

# **Efecto de las decisiones de pedidos de clientes mayoristas en Cadenas de Abastecimiento: Un análisis experimental.**

**Sebastián Villa Betancur**



Tesis para Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Sistemas

Escuela de Sistemas, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

Director:

Prof. Santiago Arango Aramburo

Agosto, 2011

## **RESUMEN**

Uno de los problemas más conocidos y costosos en las Cadenas de Abastecimiento se puede presentar ante la escasez de un producto en algún eslabón de la cadena. Este problema es caracterizado por el aumento de la variabilidad en las órdenes a medida que éstas se mueven a lo largo de la cadena. En esta tesis se investiga la forma en que un cliente intermedio (mayorista), enfrentando aumentos en la demanda del cliente final (minoristas), realiza sus pedidos a su único proveedor. Este proveedor cuenta con un producto único, limitado y escaso. El problema se analiza en primer lugar, utilizando un diagrama causal y luego desarrollando un modelo matemático de dinámica de sistemas que describe el problema de los clientes finales inflando órdenes y el proveedor invirtiendo en capacidad. Posteriormente, se presenta el comportamiento básico del modelo y se discute la validación este.

En la segunda parte, se desarrolla un experimento con base en el modelo de simulación. El experimento estudia las decisiones de personas realizando pedidos a sus proveedores, en una Cadena de Abastecimiento con un único proveedor y un producto único e insustituible. Posteriormente se determinan las trayectorias de decisiones óptimas para el modelo, que proporcionan un punto de referencia para comparar las decisiones reales de los sujetos en cada uno de los diferentes casos que serán estudiados. Los resultados experimentales muestran que los clientes mayoristas cuando enfrentan agotados de sus productos tienden a inflar sus pedidos por encima de lo percibido, en especial cuando el sistema en el cual toman sus decisiones cuenta con mayores retardos. Finalmente, los análisis estadísticos desarrollados muestran que la heurística propuesta tiene un buen ajuste comparado con los resultados experimentales.

## **ABSTRACT**

A frequent and costly source of problems in supply chains takes place when retailers compete for scarce supply. This problem is characterized by the variability of orders as they move upstream in a supply chain. This thesis investigates the challenging task of a retailer making order decisions when faced with limited supply and a surge in demand. First, I describe the problem of retailers inflated orders using a causal loop diagram and then develop a formal system dynamics simulation model. I then present the base case behavior of the model and discuss model validation.

Next, I develop an experimental environment to test the actual behavior of subjects making such order decisions. A normative optimal result for the model provides a benchmark to compare with subjects decisions. Finally, results from different treatments contribute to the human behavior understanding when they face any shortfall in their products, allowing me to conclude that longer delays complicate subjects' order decision. Finally, the statistical analysis shows a good fit between the model and the experimental results.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de vivir, aprender y disfrutar este mundo al lado de excelentes personas.

Además, me gustaría agradecer a mi familia, ellos han sido un gran apoyo en mi vida y siempre dieron lo mejor de sí para hacer de mí una mejor persona. Le debo a mi novia Gloria Urrea una gran gratitud por su ayuda, paciencia y amor en todo momento.

Por otro lado le agradezco a mi director de tesis Santiago Arango, quien invirtió gran cantidad de su tiempo para ayudarme a hacer este trabajo. Su ayuda y conocimiento fueron fundamentales. Gracias además por sus esfuerzos y sugerencias.

Quiero además aprovechar esta oportunidad para agradecer a Paulo Gonçalves por su colaboración en el desarrollo de esta tesis, especialmente con los modelos y sugerencias.

A mis amigas de maestría Laura Milena Cárdenas y Ana María Flórez con quienes compartí grandes momentos y quienes me ayudaron con sus sugerencias y conocimientos.

A mis profesores Carlos Jaime Franco, Yris Olaya y Patricia Jaramillo quienes me ayudaron, enseñaron y realimentaron bastante. Realmente aprendí mucho de ellos.

