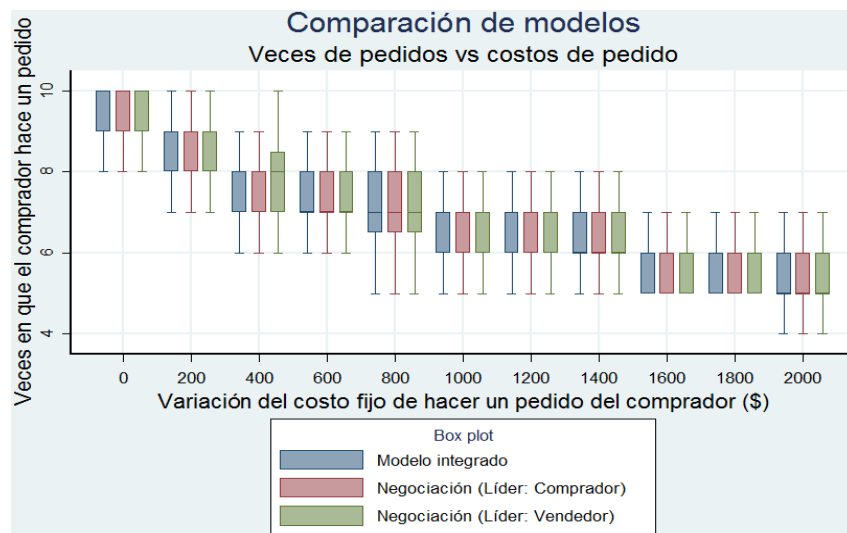


Ilustración 11. Inventario promedio para el comprador en los modelos 3, 4 y 5.

Con respecto a las bonificaciones, cuando hay negociación y el proveedor es el líder, el comprador siempre está dispuesto a ofrecer la bonificación porque sus costos son siempre crecientes para el primer modelo (ver ilustración 12). De esta manera, la compensación económica siempre es una opción más eficiente que llegar al caso de verse sometido a la dominancia absoluta del vendedor. También, la compensación en este contexto simula el comportamiento de los costos de transporte del proveedor dado que estos son los más representativos del agente.

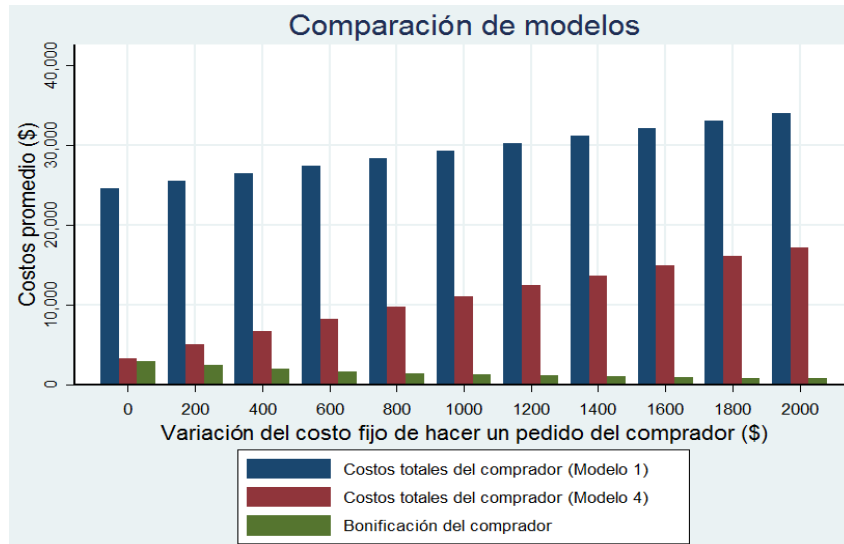


Ilustración 12. Costos y bonificación para el modelo 4.

En el otro escenario, cuando hay cooperación y el comprador es el líder, el vendedor únicamente está dispuesto a ofrecer una bonificación al comprador hasta que su estructura de costos sea equivalente a la obtenida en el caso en que se encontraba dominado. En el momento en que la estructura de costos para el vendedor sea la misma en ambos casos (modelo 2 y modelo 5), no hay incentivos a seguir dando bonificaciones.

Finalmente y como elemento fundamental de este análisis de sensibilidad, los resultados correspondientes a los ahorros para cada uno de los agentes de la cadena de suministros son presentados.

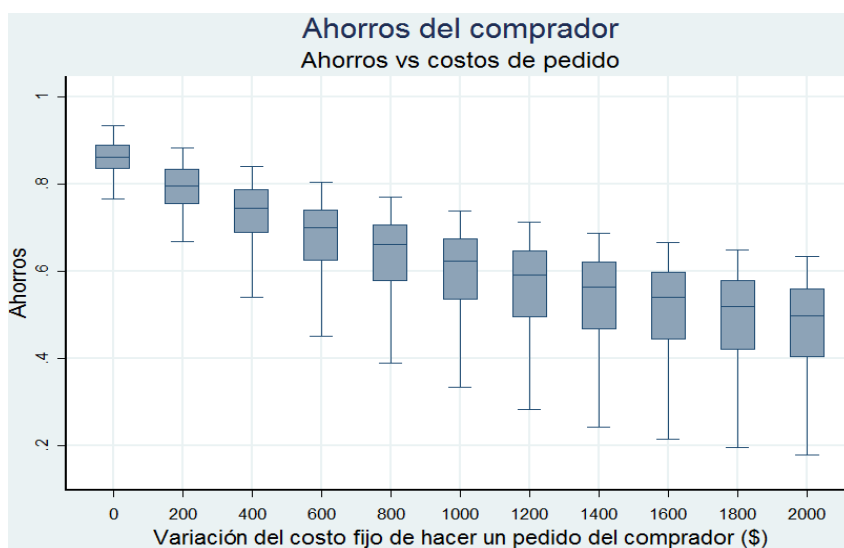


Ilustración 13. Ahorros para el comprador al utilizar los modelos cooperativos.

