

Optimización de inventarios en una cadena de suministro de productos de consumo masivo

Carlos Julio Vidal Holguín

Profesor Titular, Universidad del Valle,
Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística,
Cali, Colombia.

Julio César Londoño Ortega

Universidad del Valle, Maestría en Ingeniería
con énfasis en Ingeniería Industrial, Cali,
Colombia.

Fernando Contreras Rengifo

Caja de Compensación Familiar del Valle del
Cauca, (COMFANDI).

RESUMEN

Uno de los problemas más complejos que afectan nuestras empresas industriales y comerciales es la administración y control de los inventarios. Es muy frecuente escuchar el problema del desbalanceo de inventarios: *“¿Por qué será que siempre tenemos mucho de lo que casi no se vende y hay faltantes de lo que sí se mueve?”* En este artículo abordaremos las causas de este problema y sus posibles soluciones, especialmente en cadenas de suministro con una bodega y múltiples puntos de venta (One-Warehouse N-Retailer Problem). Se discutirán diversas técnicas de control de inventarios para este sistema, concentrándose también en sus aspectos logísticos generales, ilustrando con la aplicación real en una empresa comercializadora de productos de consumo masivo. Los impresionantes resultados obtenidos evidencian un excelente potencial de aplicación de estos modelos en empresas comerciales o industriales interesadas en basar sus procesos de toma de decisiones en la Investigación de Operaciones.

Palabras clave: Control de Inventarios, One-Warehouse N-Retailer Problem, Sistemas de inventarios multi-escalón, Inventarios de productos de consumo masivo.

1. INTRODUCCIÓN¹

El control y administración de inventarios es uno de los temas más apasionantes en Logística y una de las principales aplicaciones prácticas de la Investigación de Operaciones (IO). Es muy común escuchar a los administradores, gerentes y analistas de Logística afirmar que uno de sus principales problemas es la administración de los inventarios. El problema típico es la existencia de excesos y de faltantes: *“Siempre tenemos demasiado de lo que no se vende, y muchos agotados de lo que sí se vende.”* Lo interesante de este problema es que ocurre prácticamente en cualquier empresa del sector industrial o comercial, especialmente en nuestro medio. Trataremos de explicar sus causas y las posibles estrategias para resolverlo o al menos atenuarlo.

Las causas fundamentales para la necesidad del mantenimiento de inventarios en cualquier empresa son, inicialmente, el desfase que existe entre la demanda de los consumidores y la producción o suministro de dichos productos y, principalmente, las fluctuaciones aleatorias de la demanda y de los tiempos de reposición ('Lead Times') en la cadena de suministro. Las estrategias más comunes para manejar estas fluctuaciones son el mejoramiento de la calidad de la información, el mantenimiento de inventarios de seguridad y la colaboración en la cadena de abastecimiento. La primera estrategia tiene que ver con la obtención y transmisión de información precisa y en tiempo real sobre la demanda en los puntos de consumo y con la correcta identificación de los productos, las cuales se pueden lograr a través de la aplicación de tecnologías de punta en información, tales como WMS, EDI y sistemas automáticos de identificación, entre otras. La

¹ Complementado de Vidal (2001) y Vidal (2002).

segunda y tercera estrategias pueden incluir, entre otros, algunos de los siguientes puntos:

- La consolidación de centros de distribución y bodegas para aumentar los volúmenes de demanda por instalación, ya que más altos volúmenes de demanda conducen generalmente a menores niveles de variabilidad de la misma.
- La estandarización de productos para evitar el mantenimiento de inventarios de una gran diversidad de ítems que sólo difieren en aspectos menores de forma, color, condición, etc. Las características finales del producto pueden ser implementadas en el momento de recibir las órdenes de los clientes. (*Principio de posposición de forma*)
- El mejoramiento de los sistemas de pronósticos de demanda a través de técnicas estadísticas de reconocida eficacia y de combinación de diversas técnicas de pronósticos, incluyendo las metodologías cualitativas donde la experiencia y el conocimiento de las personas son muy importantes.
- El mejoramiento de alianzas y de sistemas de comunicación con proveedores y clientes para la reducción del promedio y la variabilidad de los Lead Times.
- La emisión de órdenes conjuntas para diversos grupos de ítems con el objeto de balancear su inventario y la consolidación de despachos desde (hacia) diversas localidades, a través de técnicas como el cross-docking. (*Principio de posposición de tiempo*)
- La reducción de demoras y Lead Times a lo largo de toda la cadena de abastecimiento, incluyendo los tiempos de tránsito en los sistemas de transporte.
- El compartir información de demanda a lo largo de la cadena de suministro.

Debido a que las causas que generan la necesidad de mantener inventarios no pueden ser eliminadas totalmente, y a que la inversión en tecnología de información avanzada resulta muy costosa y cuestionable para la mayoría de nuestras organizaciones, la mejor alternativa

es aplicar sistemas eficientes de gestión y control para responder a dichas causas. El problema en la mayoría de nuestras empresas radica principalmente en que los inventarios de seguridad y sus correspondientes puntos de reorden se determinan exclusivamente con base en el *promedio* de la demanda, ignorando su *variabilidad* y la *variabilidad de los Lead Times*. Por ejemplo, para cierto ítem, se podría establecer el inventario de seguridad en “dos semanas de inventario”. Esto significa que, *en promedio*, el inventario de seguridad tardaría aproximadamente dos semanas en agotarse. En realidad, dicho inventario puede durar mucho menos o mucho más de dos semanas, dependiendo de la variabilidad de la demanda del ítem considerado.

Es un error conceptual grave, por lo tanto, definir inventarios de seguridad y puntos de reorden (o inventarios máximos para sistemas periódicos de control) de los ítems proporcionalmente a su demanda promedio en forma exclusiva. De aquí precisamente provienen los desbalances de inventario mencionados anteriormente. Cuando la variabilidad de la demanda del ítem del ejemplo anterior es baja, dos semanas de inventario de seguridad puede ser un exceso en el que se está invirtiendo capital innecesariamente. Por el contrario, si la variabilidad de la demanda del ítem es alta, dos semanas de inventario de seguridad puede ser muy poco y ocurrirán agotados frecuentes de dicho ítem. Sólo en algunas ocasiones los inventarios de seguridad y los puntos de reorden (o los inventarios máximos), calculados solamente con base en la demanda promedio, coinciden con el valor óptimo obtenido como resultado de un análisis estadístico formal. La clave consiste entonces en liberar capital invertido en inventarios de seguridad de ítems con baja variabilidad y distribuirlo en inventarios de seguridad de ítems con alta variabilidad. El balance de esta operación es frecuentemente positivo y se puede mejorar significativamente el servicio al consumidor sin invertir un peso adicional en inventarios, se puede mantener el servicio actual con mucho menos capital invertido, o

incluso se puede diseñar una combinación intermedia de ambos beneficios.