## GLOSARIO

**Agotado:** Cantidad de unidades que el cliente mayorista no pudo despachar en una semana.

**Capacidad:** Es la cantidad de unidades que pueden ser procesadas por el proveedor en una semana.

**Cliente mayorista:** Es la empresa intermediaria entre el proveedor y el cliente final. Este cliente hace los pedidos al proveedor de acuerdo a la demanda prevista de sus clientes finales.

**Cliente final:** Son los compradores finales del producto que realiza el proveedor y hacen dicha compra a los clientes intermedios. Pueden ser otras empresas o personas naturales.

**Déficit:** Es el acumulado (semana a semana) de todos los agotados.

**Demanda:** Es la cantidad de unidades pedidas por el cliente final al cliente mayorista en una semana.

**Despachos:** Son la cantidad de unidades semanales que produce el proveedor de acuerdo a su capacidad y que están disponibles para ser enviadas al cliente mayorista.

**Inventario:** Es la cantidad de unidades que el cliente mayorista tiene en exceso debido a la diferencia entre las ordenes realizadas y la demanda que realmente tiene.

**Orden:** Es la cantidad de unidades pedidas por el cliente mayorista al proveedor en una semana.

**Órdenes pendientes:** Cantidad de unidades ordenadas por el cliente mayorista y que aún no han sido procesadas por el proveedor.

**Proveedor:** Es la empresa encargada de recibir las órdenes de los clientes intermedios y enviarles sus pedidos. Además es quien produce las unidades y es capaz de ir variando su capacidad de acuerdo a las órdenes que le estén realizando.

**Tiempo de entrega:** Es el tiempo que tarda una orden desde el momento en que es realizada por el cliente mayorista hasta que es producida y enviada por los proveedores nuevamente al cliente mayorista.

## **NOTA SOBRE EL SOFTWARE Y LA DOCUMENTACIÓN**

Los modelos experimentales de esta tesis fueron creados por el autor usando Powersim Constructor versión 2.51. Los datos obtenidos fueron tabulados y manejados en Microsoft Office Excel versión 2003.

Las simulaciones, los análisis estadísticos y gráficos fueron obtenidas usando Microsoft Office Excel versión 2003 y R versión 2.12.1.

Todos los archivos y software están disponibles para propósitos académicos o investigativos.

## CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS.....	9
INTRODUCCIÓN .....	11
OBJETIVOS .....	13
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>13</b>
1. SISTEMA DE ESTUDIO .....	14
<b>1.1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>20</b>
2. METODOLOGÍA .....	22
<b>2.1. SIMULACIÓN .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. DINÁMICA DE SISTEMAS.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. EXPERIMENTACIÓN .....</b>	<b>24</b>
2.3.1. Construcción de Teoría .....	25
2.3.2. Validación de Teoría .....	26
2.3.3 Principios de los experimentos de laboratorio.....	27
<b>2.4 OPTIMIZACIÓN.....</b>	<b>28</b>
3. MODELO.....	30
<b>3.1. DIAGRAMA CAUSAL.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2. DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. RESULTADOS DEL MODELO .....</b>	<b>35</b>