La ilustración 13 permite ver cómo a medida que aumentan los costos fijos de ordenar para el comprador, sus ahorros tienden a decrecer. Lo anterior se sustenta en que a pesar de que hacer un pedido cada vez es más caro, los modelos no pueden beneficiar del todo al comprador ya que una política con un bajo número de órdenes genera obligatoriamente elevados costos de mantenimiento de inventario.

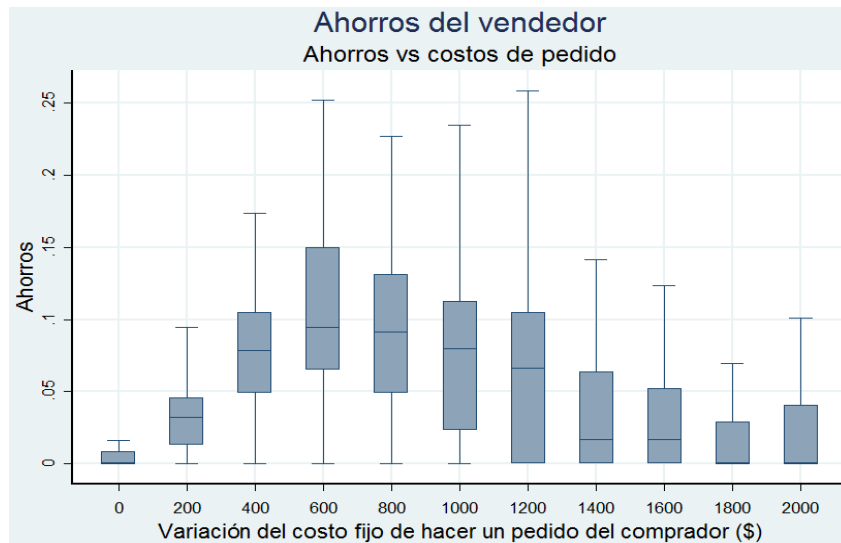


Ilustración 14. Ahorros para el vendedor al utilizar los modelos cooperativos.

Si bien la tendencia no es muy marcada, los ahorros del vendedor (presentados en la anterior gráfica) tienen un comportamiento altamente variable y decreciente. Como se explicó previamente, el vendedor alcanza una estructura de costos totales decrecientes para el escenario en que es dominado y no hay negociación. Es por lo anterior que, a pesar de que existen ahorros para este agente de la cadena, estos no van a ser muy significativos y además tenderán al cero.

8.3. Escenario para la variación de $HP_{i,t}$

En el modelo en que el vendedor es el líder absoluto de la cadena de suministros, se establece una política inventarios decreciente la cual busca promover una política de producción constante a cambio de una política de transporte creciente. Es así como a medida que se incrementan los costos de mantenimiento sucede que: los costos de mantenimiento de inventario reducen su participación en los costos totales hasta alcanzar el 1%; los costos de transporte aumentan hasta representar el 62% de los totales y en consecuencia de lo anterior, los costos totales para el vendedor serán inevitablemente crecientes. Por otro lado, el comprador se ve perjudicado en este escenario porque para

poder ajustarse a las decisiones del agente dominante se ve obligado a mantener una cantidad exagerada de inventario lo cual incrementa mucho sus costos.

Cuando el comprador se convierte en el líder absoluto de la cadena de suministros y sabiendo que su estructura de costos es constante, su proceso de toma de decisiones a lo largo del horizonte de planeación está sujeto en una política de pedido lote por lote por lo cual se alcanzan cero inventarios. El vendedor para este caso, se ve obligado a desempeñar una política de reducción de inventarios (aunque no puede llegar a cero) sujeto a decisiones de producción y transporte constantes. Lo anterior redundará en que a medida que los costos de mantenimiento aumentan, los costos de este agente también lo harán.

El modelo integrado se comporta de acuerdo a lo esperado: conforme los costos de mantenimiento se incrementan para el vendedor, su política de inventarios es decreciente hasta el punto de emular exactamente el comportamiento descrito para el caso en que este era el líder absoluto de la cadena de suministros (ver ilustración 15). Por otro lado, las políticas de transporte y producción del vendedor no replican de manera exacta las obtenidas para el primer modelo. Lo anterior se debe a que los costos para el comprador en dicho modelo fueron tan altos, que al integrar la cadena de suministros no es “inteligente” tomar la decisión de imitar estrictamente. Para el caso del comprador, al incrementarse $HP_{i,t}$ y queriendo beneficiar a toda la cadena de suministros, lo más relevante a destacar es su política de inventarios en comparación al modelo 1 porque pasa de tener 480 a 15 unidades promedio en inventario.