La solución entonces de estos problemas frecuentes de desbalanceo de inventarios es de diseñar e implementar estrategias adecuadas de control, a través de las siguientes alternativas, las cuales podrían implementarse también para cada tipo de ítem A, B o C:

- Utilización de sistemas adecuados de pronósticos de demanda, que permitan estimar con precisión el patrón, el promedio y la variabilidad de la demanda de cada ítem que se mantenga en inventario. De esta forma, los inventarios de seguridad se calculan proporcionalmente a la variabilidad de la demanda, de acuerdo con el nivel de servicio deseado, y no proporcionalmente al promedio de la misma. Debe minimizarse las causas frecuentes de errores excesivos en los pronósticos, tales como la selección del modelo matemático inadecuado, la utilización de datos poco confiables y de datos de *ventas* en lugar de *demanda*, los sesgos en los pronósticos, la inclusión de datos atípicos y la selección errada del período fundamental del pronóstico.
- Medición adecuada de los Lead Times y de su variabilidad en toda la cadena de suministro, para incluir esta fuente de variabilidad en el cálculo de los inventarios de seguridad.
- A pesar de que algunos autores consideran que la clasificación ABC está perdiendo actualmente vigencia debido al avance de las capacidades computacionales para implementar los sistemas de control de todos los ítems, esta simple herramienta puede ser muy valiosa para la función administrativa del inventario por categorías. A través de ella se pueden establecer prioridades de administración y diferenciar los sistemas de control de ítems en cada categoría.
- Definición de los lugares más adecuados dentro de la cadena de abastecimiento donde se debe mantener inventarios y determinación de sus niveles correspondientes.

- Consideración de aspectos fundamentales tales como el ciclo de vida del producto, la naturaleza del proceso productivo bajo estudio (en ambientes productivos) y los aspectos financieros relacionados con inventarios, tales como los plazos de pago, sus descuentos asociados e indicadores claves como el porcentaje de inventario pagado y/o la rotación neta, descritos posteriormente.
- Es muy común el error, por ejemplo, de medir el desempeño de un sistema de gestión y control de inventarios a través de su rotación solamente y querer mejorarla incluso a costa del nivel de servicio ofrecido al cliente. Por esta razón, se debe mantener una generación continua de indicadores de eficiencia que reflejen en conjunto toda la operación del sistema de control de inventarios, tales como:
 - Indicadores de nivel de servicio al cliente, como probabilidad de ocurrencia de faltantes, porcentaje de demanda satisfecha del inventario a la mano ('fill rate') y porcentaje de demanda no satisfecha y/o nivel de órdenes pendientes ('backorders');
 - El valor, composición y grado de obsolescencia del inventario;
 - Adicionalmente a la rotación de los inventarios, generar la rotación neta, basada en el inventario promedio pagado (inventario promedio menos promedio de cuentas por pagar) y también posiblemente considerando las cuentas por cobrar en el caso de ventas a crédito;
 - El porcentaje de precisión del inventario físico;
 - Indicadores financieros tales como el porcentaje del inventario pagado, la cobertura del inventario comparada con los beneficios financieros obtenidos por medio de grandes volúmenes de compra o producción, la rentabilidad de ítems por cada clase y línea de producto, y el retorno sobre la inversión en inventarios.

Adicionalmente a los puntos anteriores, debe tenerse en cuenta algunas sugerencias

para reducir inventarios, sin compromiso de los niveles de servicio, como por ejemplo:

- Concentrarse en el control de ítems clase A y los primeros ítems clase B a través de su revisión individual y continua, tamaños de orden más pequeños pero más frecuentes y la interacción con los proveedores y clientes para influir en su demanda y reducir sus Lead Times.
- Evitar tamaños excesivos de órdenes, incluso para ítems clase C.
- Depurar periódicamente el inventario, eliminando excesos e ítems obsoletos y de muy bajo movimiento que carezcan de importancia para la organización y para los consumidores.
- Controlar las compras de gran volumen sin los beneficios financieros adecuados.
- Racionalizar y negociar adecuadamente las compras iniciales de ítems nuevos.

Todas las estrategias anteriores enmarcan las condiciones mínimas necesarias para el correcto diseño e implementación de verdaderos sistemas de control de inventarios en cadenas de abastecimiento. El arte de la aplicación de técnicas de IO en este caso consiste entonces no sólo en el correcto diseño de modelos matemáticos para el control de inventarios, sino también en permitir que las condiciones anteriores puedan darse.

Este trabajo se concentra entonces en una cadena de abastecimiento con una bodega y N puntos de venta (One-Warehouse N -Retailer Problem), tal como se muestra en la Figura 1. En este tipo de cadenas, normalmente, muchos proveedores suministran decenas o cientos de miles de productos, los cuales se almacenan en una bodega central, de donde son despachados hacia N puntos de venta para su comercialización y satisfacción de la demanda de los clientes. Algunos problemas de gestión de inventarios en este tipo de cadenas se concentran en determinar la cantidad de inventario de cada ítem a mantener en la bodega y en los puntos de venta, las políticas de control en la bodega y en los puntos de venta, y la forma de coordinación entre la bodega central y los puntos de venta. Este

trabajo pretende ilustrar principalmente la práctica de la IO relacionada con los sistemas de control de inventarios asociados con estas cadenas de suministro.

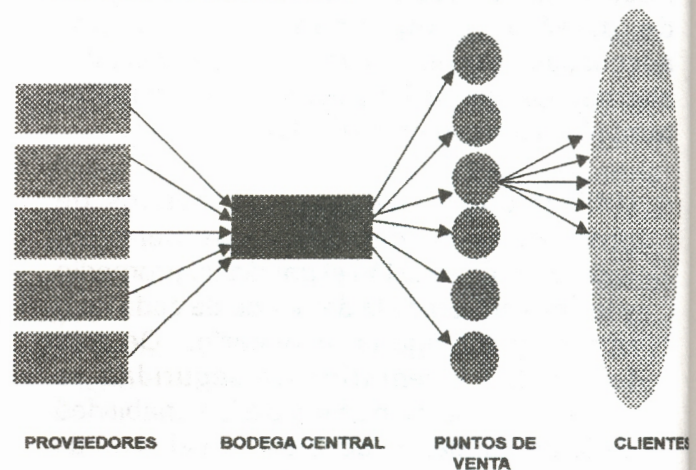


Figura 1. Una cadena de abastecimiento típica con una bodega y N puntos de venta

En la sección siguiente se presenta una breve revisión de literatura que ha tratado principalmente el problema de control de inventarios en los sistemas mostrados en la figura anterior. La sección 3 describe las principales características de los métodos utilizados en la aplicación. La sección 4 ilustra los resultados obtenidos mediante la aplicación de estos métodos en un sistema real de comercialización de productos de consumo masivo y, finalmente, la sección 5 detalla algunas conclusiones y oportunidades de investigación futura en el área.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Uno de los temas más complejos en control de inventarios es la gestión de inventarios en sistemas multi-etápicas o, equivalentemente, en cadenas de abastecimiento. De acuerdo con Silver et al. (1998), la complejidad surge principalmente de la coordinación de las diferentes localidades y la estrecha relación e impacto que una decisión tomada en un punto de la cadena tiene sobre todos los demás puntos de la misma. Axsäter (2000), afirma que se puede esperar que una política de control óptima para un sistema de control de

inventarios multi-etápico sea considerablemente compleja, incluso en aquellos casos en los cuales la demanda se puede considerar determinística. Silver et al. (1998) sostienen además que la demanda probabilística crea complejidades extremas de modelación en una situación de inventarios en cadenas de suministro.