<b>3.4. VALIDACIÓN.....</b>	<b>36</b>
3.4.1. Validación del Comportamiento .....	37
3.4.2. Análisis de Sensibilidad de los Parámetros .....	39
<b>4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. RECOMPENSA MONETARIA .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. NIVELES DE REFERENCIA .....</b>	<b>45</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. COMPORTAMIENTO DE LAS DECISIONES DE LOS SUJETOS .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2. DESEMPEÑO DE LOS SUJETOS .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3. EVIDENCIA DEL EFECTO LÁTIGO .....</b>	<b>50</b>
<b>6. MODELAMIENTO DE REGLAS DE DECISIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>6.1. ANÁLISIS DE MÍNIMOS CUADRADOS.....</b>	<b>52</b>
<b>6.2. ANALISIS DE PANEL.....</b>	<b>55</b>
CONCLUSIONES .....	58
TRABAJO FUTURO.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Representación gráfica del problema de estudio.....	20
Figura 2 Diagrama causal del problema de estudio. ....	31
Figura 3 Diagrama de flujos y niveles del problema de estudio. ....	34
Figura 4 Demanda Final vs. Tiempo. ....	35
Figura 5 Retrasos y Pedidos vs. Tiempo. ....	35
Figura 6 Capacidad y Cambio en Capacidad vs. Tiempo. ....	36
Figura 7 Efectos de los retardos en Cadenas de Abastecimiento. <i>Fuente: Diehl &amp; Serman, 1995.</i>	37
Figura 8 Validación con demanda final 100. ....	37
Figura 9 Validación con demanda final cero.....	38
Figura 10 Validación con demanda final oscilatoria.....	38
Figura 11 Órdenes pendientes por entregar vs. Tiempo.....	39
Figura 12 Órdenes pendientes por entregar y Pedidos Cliente mayorista vs. Tiempo vs. Tao C. ....	40
Figura 13 Pedidos Cliente mayorista vs. Tiempo vs. Agresividad.....	40
Figura 14 Pedidos Cliente mayorista y Órdenes por entregar vs. Tiempo vs. Tao B.....	41
Figura 15 Modelo y casos experimentales. ....	44
Figura 16 Nivel de referencia para las decisiones de pedidos del cliente mayorista.....	46
Figura 17 Resultados típicos experimentales ( $P_j$ indica el número de jugador y $C_i$ el caso).....	47
Figura 18 Demanda Cliente final ( $d$ ) y Decisiones promedio ( $AO$ ) para cada caso.....	48
Figura 19 (C) Capacidad del Proveedor y ( $AO$ ) Decisiones promedio por caso. ....	51
Figura 20 Comparación gráfica entre los resultados experimentales, estimados y del Panel .....	57
Figura 21 Simulación de la heurística propuesta usando el modelo econométrico con las decisiones promedio (Ajustada $AO$ ) y con los parámetros del Panel (Panel).....	58

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 1 Casos Experimentales. ....	42
Tabla 2 Niveles de Referencia. ....	46
Tabla 3 Costos acumulados, promedios y de referencia para cada caso. ....	49
Tabla 4 Estimación matemática de los coeficientes. ....	52
Tabla 5 Estimación de los coeficientes para cada sujeto en cada caso. ....	53
Tabla 6 Estimación de los coeficientes a partir del análisis de panel. ....	56

## LISTADO DE APÉNDICES

Apéndice 1. Interfaz del experimento .....	70
Apéndice 2. Instrucciones para el Caso 3.....	71
Apéndice 3. Análisis de residuales para el desempeño de los sujetos.....	74
Apéndice 4. Validación de las suposiciones del modelo econométrico .....	75
Apéndice 5. Ambiente de laboratorio .....	78

# INTRODUCCIÓN

Actualmente, más que en otros momentos en la historia reciente, cada una de los agentes de una Cadena de Abastecimiento enfrenta un entorno de operación con incertidumbre, en el cual adicionalmente la información es limitada. Esto provoca que cada uno de los agentes de la cadena deba ser altamente competente en la comprensión del sistema (realimentaciones, interacciones y no linealidades) y por lo tanto preciso en la toma de decisiones sobre cuánto y cuándo abastecerse (Hwarng, 2008).

Estas Cadenas de Abastecimiento son sistemas integrados entre las fábricas, sus proveedores y clientes (Rua, 2008) en las cuales se envuelven todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes y productos desde la etapa de materia prima hasta el consumo por el usuario final (Hwarng, 2008). En unas ocasiones estas Cadenas de Abastecimiento son manejadas como un todo y existe coordinación en diferentes grados, de los flujos de entrada y de salida – materiales, información y financieros (Mustafa, 2007)– tal que los productos son manufacturados y distribuidos en las cantidades, lugares y tiempos adecuados (Charu, 2000); en otras ocasiones, cada una de las partes de la cadena actúa y toma las decisiones independientemente generando mayor incertidumbre en la demanda, la producción y los tiempos de entrega.