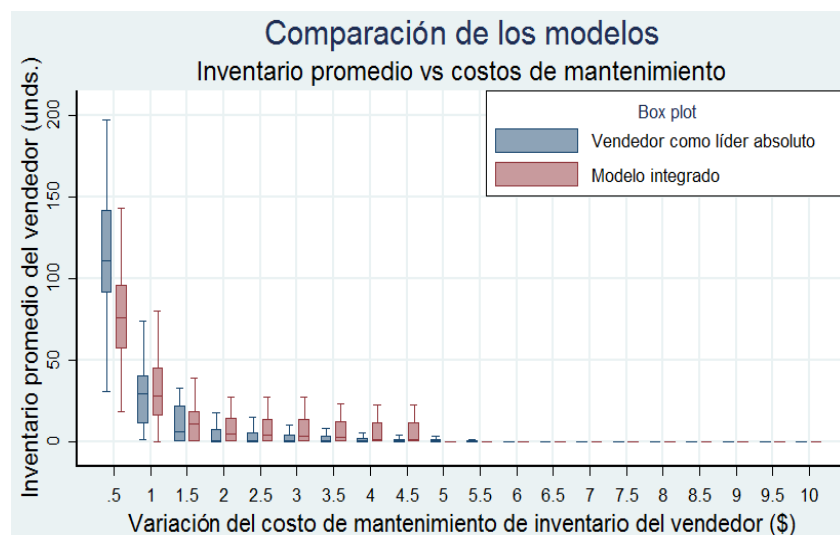


Ilustración 15. Inventario promedio para el vendedor en los modelos 2 y 3.

Tal y como sucedió en los previos escenarios para los análisis de sensibilidad, los modelos de negociación ofrecen los mismos resultados que el modelo integrado en términos de las políticas de inventarios, pedidos, transporte y producción. Dicho lo anterior, los modelos cooperativos claramente garantizan el costo mínimo total de la cadena de suministros a pesar de la bonificación.

El análisis con respecto a las bonificaciones, para el escenario cuando hay negociación y el proveedor es el líder, es prácticamente el mismo que el descrito para las anteriores subsecciones: el comprador siempre está dispuesto a ofrecer la compensación al vendedor debido a que a pesar de entregar esa cantidad de dinero, su estructura de costos nunca alcanzará el mismo valor que para el caso en que se encontraba dominado absolutamente y no había intenciones de cooperación. Además, la compensación en este escenario simula de nuevo el comportamiento de los costos de transporte del proveedor dado que estos son los más representativos (sobre los costos totales) del agente. De manera análoga, cuando hay cooperación y el comprador es el líder, el vendedor siempre está dispuesto a ofrecer una bonificación al comprador porque su estructura de costos nunca será equivalente a la obtenida en el caso en que se encontraba dominado (ver ilustración 16).

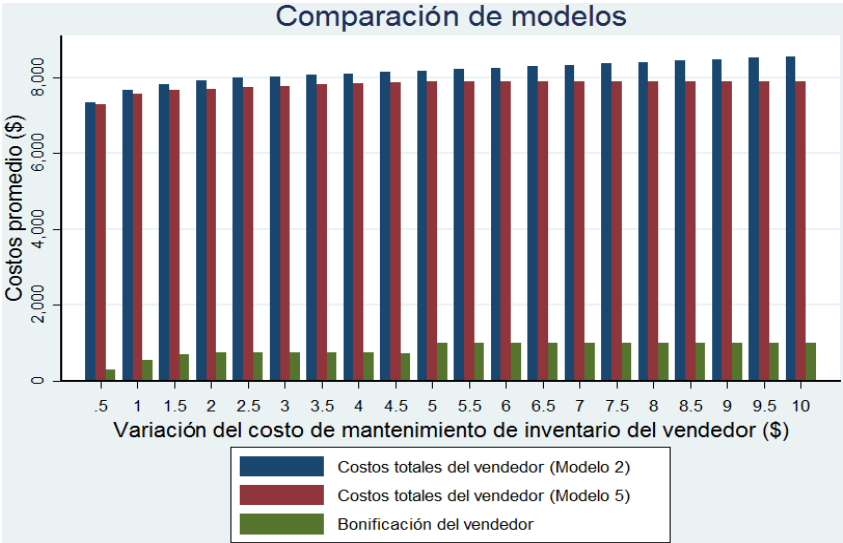


Ilustración 16. Costos y bonificación para la comparación de los modelos 2 y 5.

Por último, los resultados correspondientes a los ahorros para cada uno de los agentes de la cadena de suministros son presentados a continuación:

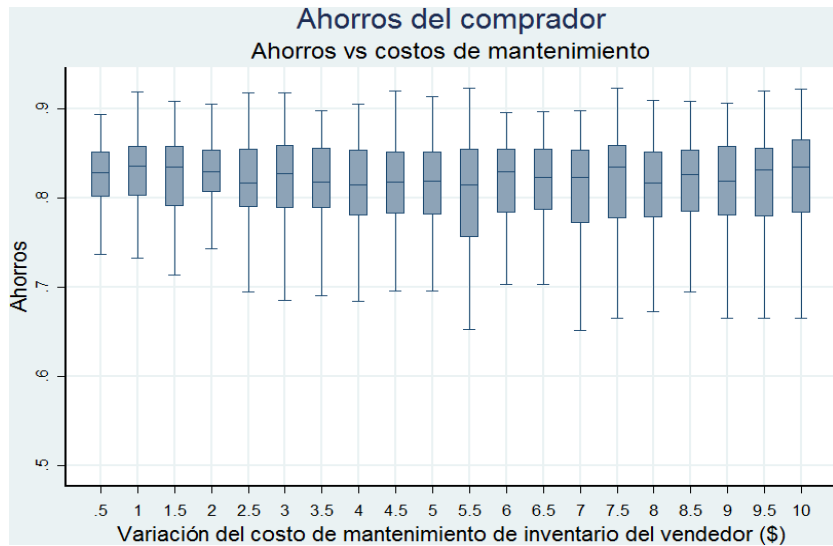


Ilustración 17. Ahorros para el comprador al utilizar los modelos cooperativos.