El conocido efecto 'Bullwhip' ilustra las complejidades mencionadas. En este fenómeno, por más uniforme que sea la demanda en el punto final de la cadena (clientes), la demanda inducida sobre los puntos de la cadena situados 'aguas-arriba' (la bodega central y los proveedores, en este caso) se vuelve en la mayoría de los casos altamente errática, o, en otras palabras, presenta alta variabilidad, lo que induce altos niveles de inventarios de seguridad, los cuales pueden ser innecesarios en la mayoría de las ocasiones. Como sostienen Lee et al. (1997), existen cuatro factores que ayudan a producir el efecto Bullwhip:

- La emisión de órdenes infladas cuando se presenta escasez, para tratar de obtener mayor participación en órdenes compartidas con otros puntos de almacenamiento en la cadena;
- La consolidación de órdenes para tratar de reducir el efecto de los costos fijos;
- La variación de costos de producción y/o compra, lo que induce lotes de manufactura o compra más grandes.

Otras complejidades de un sistema como el mostrado en la Figura 1 anterior pueden incluir las siguientes:

- Consideraciones de costos en las diferentes etapas;
- La definición de nivel de servicio para las diversas etapas de la cadena;
- La demanda pronosticada de acuerdo con lo observado por el siguiente eslabón de la cadena. Por ejemplo, la bodega central experimenta la demanda de los puntos de venta, quienes a su vez reaccionan a la demanda de los clientes o consumidores finales;

- La definición de Lead Time entre un eslabón y otro de la cadena, ya que, por ejemplo, el Lead Time entre la bodega central y los puntos de venta puede depender del Lead Time entre los proveedores y la primera;
- La presencia de órdenes para las cuales no hay disponibilidad completa de productos para todos los puntos de venta y las políticas de asignación en estos casos;
- La posibilidad de despachos directos desde la bodega central hacia los clientes finales y de transferencias entre puntos de venta.

Schwarz (1973) fue de los primeros autores en estudiar las cadenas de suministro con una bodega y N puntos de venta, y pudo demostrar que incluso en el caso determinístico para $N > 2$ la forma de la política óptima de control de inventarios puede llegar a ser muy compleja. Muchas aproximaciones a este problema se constituyen en simplificaciones que abordan el problema complejo mediante situaciones semejantes, pero más simples [Véase, por ejemplo, Axsäter (1993a, 1993b y 2000) y Cheng y Zheng (1997)].

La mayoría de los trabajos para este tipo de cadenas asumen demanda con distribución de Poisson en los puntos de venta y han sido desarrollados para ítems de alto valor y lento movimiento [Por ejemplo, Forsberg (1995, 1996), Cohen et al. (1986), Graves (1996) y Axsäter (1998)]. En otros casos, en ambientes productivos con remanufactura (reparación de ítems), se asume también demanda de Poisson o procesos de Poisson compuestos [Véase, por ejemplo, Sherbrooke (1968), con su trabajo pionero denominado METRIC²]. Finalmente, gran parte de los trabajos asumen que los N detallistas son idénticos [Véase, por ejemplo, Moinszadeh (2002) y Chen y Samroengraja (2000)].

Entre algunas excepciones, que asumen demanda normal en los puntos de venta, se encuentran Axsäter (2000), quien presenta un análisis exacto para un sistema serial con un solo punto de venta, el cual es una extensión del trabajo de Clark y Scarf (1960). Axsäter

² Debido al nombre en Inglés, 'Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control'

sostiene que la metodología utilizada puede ser extendida a casos como el que se aborda en este trabajo, como lo presentado en los artículos de Federgruen y Zipkin (1984) para el caso en que la bodega central actúa como un centro de cross-docking, y Matta y Sinha (1995) cuando la bodega central almacena inventario. La aplicación práctica de los trabajos anteriores, sin embargo, se ve limitada por la necesidad de estimar el costo de faltantes por unidad monetaria y por unidad de tiempo en cada uno de los puntos de venta, para cada uno de los ítems que se mantienen en inventario y por las múltiples complejidades que un sistema real de una bodega y N puntos de venta presenta, las cuales difícilmente podrían incluirse en un modelo integral de control con resultados analíticos. Otro ejemplo que cae dentro de esta categoría es el trabajo de Lee et. al. (2000).

Axsäter et al. (2002) analizan un sistema con un solo proveedor con capacidad infinita, una bodega central y varios detallistas. El objetivo es encontrar políticas que minimicen los costos de mantenimiento del inventario y de los backorders. Para este efecto, se desarrollan dos métodos heurísticos, cuyo comportamiento, de acuerdo con los autores, supera al método tradicional del supuesto del "balance", el cual permite la asignación de inventario negativo a los detallistas. Esto es válido para determinar el punto de reorden de la bodega central y los inventarios máximos de los detallistas, lo que puede causar exceso de inventario en los detallistas.

Más recientemente, han sido publicados algunos trabajos importantes relacionados con el problema de una bodega N puntos de venta. Özer (2003), por ejemplo, desarrolla un heurístico para establecer políticas de inventario efectivas teniendo en cuenta información de demanda conocida con anticipación en un sistema con un solo proveedor supliendo a una bodega que surte a N puntos de venta. El autor muestra que el tener información avanzada de demanda produce niveles de inventarios y costos relacionados más bajos, lo cual convierte a esta información en sustituto para inventarios y lead times de seguridad. Otro trabajo de

importancia es el presentado por Dong y Lee (2003), el cual reconsidera el trabajo seminal de Clark y Scarf en un sistema serial multi-eslabón con procesos de demanda correlacionados en el tiempo y demuestra que es mejor invertir en la reducción de lead time en un ambiente de demanda altamente correlacionada en el tiempo.

Otros autores han abordado el tema de inventarios en la cadena de abastecimiento como una parte integral de modelos de programación lineal o no-lineal entera-mixta aplicados a la optimización de cadenas de abastecimiento regionales e internacionales. Por ejemplo, Vidal (1998), Vidal y Goetschalckx (2000, 2001) y Goetschalckx et al. (2002), consideran los costos de inventarios en la función objetivo de los modelos matemáticos, como una aproximación proporcional a la demanda promedio. Cole (1995) introduce la consideración de demanda probabilística en centros de distribución en un modelo de programación lineal entera-mixta y resuelve algunos casos de tamaño medio, identificando los inventarios máximos óptimos en un sistema de control periódico en la cadena. Otros autores, como Sabri y Beamon (2000), combinan un submodelo estocástico operacional que considera demanda y lead times de producción y suministro estocásticos, con un submodelo estratégico determinístico.