Estas relaciones entre cada una de las partes de la cadena son entorpecidas aún más por los fenómenos de realimentación y la existencia inevitable de las relaciones causa-efecto. Por ejemplo, idealmente, el inventario de seguridad en un punto centralizado como el de Dell, debería ser conservado lo más bajo posible, sin embargo, la existencia de retardos y realimentaciones contribuyeron a la existencia de variabilidad en los stocks de seguridad (Hwarng, 2008). La comprensión y complejidad de las Cadenas de Abastecimiento y la racionalidad en la toma de decisiones en éstas son importantes tanto para mejora de los sistemas productivos, como para reducir los problemas que éstas puedan acarrear para la sociedad.

Uno de los problemas más frecuentes y costosos en las Cadenas de Abastecimiento es conocido como el Efecto Látigo (o efecto Forrester) (ArmonyPlambeck 2005; Gonçalves 2003). Este fenómeno captura el aumento en la variabilidad de las órdenes a medida en que éstas se mueven a lo largo de la cadena (Gonçalves, 2010). La variabilidad de estas órdenes conlleva a *problemas* tales como inversiones excesivas de capital, inventarios excesivos o insuficientes, baja utilización de la capacidad y por lo tanto a un servicio deficiente (Armony y Plambeck 2005; Gonçalves 2003; Lee et al. 1997a; Serman 2000).

Dados estos problemas, se plantea una estrategia que permita identificar comportamientos característicos en las personas a la hora de manejar un eslabón específico de una cadena de abastecimiento y así tener elementos que permitan definir mejores políticas de abastecimiento, producción y distribución en este tipo de cadenas.

Desde este punto de vista, la investigación de operaciones (desde el enfoque de la dinámica de sistemas y las ciencias de administración) ha desarrollado metodologías tanto para la construcción y validación de modelos con realimentaciones complejas como para validación de políticas y teorías

que permiten analizar diferentes comportamientos (Smith, 2002). De este modo, con el fin de evaluar y entender las causas y comportamientos del efecto látigo, se desarrolla una estrategia a partir del análisis experimental, que permita encontrar un componente común de toma de decisiones bajo situaciones reales. Así, se podrá obtener un ajuste econométrico que reproduzca el comportamiento general de las personas a la hora de tomar decisiones asumiendo el rol de clientes mayoristas en una Cadena de Abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor vendiendo un producto único e insustituible. En resumen, los experimentos son conducidos en un laboratorio con modelos de simulación por computador, con los cuales se pueden representar la estructura y la complejidad de los sistemas reales con gran fidelidad y además permiten manipulaciones controladas con el fin de identificar los cambios en los comportamientos de los sujetos (Friedman 2004, Smith 1994).

Inicialmente, se muestra una estructura de la Cadena de Abastecimiento con el fin de transformar el sistema de estudio desde un modelo mental a un diagrama de flujos y niveles. Posteriormente, la experimentación es llevada a cabo analizando diferentes casos de estudio. Finalmente, diferentes hipótesis son discutidas a través de los resultados obtenidos experimental y estadísticamente. En general esta tesis se encuentra organizada como sigue: Inicialmente se presentarán los objetivos que se busca alcanzar con el desarrollo de esta tesis. Luego, un estado del arte sobre el sistema de estudio es presentado en la sección 1 con la idea de dar al lector los conceptos básicos del problema en estudio, realizar una revisión de algunos estudios y ejemplos reales y finalmente dar un planteamiento específico del caso de estudio. El capítulo 2 presenta toda la metodología experimental. En el capítulo 3 se desarrolla todo el modelamiento del problema, en cual se desarrolla el diagrama causal y el diagrama de flujos y niveles junto con sus simulaciones. En el capítulo 4 se presenta el planteamiento de los escenarios y los niveles de referencia para cada uno de los casos de estudio que se van a desarrollar. En el capítulo 5 se encuentran todos los resultados, desempeño de los sujetos y análisis de resultados. En el capítulo 6 se presenta el modelamiento de las reglas de decisión analizándolo desde dos puntos de vista diferentes y finalmente se presentan las conclusiones y los estudios futuros.