Los ahorros para el comprador, a lo largo de la variación de $HP_{i,t}$, son muy altos con una estabilidad significativa. A fin de explicar el comportamiento presentado en la gráfica 17, es necesario recalcar que al realizar una transición de un modelo de dominancia absoluta por parte del vendedor a uno en que hay disposición a negociar, se genera una reducción importante en términos de los costos de mantenimiento de inventario para el comprador.

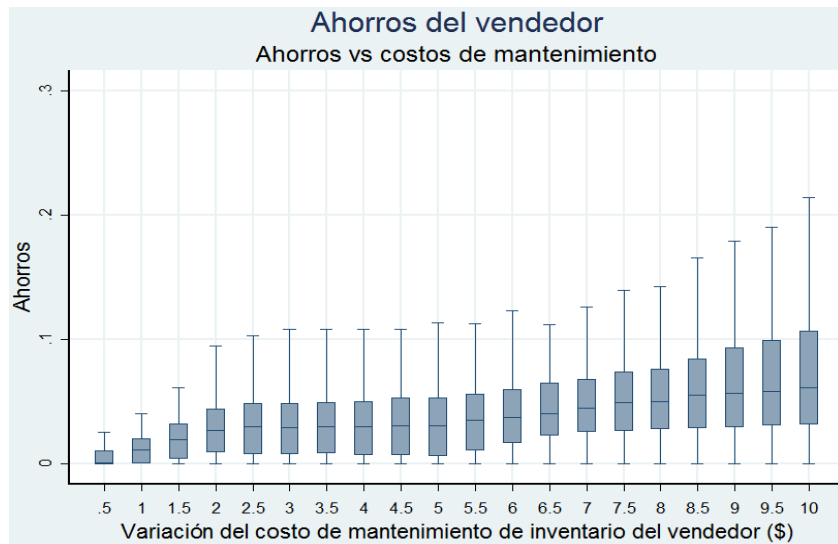


Ilustración 18. Ahorros para el vendedor al utilizar los modelos cooperativos.

Los ahorros del vendedor, presentados en la anterior gráfica, si bien no son muy grandes, tienen un comportamiento con tendencia y variabilidad creciente. Este comportamiento se debe a que el modelo de negociación con el vendedor como líder, al imitar el modelo integrado, trata de evitar que el comprador caiga en la situación de tener una cantidad

exagerada de unidades en inventario y de esta manera no es posible replicar de manera exacta el modelo de dominancia absoluta del vendedor. Es por esto que los ahorros para el vendedor no son muy significativos mientras que para el comprador sí.

8.4. Escenario para la variación de $KP_{i,t}$

En contra de la intuición, para el modelo en que el vendedor es el líder absoluto de la cadena de suministros, se establece una política producción y transporte constante frente a un comportamiento variable del inventario. Dicho lo anterior, es claro como a medida que se incrementan los costos fijos de iniciar una corrida de producción los costos totales para el vendedor serán inevitablemente crecientes. El comprador por su parte, se ve ampliamente perjudicado en este escenario porque para poder ajustarse a las decisiones del proveedor, se ve obligado a mantener una cantidad exagerada de inventario lo cual incrementa mucho sus costos.

Cuando el comprador se convierte en el líder absoluto de la cadena de suministros y sabiendo que su estructura de costos es constante, entonces este alcanza una política de pedidos lote a lote en la cual hay cero inventarios. El vendedor para este escenario, se ve en la obligación de llevar a cabo una política de minimización en las corridas de producción sujeto a incrementar necesariamente la cantidad de unidades en inventario. Por más de que se quiera evitar, los costos totales para el proveedor van a ser crecientes a lo largo de la variación de $KP_{i,t}$.

A diferencia de lo obtenido para el modelo 1, el modelo integrado se comporta de acuerdo a lo esperado: conforme los costos fijos de iniciar una corrida de producción se incrementan para el proveedor, su política de producción es decreciente hasta el punto de emular aproximadamente el comportamiento descrito para el caso en que el comprador era el líder absoluto de la cadena de suministros. De la misma manera, las políticas de transporte y producción del vendedor son muy similares a las obtenidas para el segundo modelo. Lo anterior puede parecer un poco contradictorio, sin embargo, dado que los costos para el comprador en el primer modelo fueron tan altos, la integración de la cadena de suministros busca utilizar una estrategia menos agresiva que no repercuta abruptamente sobre los costos de ambos agentes. Para el caso del comprador, al incrementarse $KP_{i,t}$ es necesario enfatizar que la política de inventarios de éste en comparación a la del modelo 1, se reduce considerablemente al pasar de tener 500 a 40 unidades promedio en inventario.

Al igual que como se describió en anteriores subsecciones, los modelos de negociación ofrecen los mismos resultados que el modelo integrado en términos de las políticas de inventarios, pedidos, transporte y producción. Es así como los modelos cooperativos garantizan el costo mínimo total de la cadena de suministros a pesar de la bonificación.

El modelo para el cual hay negociación y el proveedor es el líder, el comprador siempre está dispuesto a ofrecer la compensación porque a pesar de entregar esa cantidad de dinero, su estructura de costos nunca alcanzará el mismo valor que para el caso en que se encontraba dominado absolutamente. De manera análoga, cuando hay cooperación y el comprador es el líder, el vendedor siempre está dispuesto a ofrecer una bonificación al comprador porque su estructura de costos nunca será equivalente a la obtenida en el caso en que se encontraba dominado.

Para finalizar, los resultados correspondientes a los ahorros para cada uno de los agentes de la cadena de suministros se presentan a continuación.