Los sistemas reales de una bodega y N detallistas se caracterizan por tener cientos de proveedores con comportamientos diferentes, cientos de miles de ítems, detallistas muy diferentes entre sí y otras complejidades tales como distribuciones de demanda diferentes a la de Poisson, clasificación ABC diferenciada por bodega y detallistas, el manejo de ítems nuevos, los ítems con demanda errática o intermitente, entre otras. Por lo tanto, la aplicación directa de los desarrollos anteriores es cuestionable y hace que deba pensarse en métodos heurísticos y prácticos de administración de inventarios, muy posiblemente con sistemas de control y de pronósticos "desarrollados en casa". Además, como se verá más adelante, para el diseño de un sistema efectivo de administración y control de inventarios, no es necesario inicialmente

considerar aspectos de costos de mantenimiento del inventario ni de ordenamiento, debido principalmente a que buenas técnicas de control implican directamente reducción de estos costos, sin necesidad de estimarlos previamente o de considerarlos como la función objetivo.

3. SISTEMAS DE CONTROL DESARROLLADOS

El principal problema de un sistema de control de inventarios de una cadena de suministro con una bodega central y N puntos de venta es el de determinar dónde debe mantenerse el inventario, en qué cantidad y la coordinación de las decisiones sobre inventarios a lo largo de la cadena. De acuerdo con Silver et al. (1998), el inventario de seguridad es conveniente mantenerlo tanto en la bodega como en los puntos de venta. Específicamente, ellos sostienen que, "De los modelos básicos y de acuerdo con nuestras propias experiencias, podemos afirmar que es más atractivo mantener inventarios centralmente (refiriéndose a la bodega), cuando los costos de mantenimiento del inventario son apreciablemente menores allí y/o cuando los lead times de distribución son relativamente pequeños."³ Axsäter (2000), por el contrario, sostiene que los inventarios en los puntos de venta son necesarios para brindar un adecuado nivel de servicio. Afirma, además, que,

Un mayor stock en la bodega dará como resultado *lead times* de distribución más cortos y menos variables. Sin embargo, la mejor distribución del inventario en todo el sistema dependerá de la estructura del mismo, de las variaciones de la demanda, de los tiempos de transporte y del valor de los ítems. Existen situaciones para las cuales debería mantenerse un nivel de inventario relativamente alto en la bodega, pero es más común que la solución óptima signifique un nivel de inventario muy bajo en la bodega, mucho más bajo que lo que la mayoría de los analistas pudiera esperar.⁴

Un método que ofrece algunas ventajas es el denominado sistema de control de stock base ('base-stock control system'), presentado por Silver et al. (1998), el cual supone que en la cadena existe información global y control descentralizado. La información global se refiere a que, tanto en la bodega central como en los detallistas, se conoce la demanda externa de los clientes en tiempo real y con ella se alimentan los pronósticos y se realiza el control de inventarios. El control descentralizado se refiere a que las decisiones son tomadas por cada eslabón de la cadena independientemente, o sea, la bodega central y cada punto de venta en este caso. Silver et al. sostienen que este sistema necesita de tecnología avanzada de información, tal como EDI para funcionar adecuadamente. La clave consiste en que las decisiones para emitir órdenes y mantener inventarios se toman en cada punto de venta y en la bodega central basadas en la información de la demanda real del consumidor final, en lugar de hacerlo en la bodega con base en la demanda inducida por los puntos de venta. Esta metodología se utiliza principalmente en sistemas de control continuo (s, S) y de control periódico (R, S), considerando el inventario efectivo definido como:

$$\text{Inventario Efectivo} = \text{Inventario de Escalón} + \text{Órdenes Pendientes} \quad (1)$$

donde el *Inventario de Escalón* se define como el inventario que ha pasado por la bodega central (y ha sido despachado hacia los puntos de venta), pero que aún no ha sido comprometido con los clientes o consumidores finales. En el caso de un sistema continuo (s, S), para el cálculo del inventario de seguridad se utiliza el Lead Time que el escalón anterior presente. Por ejemplo, el Lead Time que los puntos de venta utilizan para calcular sus inventarios de seguridad es la demora en que la bodega central incurre al alistar, despachar y transportar los pedidos, asumiendo que siempre tiene los productos disponibles, o sea que el Lead Time de los proveedores no afecta dicho cálculo. En un sistema de control periódico (R, S), este Lead Time debe incrementarse con el tiempo de revisión R correspondiente a cada escalón.

³ Silver et al. (1998), pág. 516.

⁴ Axsäter (2000), pág. 117.

La teoría anteriormente descrita se adaptó a un caso real de una cadena de suministro de productos de consumo masivo, la cual se alimenta de entre 180 y 200 proveedores hacia una bodega central que hace despachos de más de 6.000 ítems hacia 35 puntos de venta, lo que ocasiona el diseño de un sistema de control real de cerca de 120.000 SKU's diferentes, de acuerdo con el surtido tipo de cada detallista. Dada la disparidad de criterios y las complejidades descritas anteriormente, se diseñó un método híbrido, basado en información global, pero con decisiones tomadas centralmente. En otras palabras, las decisiones de compra de la bodega central y de reposición hacia los puntos de venta se toman centralizadamente, generando despachos automáticos hacia los puntos de venta. El sistema, sin embargo, es de tipo 'pull' porque la bodega mantiene inventario y no lo 'empuja' hacia los puntos de venta, y basa sus decisiones de compra en la demanda real observada en los detallistas.

Se escogió un sistema de control periódico (R, S), tanto en la bodega como en los puntos de venta, diferenciado por clase de ítem A, B ó C. Esta decisión fue motivada principalmente por los aspectos logísticos y administrativos de las compras en bodega y de los despachos a los detallistas y por la facilidad de coordinación en las decisiones de compra. Un aspecto importante es la distinción que debe hacerse en la clasificación de cada ítem, dependiendo de la bodega central y de cada punto de venta. Por ejemplo, un ítem puede ser clase A en la bodega, que lo provee a todos los puntos de venta, pero puede ser B ó C en algunos puntos de venta donde no es tan demandado por los clientes. Esto induce algunas complejidades en el diseño de los sistemas de pronósticos, y la necesidad de redefinir la clasificación ABC en forma periódica.