# OBJETIVOS

## *OBJETIVO GENERAL*

Analizar el efecto de las decisiones en pedidos de los clientes mayoristas en una Cadena de Abastecimiento a través de experimentos de laboratorio y simulación.

## *OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

- Estudiar la literatura de las Cadenas de Abastecimiento y de experimentos de laboratorio con el fin de obtener el diseño y la realización de experimentos de laboratorio.
- Desarrollar un modelo de simulación en dinámica de sistemas que capture la estructura básica de una Cadena de Abastecimiento, incorporando la toma de decisiones de los clientes mayoristas bajo diferentes casos.
- Diseñar un experimento de laboratorio con base en el modelo desarrollado
- Realizar los experimentos de laboratorio para capturar los comportamientos de las personas tomando decisiones de pedidos a los proveedores.
- Analizar los resultados de laboratorio, que incluya la estimación de reglas de decisión utilizadas por los sujetos y comparación con la trayectoria óptima de decisiones en cada uno de los casos.

En términos generales, se busca encontrar y utilizar herramientas experimentales que permitan entender el efecto látigo, un problema que es tan común en las Cadenas de Abastecimiento. A continuación se desarrolla una contextualización al sistema de estudio, donde se encuentran las bases para el desarrollo del resto del presente trabajo.

# 1. SISTEMA DE ESTUDIO

Las Cadenas de Abastecimiento son definidas como un conjunto de subsistemas utilizados con el fin de integrar eficientemente a los proveedores, mayoristas y clientes finales. Estas cadenas surgen como una respuesta estratégica de las empresas, ante la consideración de que la competencia ya no es negocio a negocio, sino cadena a cadena (Lambert & Cooper, 2000). Así, por bien que se desempeñe una empresa, no es posible garantizar un cumplimiento de la demanda, ni un nivel de rentabilidad deseado (Gupta&Maranas, 2003) sin depender tanto del tipo de relación como del desempeño de otros eslabones de la cadena.

En cada Cadena de Abastecimiento existen tres tipos de flujos: de material, de información y financieros. Cada uno de estos flujos es un proceso bidireccional (Mustafa, 2007), que los proveedores y sus distribuidores deben manejar con el fin de cumplir la difícil labor de producir y distribuir en las cantidades, los lugares y los tiempos correctos, y de este modo minimizar los costos y maximizar la satisfacción de toda la cadena (Cheng, 2007).

En general, una Cadena de Abastecimiento pretende sincronizar una serie de procesos interrelacionados para (Lambert & Cooper, 2000):

- 1) Adquirir materias primas y suministros.
- 2) Transformar esas materias primas en productos terminados.
- 3) Agregar valor a esos productos.
- 4) Distribuir y promover esos productos a los minoristas y clientes.
- 5) Facilitar el intercambio de información entre las diferentes entidades de negocio: proveedores, fabricantes, distribuidores, proveedores de logística y minoristas (Lambert & Cooper, 2000).

Para dicha sincronización, las compañías deben evaluar y administrar todos sus recursos de una manera efectiva, con el fin de generar valor para sus accionistas (Gupta&Maranas, 2003). De esta manera se puede ir alcanzando el uno de los principales objetivos de una Cadena de Abastecimiento: promover la eficiencia operativa, la rentabilidad y la posición competitiva de una firma y de sus socios.