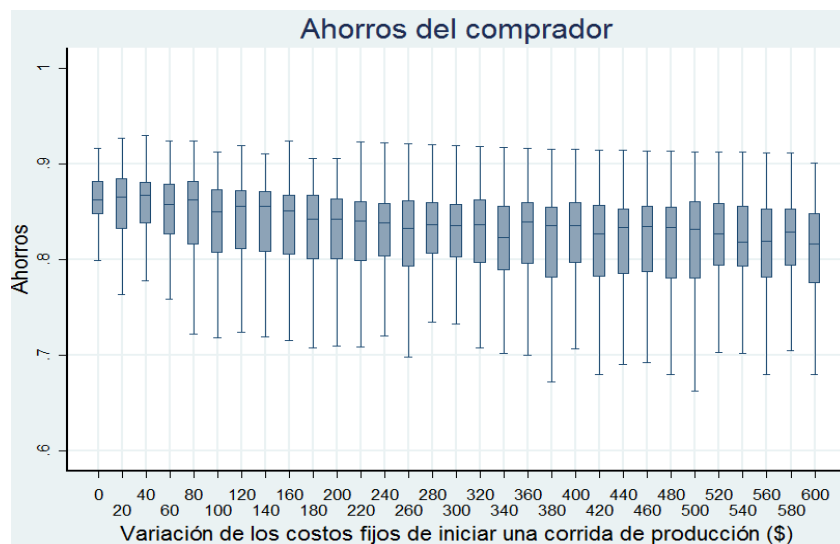


Ilustración 19. Ahorros para el comprador al utilizar los modelos cooperativos.

La anterior ilustración permite ver cómo a medida que los costos fijos de iniciar una corrida de producción aumentan, los ahorros para el comprador parecen estabilizarse en un punto muy alto (85%). Lo anterior se explica principalmente en que al pasar de un modelo de dominancia absoluta por parte del vendedor a uno en que hay disposición a negociar, se genera una reducción significativa en términos de los costos de mantenimiento de inventario para el comprador.

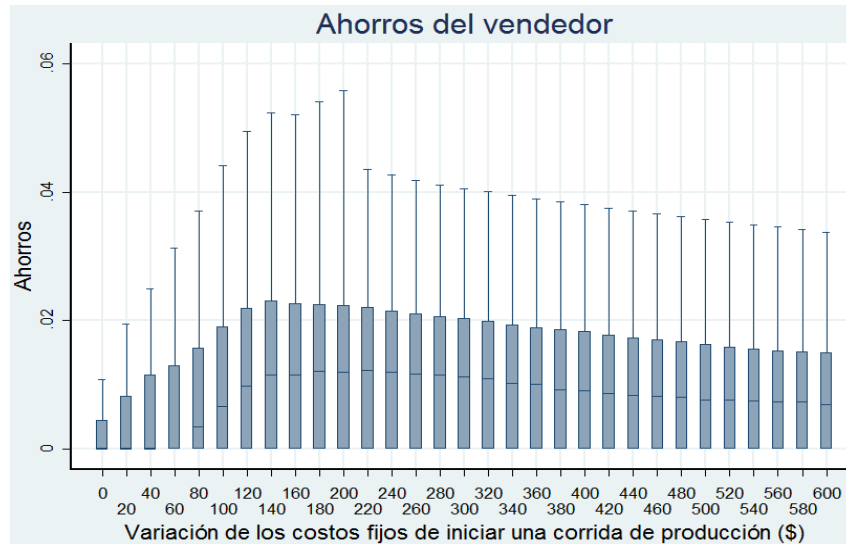


Ilustración 20. Ahorros para el vendedor al utilizar los modelos cooperativos.

De acuerdo a lo mostrado en la ilustración 20, los ahorros del vendedor son muy pequeños (alrededor del 1%) y tienen un comportamiento con tendencia decreciente y variabilidad creciente. Este comportamiento se debe (al igual que sucede para el escenario de variación del costo de mantenimiento de inventario del vendedor) a que el modelo de negociación con el vendedor como líder, al imitar el modelo integrado, trata de evitar que el comprador caiga en la situación de tener una cantidad exagerada de unidades en inventario y de esta manera no es posible replicar de manera exacta el modelo de dominancia absoluta del vendedor. Es por esto que los ahorros para el vendedor no son muy significativos mientras que para el comprador sí.

8.5. Escenario para la variación de $KT_{i,t}$

Tal y como se esperaba, para el modelo en que el vendedor es el líder absoluto de la cadena de suministros, se establece una política transporte decreciente la cual busca promover una producción constante a cambio de una política de inventarios creciente. Dicho lo anterior y teniendo en cuenta en que es imposible reducir a cero el número de veces en que se transporta un lote de producción, a medida que se incrementan los costos fijos de transporte, los costos totales para el vendedor serán obligatoriamente crecientes. El comprador por su parte no se beneficia en este escenario porque debe mantener una cantidad exagerada de inventario lo cual repercute directamente en los costos.

Cuando el comprador se convierte en el líder absoluto de la cadena de suministros y sabiendo que su estructura de costos es constante, entonces este alcanza una política de pedidos lote a lote en la cual hay cero inventarios. El vendedor para este escenario, se ve

perjudicado porque debe atender una política de pedidos lote a lote y esto solamente es posible transportando todos los periodos. Es por lo anterior que, los costos totales para el proveedor van a ser crecientes a lo largo de la variación de $KT_{i,t}$.