Uno de los aspectos fundamentales que se tuvo que abordar en este proyecto fue la definición de las técnicas de pronósticos de demanda a implementar. Se resalta el hecho que siempre en el sistema se trata de pronosticar la demanda real y no las ventas, lo que se ha conseguido mediante la medición

de la demanda no servida en los puntos de venta. Se simularon diferentes sistemas de pronósticos tradicionales, tales como promedio móvil y suavización exponencial simple y doble, métodos auto-adaptivos y algunos métodos para ítems con demanda errática. No se detectó estacionalidad en el tipo de productos manejados y por ello no fue necesario considerar métodos con factores estacionales. La implementación de los sistemas de pronósticos se hizo con desarrollos "hechos en casa", lo cual es una de las fortalezas de este proyecto. A manera de comprobación de la metodología utilizada, de acuerdo con Sanders y Manrodt (2003), de 240 compañías estadounidenses encuestadas, 48% utilizan hojas electrónicas para hacer sus pronósticos, mientras que tan solo el 10.8% de las mismas reportaron el uso de software comercial de pronósticos. Además, el 60% de las mismas dijeron estar insatisfechas con el comportamiento de su software de pronósticos. Las conclusiones más importantes de este estudio son, por una parte, que las empresas que utilizan procesos más formales de pronósticos obtienen los mejores resultados, y, por otra parte, que la más probable causa de insatisfacción con los sistemas de pronósticos es la dificultad en comprender los resultados y la dificultad de lectura de los reportes. Esto sugiere que una muy buena opción es la implementación de técnicas de pronósticos formales desarrollados con base en el sistema de información propio de la empresa. Esto fue precisamente lo que se hizo en este caso, con los resultados que se describen posteriormente.

Los procedimientos de control están alimentados por un sistema de pronósticos diferenciado por tipo de ítem (A, B, C o ítem nuevo), el cual estima el promedio y la variabilidad de la demanda de cada ítem en cada punto de la cadena de suministro (bodega y puntos de venta). El sistema genera señales de rastreo con base en la MAD suavizada ("Smoothed Mean Absolute Deviation") y calcula automáticamente las constantes de suavización óptimas en forma periódica, por cada ítem y por cada localidad. Los errores del pronóstico se suavizan y permiten

determinar parámetros de control en forma dinámica. La variabilidad de los Lead Times, de proveedores a bodega central principalmente, no se ha modelado aún en forma directa, debido a limitaciones de información y a complejidades tales como el cumplimiento parcial de órdenes de compra de parte de los proveedores. Lo que se ha implementado para reaccionar a esta variabilidad ha sido el establecimiento de inventarios adicionales de seguridad para su consideración dentro del análisis. Específicamente, se ha dejado de considerar parte del inventario de escalón detallado en la expresión (1) para el cálculo del sugerido de compra. Esto deja posibilidades adicionales de mejoramiento en los sistemas de control implementados.

La estimación de costos de ordenamiento, de mantenimiento del inventario y de faltantes no ha sido necesario hacerla en primera instancia. En otras palabras, no es necesario precisar estos costos para poner en marcha un adecuado sistema de gestión y control de inventarios. Lo que los autores se proponen hacer es tratar de estimar estos costos a posteriori con el objeto de verificar la bondad de los sistemas de control implementados y compararlos con posibles técnicas adicionales de refinamientos de control, especialmente para el caso de los ítems clase A. Los autores consideran este resultado muy importante pues abre las puertas para aplicaciones en otros sistemas sin la necesidad inicial expresa de estimar estos costos, lo cual es muy difícil de lograr con precisión en la mayoría de los casos.

Más que un desarrollo de control de inventarios puramente teórico, el sistema ha tenido en cuenta prácticamente todos los aspectos de la cadena de abastecimiento en forma integral. Esto se considera de importancia fundamental, ya que así se desarrolle el mejor modelo posible de control, si no se tienen en cuenta los aspectos administrativos, logísticos, financieros y de todo tipo presentes en toda la cadena de suministro y sus complejidades adicionales, el modelo podría estar destinado al fracaso, por mejores formulaciones que se utilicen. La Figura 2 muestra un diagrama causal que describe las principales interrelaciones entre los eslabones

de la cadena de abastecimiento considerada. La gran interdependencia de las decisiones claramente afecta el funcionamiento global de la cadena de suministro. Por ejemplo, en algunas ocasiones se generan decisiones 'circulares', como por ejemplo el hecho de que el Lead Time de un proveedor puede depender de la capacidad de recepción de la bodega y de la cantidad ordenada, la cual a su vez depende del Lead Time del proveedor. Al parecer, la única forma práctica de resolver este problema ha sido por ensayo y error y se constituye en una pregunta abierta para investigación futura.

Los modelos desarrollados tuvieron en cuenta las diferentes complejidades adicionales de la cadena de suministro, tales como:

- La definición de políticas administrativas generales a lo largo de la cadena que sean compatibles con los modelos de control implementados, como por ejemplo la coordinación entre la capacidad de recepción de la bodega central y el nivel de compras.
- Las características de temporalidad a tener en cuenta en todas las decisiones de compras y despachos automáticos.
- La gran diversidad de características de los proveedores, sus lead times (los que se tornan muy variables debido a las condiciones del transporte de carga por carretera en nuestro país) y sus niveles de cumplimiento en los contenidos de las órdenes de compra.
- El manejo de ítems nuevos y de detallistas completamente nuevos (creación de nuevos puntos de venta) a través de modelos especiales de pronóstico de demanda y métodos para definir el surtido inicial del detallista.
- El control de casos atípicos de demanda que afectan los sistemas de pronósticos.
- La clasificación ABC diferenciada por detallista y bodega central.
- Los ítems con demanda errática o intermitente, entre ellos los ítems clase A de alto valor.

- La necesidad de pronosticar al final del año para varios períodos adelante, lo que aumenta significativamente la variabilidad del pronóstico.
- El manejo de ítems en promociones temporales.
- Las estrategias de reacción a las señales de rastreo que indican problemas con el pronóstico.
- El control y la integridad de los archivos y programas implementados.
- La resistencia al cambio y el "nerviosismo" o falta de confianza en los modelos a implementar por parte de algunas personas en la organización.

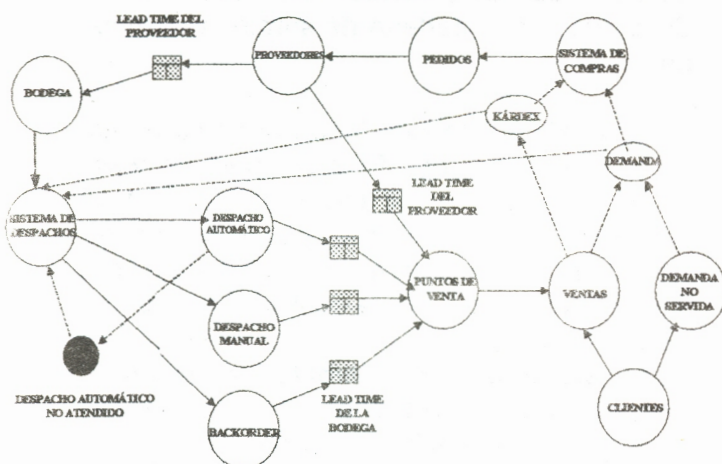


Figura 2. Diagrama causal de la cadena de abastecimiento considerada

4 RESULTADOS

Se destaca inicialmente el logro de la estabilidad administrativa de la cadena de abastecimiento en forma integral. La implementación de los modelos de control de inventarios, en concordancia con las prácticas administrativas de la empresa han permitido una integración de las decisiones a todo nivel, incluyendo la bodega central, el departamento de compras y mercadeo, el departamento de sistemas, los puntos de venta y la administración central. Este resultado ha sido de gran importancia para la empresa, pues se

estaba buscando algo semejante desde hacía mucho tiempo.