Si una empresa pudiera adquirir recursos cada vez que lo necesitara, y si las capacidades de las plantas fueran infinitamente expandibles y contraíbles a ningún costo, el programa de producción óptimo consistiría en la manufactura de productos de acuerdo a la demanda. Sin embargo, en muchas Cadenas de Abastecimiento la adquisición de algunas materias primas está restringida, y se cuenta con largos tiempos de producción y abastecimiento (Cheng, 2007). Además, la demanda para los productos fluctúa, tanto en volumen total como en mezcla de productos. Como resultado, la producción Justo a Tiempo usualmente no es posible y si lo es, puede resultar en una sub-utilización de la Cadena de Abastecimiento (Mustafa, 2007). De este modo, si los tiempos de retardo son disminuidos, los servicios al cliente pueden mejorar sin la necesidad de tener altos niveles de

inventario. Por esto durante los últimos años en la Cadenas de Abastecimiento se ha buscado mejorar el desempeño de la cadena sustituyendo algunos flujos de material por unos de información. Los beneficios son claros, transmitir la información es menos costoso que producir y transportar material (Mustafa, 2007).

Así, uno de los problemas más frecuentes y costosos en las Cadenas de Abastecimiento es conocido como el Efecto látigo. El problema surge ante la aparición de agotados y la existencia de retardos en algún eslabón de la Cadena de Abastecimiento: ante una posible escasez de un producto, los clientes inflarían sus pedidos y ordenarían a múltiples distribuidores, dando una inicial, pero falsa, impresión al proveedor de que la demanda de dicho producto está aumentando. Esto provoca retrasos y una disminución del buen funcionamiento de la Cadena de Abastecimiento (Gonçalves, 2003). El problema continúa cuando los proveedores de las industrias comienzan a tener agotados en sus productos, produciendo de este modo mayores retrasos en la entrega de todos sus pendientes. Todo esto lleva a que los consumidores intermedios tengan que inflar sus órdenes, con el fin de satisfacer las necesidades del consumidor final. Los proveedores se verán en la obligación de aumentar sus capacidades de acuerdo con la demanda – falsa – que estos estén percibiendo (Cachon, 1999). Sin embargo, una vez el proveedor tiene la suficiente capacidad para responder a la demanda percibida, los clientes intermedios paran de inflar sus pedidos. De esta forma, el proveedor quedará con una alta capacidad de producción, después de haber invertido bastante dinero en la adquisición de ésta.

Esta variabilidad de las órdenes, presente en el efecto látigo, conlleva a problemas como inversiones excesivas en capacidad, grandes inventarios, grandes agotados, baja capacidad de utilización, grandes retrasos y bajo servicio al cliente (Armony y Plambeck 2005; Gonçalves 2003, 2010; Lee et al. 1997a; Sterman 2000). Además, todos estos problemas que se presentan pueden ser amplificadas por tres causas principales (Gonçalves, 2003):

1. El tamaño de la burbuja es altamente influenciado por la cantidad de competencia en la industria. Entre mas intensa sea la competencia entre los clientes, mas fuerte serán los incentivos de los clientes para responder agresivamente a los agotados y mayor será el tamaño de la burbuja. Con el fin de evadir estos impactos de la competencia, los proveedores deben dar prioridad a los clientes preferidos o limitar el número de clientes con los cuales desean trabajar (Gonçalves, 2003):.
2. La habilidad del proveedor para adquirir capacidad rápidamente puede reducir el impacto de los agotados. Es decir, esto conllevará a requerir menor capacidad total y se enfrentarán unos periodos más cortos de bajo desempeño (Gonçalves, 2003):.
3. El tiempo que toma a los clientes percibir y reaccionar a los retrasos del proveedor. Cuando el proveedor ofrece información en tiempo real, los clientes reaccionan instantáneamente a la información disponible, haciendo el sistema altamente inestable. Si los clientes observan un alto retraso, ellos responden rápidamente e inflarán sus órdenes, empeorando la situación. En contraste, cuando los proveedores ofrecen la información sobre los tiempos de retraso a los clientes con algún retraso, el sistema es más estable ya que tomará tiempo

antes de que los clientes reaccionen, dando así tiempo a los proveedores de reaccionar (Gonçalves, 2003):.