El modelo integrado ofrece resultados acordes a lo esperado, puesto que al incrementarse los costos fijos de transportar la política asociada a dicho rubro es decreciente. De la misma manera, las políticas de transporte y producción del vendedor son muy similares a las obtenidas para el segundo modelo. Lo anterior si bien es discordante, responde al mismo motivo que para el escenario en que se variaron los costos fijos de iniciar una corrida de producción: como los costos para el comprador en el primer modelo fueron tan altos, la integración de la cadena de suministros busca utilizar una estrategia mixta (políticas de inventario, transporte y producción entre el modelo 1 y 2) que no afecte significativamente los costos de ambos agentes. Para el comprador, a medida que $KT_{i,t}$ varía, se desarrolla una política de inventarios que, en comparación con el modelo 1, pasa de tener 496 a 25 unidades promedio en inventario.

Acerca de las bonificaciones, para el modelo en el cual hay negociación y el proveedor es el líder, se puede decir que el comprador siempre está dispuesto a ofrecer la compensación porque su estructura de costos nunca alcanzará la misma cuantía que para el caso en que se encontraba dominado absolutamente. De manera equivalente, cuando hay cooperación y el comprador es el líder, el vendedor siempre está dispuesto a ofrecer una bonificación por la misma razón expuesta previamente para el comprador.

Por último, vale la pena hablar de los ahorros obtenidos para este escenario de variación en los costos de transporte. Los ahorros del comprador, al igual que en el caso de la subsección 8.4., son estables y además muy grandes (80%). Dichos ahorros son provocados por la reducción de los costos de mantenimiento de inventario para el comprador al pasar del modelo 1 al modelo 4. Los ahorros del vendedor siguen siendo muy reducidos (alrededor del 5%) y tienen un comportamiento con tendencia y variabilidad creciente. Esto gracias a que el modelo de negociación con el vendedor como líder, evita que el comprador caiga en la situación de tener una gran cantidad de inventario y de esta forma no es posible replicar el modelo de dominancia absoluta del vendedor.

9. ANÁLISIS DE VARIABILIDAD DE LA DEMANDA

A lo largo de los años, múltiples estudios enfocados en resolver problemas de coordinación de la cadena de suministros se han preocupado también por entender y abordar escenarios donde la demanda tiene comportamientos estocásticos o muy inestables. Dicha preocupación está fundamentada en que la variabilidad de la demanda tiene un gran impacto sobre comportamiento de los agentes al interior de la cadena de suministros, lo cual se ve directamente reflejado en el aspecto económico (ver por ejemplo los trabajos de Sinha y Sarmah (2010), Mahata, Goswami y Gupta (2005) o Boctor, Laporte & Renaud (2004)).

Con el fin de entender el papel que juega la inestabilidad de la demanda sobre el proceso de toma de decisiones de los agentes en la cadena de suministros, en esta sección se analizan los ahorros, tanto para el comprador como el vendedor, ante cambios radicales del parámetro en cuestión y algunos costos iniciales de los modelos. Para lograr el objetivo previamente expuesto se siguió exactamente la misma metodología propuesta para la sección 8, no obstante, se generaron y evaluaron siete diferentes distribuciones de probabilidad continua uniforme para cada una de las 100 instancias.

Luego de generar todos los modelos para sus respectivas instancias, los resultados más importantes se presentan en las siguientes tablas:

Parámetros de la distribución de probabilidad uniforme	Ahorros	$HB_{i,t}$		$KB_{i,t}$	
		Media	Desviación	Media	Desviación
[50-500]	Comprador	79.06%	13.37%	64.27%	13.78%
	Vendedor	8.03%	9.06%	5.62%	5.55%
[100-500]	Comprador	79.28%	13.83%	63.83%	14.45%
	Vendedor	5.72%	8.68%	4.93%	5.51%
[150-500]	Comprador	79.78%	13.95%	63.56%	14.64%
	Vendedor	4.30%	7.70%	4.15%	5.10%
[200-500]	Comprador	79.74%	14.45%	62.41%	15.30%
	Vendedor	3.47%	7.18%	3.53%	4.83%
[250-500]	Comprador	79.52%	15.51%	60.76%	16.40%
	Vendedor	2.34%	5.63%	2.87%	4.14%

[300-500]	Comprador	81.02%	15.64%	61.39%	17.15%
	Vendedor	1.38%	3.89%	1.99%	3.30%
[350-500]	Comprador	81.54%	16.17%	61.08%	17.61%
	Vendedor	0.79%	2.55%	1.25%	2.61%

Tabla 7. Ahorros obtenidos para el comprador y vendedor ante la variación de la demanda (1).

Parámetros de la distribución de probabilidad uniforme	Ahorros	$KP_{i,t}$		$KT_{i,t}$		$HP_{i,t}$	
		Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
[50-500]	Comprador	83.00%	5.34%	82.55%	7.11%	81.69%	5.61%
	Vendedor	4.81%	3.45%	5.24%	5.33%	9.26%	6.18%
[100-500]	Comprador	83.23%	5.27%	82.48%	7.11%	82.01%	5.66%
	Vendedor	1.17%	1.35%	2.55%	3.64%	4.24%	4.21%
[150-500]	Comprador	83.86%	4.56%	83.24%	6.69%	82.97%	4.96%
	Vendedor	0.00%	0.00%	0.98%	1.84%	1.45%	2.54%
[200-500]	Comprador	84.99%	4.28%	83.03%	6.91%	83.84%	4.60%
	Vendedor	0.00%	0.00%	0.23%	0.64%	0.63%	1.46%
[250-500]	Comprador	85.18%	4.30%	83.35%	6.96%	84.40%	4.69%
	Vendedor	0.00%	0.00%	0.01%	0.06%	0.34%	0.89%
[300-500]	Comprador	86.22%	4.30%	83.98%	6.36%	85.38%	4.91%
	Vendedor	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.23%
[350-500]	Comprador	87.74%	3.44%	84.57%	6.03%	85.83%	5.18%
	Vendedor	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 8. Ahorros obtenidos para el comprador y vendedor ante la variación de la demanda (2).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 8 y en la tabla 9, se puede concluir que existe una estrecha relación entre la variabilidad de la demanda y los niveles de ahorro por parte de los agentes de la cadena de suministros. A medida que los parámetros de la distribución de probabilidad uniforme se encuentran más acotados, es decir más cerca el uno del otro, las variabilidades del ahorro tanto para el comprador como para el vendedor se ven reducidas significativamente. Lo anteriormente dicho se justifica principalmente en el hecho de que ante valores muy cambiantes de la demanda, los modelos de programación