Uno de los principales problemas ha sido la imposibilidad de trabajar con el inventario efectivo dado en la expresión (1), debido a la alta variabilidad del Lead Time de los proveedores, aspecto muy común en nuestro medio. Como esta variabilidad es muy difícil de medir para poder ser involucrada en los cálculos, se ha preferido no considerar el cien por ciento del inventario de escalón para todos los ítems, lo que aumenta las cantidades a comprar, en prevención por las fluctuaciones del Lead Time de los proveedores. Nuestra investigación actual está dirigida hacia la implementación gradual de la expresión (1) en todos los eslabones de la cadena, definiendo una metodología para involucrar la variabilidad de los Lead Times de los proveedores en los análisis.

Otro problema radica en los ítems que presentan alta variabilidad en su demanda para los cuales se mantiene un alto inventario de seguridad en los puntos de venta, lo que podría mejorarse con su consolidación en la bodega central o en puntos clave de la cadena, haciendo los ajustes administrativos del caso para evitar el deterioro del nivel de servicio a los clientes. Por otra parte, aquellos ítems que presentan alta variabilidad de demanda incluso después de haber sido consolidados, presentan el problema de agotar rápidamente sus existencias en la bodega cuando son despachados hacia los puntos de venta, pues aquí su variabilidad es aún mayor y la suma de los inventarios de seguridad a mantener en los detallistas supera ampliamente al inventario de seguridad mantenido en el centro de distribución. Este punto representa también una posibilidad de investigación interesante.

Finalmente, la gran cantidad de decisiones administrativas y de casos especiales que enmarcan un sistema de esta naturaleza, hace que la implementación y refinamiento de los modelos desarrollados sean muy complejos. Para facilitar estas actividades, se desarrolló lo que se denominó la "carta de navegación" de los modelos, la cual describe en forma precisa todas las actividades necesarias a lo largo de toda la cadena de suministro que

deben llevarse a cabo para garantizar el correcto funcionamiento de los modelos matemáticos y estadísticos implementados. De una u otra forma, la refinación de este sistema, como una aplicación real de la IO, se está realizando actualmente y se espera que se convierta una vez más en una aplicación exitosa de las técnicas cuantitativas en un sistema tan complejo como el descrito en este trabajo.

Los principales resultados cuantitativos de este proyecto se muestran en la Tabla 1, la cual presenta el cambio porcentual del promedio y de la desviación estándar del inventario total, la rotación del inventario, el inventario pagado, el porcentaje de inventario pagado y la rotación neta del inventario⁵. Dicho promedio y desviación estándar fueron determinados con base en los indicadores mensuales de cada año, antes y después de la implementación de los sistemas de pronósticos y control de inventarios descritos anteriormente. Es importante notar que los indicadores mostrados en la tabla han venido presentando reducciones mes a mes, comparados en años sucesivos, desde la implementación del proyecto. La tabla ilustra el promedio de dichas reducciones, comparando 2003 contra 2000 (o 2001 en algunas ocasiones, pues algunas técnicas de control fueron implementadas a mediados de este año). Debe destacarse igualmente que, durante el desarrollo del proyecto, se crearon 13 puntos de venta nuevos, lo que representa un 52% de incremento, lo cual supuestamente debería haber incrementado el inventario total en la cadena. Más importante aún, como consecuencia del balanceo de los inventarios, se mantuvo un nivel de servicio cercano al 98%, lo que hace más significativo el resultado de los indicadores mostrados en la tabla. La reducción en la desviación estándar de cada indicador corrobora la estabilidad de los sistemas de control y de sus correspondientes resultados. Es también muy importante notar que la reducción de la rotación neta y del porcentaje del inventario pagado son los

resultados más significativos de los modelos implementados, desde el punto de vista del control de los inventarios, pues la organización vende la mayoría de sus inventarios antes de que tener que pagarlos al proveedor, ya que los modelos permiten realizar la compra justa sin incurrir en excesos.

Tabla 1. Cambios en el promedio y desviación estándar de indicadores claves de la cadena de abastecimiento bajo estudio

Indicador	Promedio	Desv. Estándar
Inventario total a \$ de 2000	-9.81%	-39.05%
Rotación del inventario (días)	-8.31%	-21.27%
Inventario pagado a \$ de 2000	-56.91%	-33.27%
Porcentaje de inventario pagado	-48.78%	-26.16%
Rotación neta del inventario (días)	-54.75%	-30.96%

Las figuras 3 y 4 muestran el comportamiento de algunos de los indicadores anteriores a lo largo del horizonte del proyecto. Para garantizar la confidencialidad, las figuras muestran en cada caso el indicador en escala relativa, tomando el valor máximo observado igual a 1.

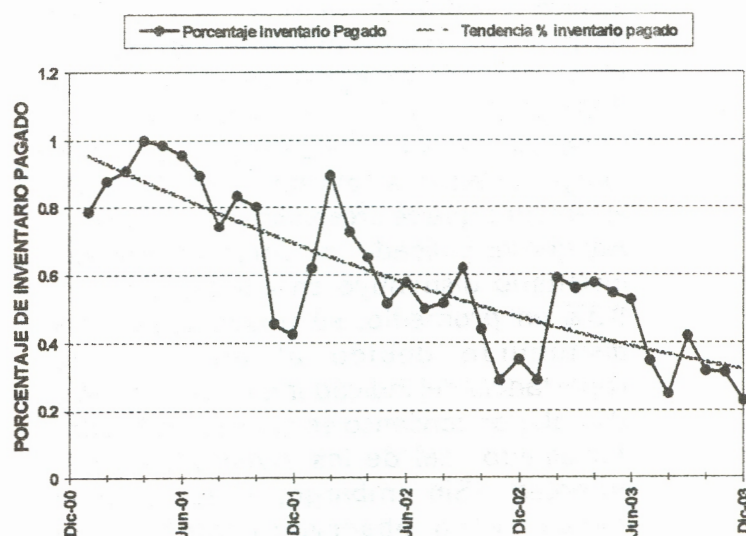


Figura 3. Porcentaje de inventario pagado en escala relativa

⁵ La rotación neta en días se calcula como el cociente entre el inventario pagado promedio cada mes y el costo de ventas mensuales, multiplicado por 30 días/mes.