La idea de los proveedores de ofrecer la información retrasada sobre sus retrasos en los envíos y disponibilidad de inventario va en dirección contraria con la tendencia actual de las industrias; en las cuales se desea introducir sistemas que promuevan la transferencia de información en tiempo real de todas las partes de la cadena (Gonçalves, 2003). Para esto, se ha pensado en la implementación de incentivos entre cada una de las partes de la cadena y el uso de agentes inteligentes para la optimización de la toma de decisiones (Kimbrough 2002; Ovalle 2003; Rua 2008). Además se han realizado investigaciones explorativas a través de técnicas heurísticas, con las cuales se pretende realizar la administración de las decisiones en las Cadenas de Abastecimiento (Holmström, 2004; Wike, 1999).

### ***1.1. ANTECEDENTES***

El efecto látigo es un problema que ha tenido grandes repercusiones a nivel industrial, donde se han percibido algunos ejemplos sobresalientes en industrias donde existen tanto altos tiempos de retraso a lo largo de la cadena, como altos costos para invertir en capacidad de producción (Cachon y Lariviere 1999). Algunos de estos ejemplos reales son presentados a continuación. Procter & Gamble encontró después de varios estudios, que las órdenes de pañales recibidas por los distribuidores tenían un alto grado de volatilidad que no era explicado por las fluctuaciones de los pedidos de la demanda final (Lee, 1997a).

Durante la existencia de déficits de los microprocesadores de 1995, proveedores como Intel y ADM tuvieron que asignar su capacidad de producción entre clientes como Dell, Compaq, HP y muchos otros (Gonçalves, 2003). Dado a que los proveedores no lograban diferenciar entre la demanda del cliente final y la inflada dada por los clientes mayoristas, éstos respondían incrementando los stocks de materias primas y de maquinaria (Gonçalves, 2003). De este modo, los proveedores quedaron con exceso de capacidad y con unos precios bajos. Esta misma situación fue vivida años atrás en 1980, cuando las órdenes de DRAM chips fueron fuertemente infladas por sus proveedores (Li 1992). BMW no pudo producir la suficiente cantidad de Z3s después de que estos fueran utilizados en la película de James Bond “Golden eye” (Neil, 1997). Por su parte, Hewlett-Packard perdió gran cantidad de millones de dólares en capacidad innecesaria después de percibir unos picos en la demanda de sus impresoras LaserJet (Lee et al. 1997b). En noviembre de 1999 tras enfrentar unos agotados de los procesadores Pentium III, Intel planeó introducir una nueva planta de producción a principios del año 2000 (Foremski, 1999). Sin embargo, a finales de ese mismo año sufrieron gran cantidad de cancelaciones, lo cual los llevó a tener un decrecimiento económico y a que sus ingresos cayeran mucho más de lo pronosticado (Gaither 2001). Posteriormente a principios de la década pasada, Cisco despidió mas de 8500 personas y perdió más de US\$ 2.5 billones debido a sus grandes inventarios, ocasionados por las órdenes infladas de sus productos realizadas por los clientes (Adelman 2001).

Algunos otros ejemplos del Efecto látigo, los encontramos en la industria de los semiconductores, donde actualmente los productores se enfrentan con unos costos de capacidad aumentados, altas velocidades de obsolescencia, altos retardos y alta volatilidad en la demanda (Wu, 2005). Así en algunas ocasiones una nueva fábrica de semiconductores podría estar costando entre 1000 y 4000 millones de dólares y el precio de una nueva máquina estaría en los 5 millones de dólares (Wu, 2005).

Dada la recurrente existencia de este problema de agotados en las Cadenas de Abastecimiento, han sido posible crear modelos matemáticos que permiten definir políticas de abastecimiento, producción y distribución, usando herramientas como simulación, optimización, dinámica de sistemas y economía experimental. A continuación se hará una breve descripción de los principales estudios que se han realizado.