lineal pueden llegar a tomar decisiones de políticas de inventarios, pedidos, producción y transporte muy extremas y poco estables a lo largo de un horizonte de planeación.

Por otra parte y para finalizar, vale la pena destacar que conforme la distribución de probabilidad se vuelve menos variable, los ahorros promedio para el comprador tienden a crecer un poco mientras que para el vendedor ocurre todo lo contrario. Tal y como se analizó en secciones anteriores, dado que el vendedor se encuentra en una posición en la que debe satisfacer inevitablemente la demanda del comprador, entonces este no puede tener una política de inventarios, transporte o producción muy flexible y es por este motivo que sus ahorros se vuelven cada vez más pequeños conforme la demanda se estabiliza. Caso contrario le sucede al comprador, que puede pasar de políticas de inventarios muy ineficientes (como cuando está dominado y no hay cooperación) a otras prácticamente óptimas.

10. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron múltiples modelos de programación lineal que junto a la teoría de juegos, permitieron estudiar y analizar los beneficios de coordinar la cadena de suministros de dos eslabones, productor y comprador, a través del uso de la metodología de las Épocas Comunes de Resurtido en un ambiente de demanda dinámica. Como el estudio numérico lo muestra, cuando el vendedor y el comprador están dispuestos a cooperar, la efectividad de la estrategia CRE incrementa significativamente. De hecho, los modelos de negociación demuestran que, a pesar del establecimiento de una bonificación, es posible alcanzar los costos mínimos para la cadena de suministros. De igual manera, aun cuando el agente dominado de la cadena de suministros debe ofrecer la compensación económica (lo cual incrementa su función objetivo) al otro, los costos totales del primero siempre van a ser iguales o menores al escenario no cooperativo.

El análisis de sensibilidad realizado para los cinco modelos propuestos en este estudio, permiten evidenciar de manera formal que los modelos de negociación siempre alcanzan los costos mínimos de la cadena de suministros. Lo anterior porque estos modelos emulan de manera exacta las políticas de inventario y pedidos para el comprador y las políticas de inventario, producción y transporte para el vendedor. Adicionalmente, las bonificaciones juegan un papel fundamental en el proceso de toma de decisiones de los agentes, puesto que los ambientes de negociación sólo se promoverán bajo dos condiciones: el líder deberá obtener la misma (o mejor) estructura de costos que cuando era líder absoluto de la cadena

y el seguidor está dispuesto a ofertar hasta el punto en que sus costos se equiparen al caso en que se encontraba dominado.

Como se presenta a través de las diferentes gráficas, los ahorros obtenidos por el proveedor o el comprador siempre van a ser mayores o iguales a cero. Asimismo, dado que el mayor poder de negociación lo tiene el comprador (debido a que la demanda debe ser siempre satisfecha), los ahorros que puede alcanzar este serán mucho mayores a los que puede aspirar el vendedor. Dependiendo de algunos escenarios, las políticas de negociación promueven la imitación de los casos de dominancia absoluta y de esta manera los ahorros de los eslabones de la cadena crecen considerablemente. Para otros escenarios, las políticas de negociación proponen soluciones muy balanceadas en términos de costos para los agentes de la cadena y así los ahorros son prácticamente nulos.

De acuerdo a la revisión de la literatura y lo encontrado en la sección 9, se ratifica que la variabilidad de la demanda juega un papel vital en los modelos de coordinación de inventarios puesto que ante cambios muy abruptos de la misma, los procesos de toma de decisiones no son constantes ni consecuentes a lo largo del horizonte de planeación. Los ahorros obtenidos por los agentes son tan variables como la demanda lo sea; es decir que a menor variabilidad de la demanda, más estables serán los beneficios para los agentes.

Es muy importante tener en cuenta que al trabajar modelos de optimización con demanda dinámica, los eslabones de la cadena de suministros tratan de encontrar las mejores soluciones posibles prácticamente periodo a periodo. Es por esto que algunas políticas pueden llegar a ser a veces un poco contra-intuitivas y hasta “incoherentes”, sin embargo, esto puede ser una de las limitaciones del estudio.