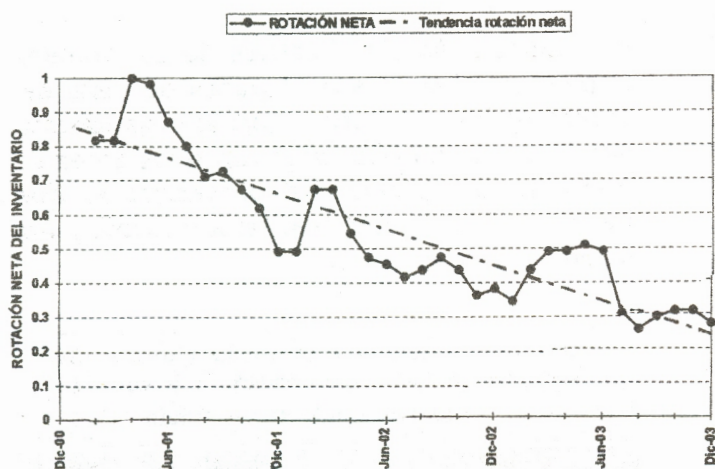


Figura 4. Rotación neta del inventario en escala relativa

Otros resultados importantes de este proyecto han sido los siguientes:

- La reducción de inventarios y el mantenimiento del nivel de servicio se logró conservando el mismo recurso en la bodega central, incluso con la apertura de los nuevos detallistas, al proponerse e implementarse la reducción de frecuencia de despachos hacia los detallistas.
- El carácter dinámico de los modelos de control ha permitido que las decisiones de ajuste y control sean administradas básicamente por los mismos modelos.
- El modelo de compras en el centro de distribución se ha convertido en una poderosa herramienta de negociación con los proveedores, evitando excesos de inventarios que se presentaban usualmente.
- Aunque el indicador de rotación total del inventario disminuyó en alrededor de un 8.3% en promedio, su trascendencia ha disminuido debido al aumento de importancia del indicador de rotación neta, el cual, por consenso es el mejor indicador del estado real de los inventarios de la empresa. Sin embargo, en los últimos meses se ha observado también un equilibrio en la rotación propiamente dicha y se ha llegado a la conclusión de que ambos indicadores pueden disminuirse en forma simultánea cuando se tenga una mejor colaboración de parte de los proveedores.

- La depuración del inventario en la bodega central y en los puntos de venta, lo que ha eliminado los excesos de ítems de lento o nulo movimiento y ha definido el surtido tipo en cada detallista.
- La capacitación del personal en el área de gestión y control de inventarios, lo que ha facilitado los resultados mostrados.

Lo más importante de los resultados anteriores es que esta tendencia ha continuado en los últimos meses y se han estabilizado gradualmente todos los sistemas de control, brindando al sistema un equilibrio que nunca había tenido anteriormente, el cual había sido buscado a lo largo de varios años. Por esta razón, se espera que los resultados reales del proyecto superen en corto tiempo a lo reportado en esta publicación. Actualmente, se están analizando alternativas adicionales de mejoramiento de los sistemas de control y de diversas actividades a lo largo de toda la cadena, las cuales se enuncian en la sección siguiente.

5. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA EN EL AREA

Este trabajo presenta una aplicación real de una de las más importantes técnicas de la Investigación de Operaciones, la teoría de inventarios. Con la implementación de técnicas de control y pronósticos relativamente sencillas, desarrolladas totalmente "en casa", se lograron resultados muy importantes en una cadena de suministro de productos de consumo masivo con una bodega central surtida por cerca de 200 proveedores y que atiende a 35 detallistas, con un número total de SKU's de alrededor de 120.000. Se implementaron modelos de control de inventario periódico en la bodega central y en los puntos de venta. Estos últimos son proveídos desde la bodega central por un sistema de despacho automático. Se utilizaron sistemas de pronósticos de demanda tradicionales, tales como promedio móvil y suavización exponencial doble, refinados con técnicas de detección de problemas mediante señales de rastreo y eliminación de datos

atípicos de demanda. Se hizo énfasis en la medición de la demanda no servida en los detallistas para utilizar pronósticos de demanda reales y no de ventas.

Con los modelos implementados se logró reducir el inventario total en promedio en un 10%, a pesar del incremento en el número de puntos de venta de un 52%, mejorando el nivel de servicio real al cliente, el cual se ha mantenido alrededor del 98%; se logró reducir el promedio del inventario pagado a proveedores en un 57% y el promedio de la rotación neta en un 55%, creando una situación de estabilidad de los modelos de control y de "tranquilidad administrativa" buscadas por la empresa por varios años antes de aplicar modelos de decisión cuantitativos. La tendencia de mejoramiento se ha mantenido hasta la fecha y se ha logrado la consolidación de la aplicación y control de los modelos de gestión de inventarios.

Como investigación futura se ha planteado diversos aspectos de importancia, tales como los siguientes, entre otros posibles:

- El análisis de las complejas relaciones que existen entre la determinación de los sugeridos de compra y la capacidad de recepción de la bodega central.
- El análisis detallado de los ítems de demanda errática a través de métodos de pronósticos más sofisticados y/o de acciones administrativas, tales como la consolidación de estos ítems en la bodega central y/o en puntos clave de la cadena de suministro de la empresa.
- La aplicación gradual de la expresión (1) para el cálculo de los sugeridos de compra en la bodega central, introduciendo la variabilidad del lead time de los proveedores en los cálculos de los inventarios de seguridad.
- La aplicación de estos métodos en otros departamentos de la empresa que involucren, por ejemplo, casos de demanda estacional y posibles demandas correlacionadas en el tiempo.
- El análisis de posibles alianzas estratégicas con cadenas de suministro semejantes a la estudiada.
- La estimación de los costos de inventarios generados por las nuevas prácticas de control de inventarios, su comparación con los costos anteriores y su establecimiento como indicadores de eficiencia para evaluar el comportamiento de futuros métodos de control.
- La prueba de otros sistemas de control de inventarios más sofisticados, tales como los (R, s, S), especialmente para los ítems clase A.
- La integración de los procesos de control y gestión de inventarios con otros procesos de la cadena, tales como las operaciones en el centro de distribución y los sistemas de transporte, incluyendo las técnicas de ruteo y de selección del modo de transporte.
- El refinamiento de las actividades administrativas y de control a lo largo de toda la cadena de abastecimiento.

Otro aspecto de sumo interés es la importancia que tienen los procesos de colaboración en la cadena de abastecimiento. Por ejemplo, para los proveedores, quienes a su vez tienen su propia cadena de suministro de materias primas, sería muy interesante disponer de datos de demanda real de sus clientes en el punto final de la cadena y así disminuir el efecto Bullwhip. Si esta práctica se generalizara a los clientes más importantes de cada proveedor, éste podría pronosticar su demanda con mejor precisión, evitando así faltantes de inventario que comúnmente se presentan y que causan un gran problema al romperse el inventario en la bodega central. Este proceso de colaboración se constituiría evidentemente en una relación gana - gana si se logran superar las dificultades de confianza y confidencialidad, barreras más prominentes de este tipo de relaciones.

Queda abierta también la pregunta de la conveniencia de la adopción de sofisticados sistemas ERP en nuestras empresas. Muchas veces estos se convierten en costosos sistemas de información, sin que se puedan explotar todas sus posibilidades. Específicamente, en

el área de inventarios, en general estos sistemas no son utilizados adecuadamente, y sus potencialidades de pronósticos y control no son aprovechadas. En muchas ocasiones, como en el caso mostrado en esta publicación, sistemas sencillos hechos en casa pueden ser la respuesta rápida, parcial o definitiva, a los serios problemas de inventarios que presentan nuestras organizaciones.

Desde el punto de vista de la IO, este proyecto muestra como la aplicación real de técnicas relativamente sencillas produce resultados significativos y de importancia fundamental para nuestras organizaciones, lo que puede volverlas más competitivas y mejor preparadas para el proceso de globalización que está en marcha. Creemos que la adopción y aplicación de técnicas cuantitativas como herramientas fundamentales para los procesos de toma de decisiones a todo nivel en cualquier empresa de naturaleza industrial, comercial o de servicios no son una sofisticación innecesaria, costosa y de difícil comprensión; por el contrario, son una necesidad.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" (COLCIENCIAS), por la Universidad del Valle y por la Caja de Compensación Familiar del Valle del Cauca (COMFANDI). Se agradece la valiosa labor desarrollada por los analistas de sistemas Jorge Enrique Restrepo y Arnulfo Zamora para la implementación de los modelos de pronósticos y control de inventarios, y de todo el personal involucrado directa o indirectamente con este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- AXSÄTER, S. (1993a), "Continuous Review Policies for Multi-Level Inventory Systems With Stochastic Demand", En: S. Graves, A. Rinnooy Kan y P. H. Zipkin (Editores), *Logistics of Production and Inventory*, Vol. 4, Amsterdam, Elsevier (North-Holland).
- _____. S. (1993b), "Exact and Approximate Evaluation of Batch-Ordering Policies for Two-Level Inventory Systems", *Operations Research* 41, 777-85.
- _____. S. (1998), "Evaluation of Installation Stock Based (R, Q)-Policies for Two-Level Inventory Systems with Poisson Demand", *Operations Research* 46, Supl. No. 3, S135-S145.
- _____. S. (2000), *Inventory Control*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- _____. S., J. Marklund y E. A. Silver (2002), "Heuristic Methods for Centralized Control of One-Warehouse, N-Retailer Inventory Systems", *Manufacturing & Service Operations Management* 4 (1), 75-97.
- CHEN, F. y R. Samroengraja (2000), "A Staggered Ordering Policy for One-Warehouse, Multiretailer Systems", *Operations Research* 48 (2), 281-293.
- CHENG, F. y Y. Zheng (1997), "One-Warehouse Multi-Retailer Systems With Decentralized Stock Information", *Operations Research* 45 (2), 275-87.
- CLARK, A. J. y H. Scarf (1960), "Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem", *Management Science* 6 (4), 475-90.
- COHEN, M., P. Kleindorfer y H. Lee (1986), "Optimal Stocking Policies for Low Usage Items in Multi-Echelon Inventory Systems", *Naval Research Logistics* 33, 17-38.
- COLE, M. H. (1995), *Service Considerations and the Design of Strategic Distribution Systems*, Disertación Doctoral, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA.
- DONG, L. y H. L. Lee (2003), "Optimal Policies and Approximations for a Serial Multiechelon Inventory System With Time Correlated Demand", *Operations Research* 51 (6), 969-980.
- FEDERGRUEN, A. y P. Zipkin (1984), "Allocation Policies and Cost Approximations for Multilocation Inventory Systems", *Naval Research Logistics* 31, 97-129.
- FORSBERG, R. (1995), "Optimization of Order-up-to-S Policies for Two-Level

- Inventory Systems with Compound Poisson Demand", *European Journal of Operational Research* 81, 143-53.
- _____. R. (1996), "Exact Evaluation of (R, Q)-Policies for Two-Level Inventory Systems with Poisson Demand", *European Journal of Operational Research* 96, 130-38.
- GOETSCHALCKX, Marc, C. J. Vidal y K. Dogan (2002), "Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms", *European Journal of Operational Research* 143 (1), 1-18.
- GRAVES, S. C. (1996), "A Multiechelon Inventory Model with Fixed Replenishment Intervals", *Management Science* 42 (1), 1-18.
- LEE, H., P. Padmanabhan y S. Whang (1997), "Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect", *Management Science* 43 (4), 546-58.
- _____. H., K. C. So y C. S. Tang (2000), "The Value of Information Sharing in a Two-Level Supply Chain", *Management Science* 46 (5), 626-643.
- MATTA, K. F. y D. Sinha (1995), "Policy and Cost Approximations of Two-Echelon Distribution Systems with a Procurement Cost at the Higher Echelon", *IIE Transactions* 27, 638-45.
- MOINZADEH, K. (2002), "A Multi-Echelon Inventory System with Information Exchange", *Management Science* 48 (3), 414-426.
- ÖZER, Özalp (2003), "Replenishment Strategies for Distribution Systems Under Advance Demand Information", *Management Science* 49 (3), 255-272.
- SABRI, E. H. y B. M. Beamon (2000), "A Multi-Objective Approach to Simultaneous Strategic and Operational Planning in Supply Chain Design", *Omega* 28, 581-598.
- SANDERS, N. R. y K. B. Manrodt (2003), "Forecasting Software in Practice: Use, Satisfaction and Performance", *Interfaces* 33 (5), 90-93.
- SCHWARZ, L. B. (1973), "A Simple Continuous Review Deterministic One-Warehouse N-Retailer Inventory Problem", *Management Science* 19 (5), 555-66.
- SHERBROOKE, C. C. (1968), "METRIC - A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control", *Operations Research* 16 (1), 103-21.
- SILVER, Edward A., David F. Pyke y Rein Peterson (1998), *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, tercera edición, John Wiley & Sons, New York.
- VIDAL, C. J. (1998), "A Global Supply Chain Model with Transfer Pricing and Transportation Cost Allocation," Disertación Doctoral, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- _____. C. J. (2001), "El desbalanceo de inventarios: Un problema muy común", *Diario La República*, Noviembre.
- _____. C. J. (2002), "Las complejas decisiones en el manejo de los inventarios", Editorial, *Revista Zonolística* 2 (8), 4.
- _____. C. J. y M. Goetschalckx (2000), "Modeling the Impact of Uncertainties on Global Logistics Systems," *Journal of Business Logistics* 21 (1), 95-120.
- _____. C. J. y M. Goetschalckx (2001), "A Global Supply Chain Model with Transfer Pricing and Transportation Cost Allocation," *European Journal of Operational Research* 129, 134-58.