Debido al alcance fijado para este proyecto de investigación, existen diversas posibilidades de mejoramiento y trabajo futuro: la inclusión de múltiples escenarios donde se evalúen comportamientos de la demanda diferentes a distribuciones de probabilidad uniforme; la relajación del supuesto de que la demanda deba ser satisfecha y así incluir modelos que estudien la posibilidad de tener faltantes en un ambiente tanto de backorders como ventas perdidas; implementar modelos de optimización multi-objetivo donde se puedan considerar al mismo tiempo las funciones objetivo de los agentes; complementar el modelaje inicial a una cadena de suministros de tres eslabones: productor, transportista y comprador; entre otros.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Banerjee, A. (1986). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences*, 17(3), 292–311. <http://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1986.tb00228.x>
- Ben-Daya, M., & Hariga, M. (2004). Integrated single vendor single buyer model with stochastic demand and variable lead time. *International Journal of Production Economics*, 92(1), 75–80. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.012>
- Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2004). Models and algorithms for the dynamic-demand joint replenishment problem. *International Journal of Production Research*, 42(13), 2667–2678. <http://doi.org/10.1080/00207540410001671660>
- Chang, W., & Tsai, C. (2003). A Two-Echelon Inventory Model for Single-Vender and Multi-Buyer System Through Common Replenishment Epochs. *International Journal of The Computer, The Internet and Management*, 10(3), 48–61.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2007). SUPPLY CHAIN MANAGEMENT Strategy, Planning, and Operation. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.
- Dong, Y., Dresner, M., & Shankar, V. (2001.). The Impact of Efficient Replenishment and Continuous Replenishment on Supply Chain Outcomes.
- Dong, Y., & Xu, K. (2002). A supply chain model of vendor managed inventory. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(2), 75–95. [http://doi.org/10.1016/S1366-5545\(01\)00014-X](http://doi.org/10.1016/S1366-5545(01)00014-X)
- Feng, Y., & Viswanathan, S. (2007). Impact of demand uncertainty on coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs. *Journal of the Operational Research Society*, 58(7), 964–971. <http://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602219>
- Goyal, S. K. (1976). An integrated inventory model for a single supplier-single customer problem. *International Journal of Production Research*, 15(1), 107–111. <http://doi.org/10.1080/00207547708943107>
- Goyal, S. K., & Gupta, Y. P. (1989). Integrated inventory models: The buyer-vendor coordination. *European Journal of Operational Research*, 41(3), 261–269. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90247-6](http://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90247-6)

Hwang, J., Wu, S. H., & Huang, Y. (2008). Improving Supplier's Performance Using Common Replenishment Epochs in a Vendor-Managed Inventory System. In *The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications* (pp. 199–206).

Hwang, J., & Wu, S. H. (2013). Coordinating supplier-retailer using multiple common replenishment epochs with retailers' choices. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(2), 441–455. <http://doi.org/10.3926/jiem.536>

Jiménez, J. (2005). Estado del Arte de los Modelos Matemáticos para la Coordinación de Inventarios en la Cadena de Suministro. Instituto Mexicano del Transporte.

Lu, L. (1995). A one-vendor multi-buyer integrated inventory model. *European Journal of Operational Research*, 81(2), 312–323. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0357-4](http://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0357-4)

Mahata, G. C., Goswami, A., & Gupta, D. K. (2005). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor in fuzzy sense. *Computers & Mathematics with Applications*, 50, 1767–1790. <http://doi.org/10.1016/j.camwa.2004.10.050>

Mishra, A. K. (2003). Selective discount for supplier-buyer coordination using common replenishment epochs. *European Journal of Operational Research*, 153, 751–756. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00811-1](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00811-1)

Monahan, J. P. (1986). A Quantity Discount Pricing Model to Increase Vendor Profits. *Management Science*, 32(11), 1513–1517. <http://doi.org/10.1287/mnsc.32.11.1513>

Piplani, R., & Viswanathan, S. (2004). Supply chain inventory co-ordination through multiple, common replenishment epochs and selective discount. *International Journal of Logistics*, 7(2), 109–118. <http://doi.org/10.1080/13675560410001670224>

Sinha, S., & Sarmah, S. P. (2010). Single-vendor multi-buyer discount pricing model under stochastic demand environment. *Computers and Industrial Engineering*, 59(4), 945–953. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2010.09.005>

Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2011). *Essentials of Operations Management*. Harlow: Pearson Education Limited.

Sucky, E. (2003). A single buyer-single supplier bargaining problem with asymmetric information - theoretical approach and software implementation. In *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences 2003 Proceedings of the*.

Villa Marulanda, M., & Torres Delgado, J. F. (2012). Análisis de teoría de juegos en cadenas de suministros de dos niveles, productor-comprador, bajo esquema vendor managed inventory (vmi). (Spanish). *Iteckne*, 9(1), 67–82. Retrieved from <http://bd.univalle.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=85708527&lang=es&site=eds-live>

Viswanathan, S., & Piplani, R. (2001). Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs. *European Journal of Operational Research*, 129(2), 277–286. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00225-3](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00225-3)

Yao, M. J., & Chiou, C. C. (2009). A new cooperative scenario for supply chains using common replenishment epochs. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 52(3), 263–282.

Yao, Y., Evers, P. T., & Dresner, M. E. (2005). Supply chain integration in vendor-managed inventory. *Decision Support Systems*, 43(2), 663–674. <http://doi.org/10.1016/j.dss.2005.05.021>

Yu, Y., & Huang, G. Q. (2010). Nash game model for optimizing market strategies, configuration of platform products in a Vendor Managed Inventory (VMI) supply chain for a product family. *European Journal of Operational Research*, 206(2), 361–373. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.02.039>

Yu, Y., Huang, G. Q., & Liang, L. (2008). Stackelberg game-theoretic model for optimizing advertising, pricing and inventory policies in vendor managed inventory (VMI) production supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 368–382. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2008.12.003>

Yu, Y., Liang, L., & Huang, G. (2006). Leader–follower game in vendor-managed inventory system with limited production capacity considering wholesale and retail prices. *International Journal of Logistics*, 9(4), 335–350. <http://doi.org/10.1080/13675560600836910>

Yu, Y., Wang, Z., & Liang, L. (2012). A vendor managed inventory supply chain with deteriorating raw materials and products. *International Journal of Production Economics*, 136(2), 266–274. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.029>