## ***1.2. REVISIÓN DE LA LITERATURA***

Una vez revisadas las bases de las Cadenas de Abastecimientos y algunos problemas reales, se realiza ahora una revisión de los estudios que se han desarrollado sobre el problema y las diferentes formas como se han enfrentado. El efecto de látigo no es un concepto nuevo, por lo cual ha sido estudiado concienzudamente desde hace ya varias décadas. Uno de los primeros en describir este concepto fue Mitchell en el año de 1924 cuando describió el caso de los clientes minoristas inflando sus órdenes a los manufactureros, quienes competían con otros minoristas por un suministro seguro (Mitchell 1924, p. 645). Este trabajo no solo se enfocó en la amplificación de las órdenes si no también en la posibilidad de que demandas no-cíclicas y no-aleatorias podrían generar oscilaciones cíclicas en las órdenes y en los niveles de inventario en eslabones que se encontraran aguas arriba en la Cadena de Abastecimiento. Uno de los primeros modelos formales que mostró la inestabilidad de las Cadenas de Abastecimiento data de hace mas de 50 años y coincide con el surgimiento de la dinámica de sistemas (Forrester 1958, 1961). Forrester argumentó que las fluctuaciones y amplificaciones en las Cadenas de Abastecimiento no eran solo causa de las variaciones en la demanda final, sino que eran causadas por la estructura interna del sistema. Posteriormente, Williard Fey se encargó de convertir los trabajos adelantados por Forrester en un juego, el cual se convertiría años mas tarde en el conocido juego de la cerveza. Las investigaciones realizadas desde la dinámica de sistemas se enfocaron en analizar las oscilaciones en diferentes sectores de las Cadenas de Abastecimiento. Por ejemplo, Mass (1975) consideró la relación entre las oscilaciones de los inventarios y sus impactos en la fuerza laboral de las compañías. Morecroft en 1980 investigó la implementación del sistema de planeación de requerimientos de material (MRP por sus siglas en ingles) en una compañía, con lo cual demostró que entre más rápido sea el tiempo de respuesta podría incrementar la frecuencia y la amplitud de las oscilaciones de los inventarios. Motivados por las investigaciones de racionalidad limitada y economía experimental, los investigadores en dinámica de sistema se enfocaron en la investigación experimental.

En 1987 John Sterman realizó estudios experimentales en el MIT con el fin de obtener modelos sobre comportamientos (Sterman, 1987). Parlar (1988) y Li (1992) investigaron el efecto de los

inventarios en la competencia entre cliente minoristas. Posteriormente en 1989, Sterman exploró económicamente las reglas de decisión usadas por los sujetos jugando el juego de la cerveza, en las cuales encontró una mala percepción de los ciclos de realimentación por parte de los jugadores (1989b). En el mismo año, Sterman (1989a) exploró a través de modelos analíticos las causas operacionales que podrían llevar a las amplificaciones en la variabilidad de la demanda. Las causas operacionales incluían órdenes por lotes, grandes compras debidas a los descuentos en los precios y órdenes erróneas debidas a las técnicas de pronósticos de demanda y a los tiempos de retraso en las órdenes (Chen et al. 2000). Diehl y Sterman (1995) continuaron estos trabajos considerando como la complejidad de realimentación afecta el proceso de toma de decisiones en Cadenas de Abastecimiento.

En contraste con estas explicaciones comportamentales de las inestabilidades de las Cadenas de Abastecimiento, la literatura de la administración ofrece una gran cantidad de explicaciones operacionales. Por ejemplo, Lee (1997b) propone que los agentes racionales son capaces de generar la variabilidad de la demanda a través de cuatro causas operacionales: procesamiento de señales de demanda, razonamiento (agotados), procesamiento de órdenes y variaciones de precios. Ese mismo año, Lee (1997a) desarrollo un modelo con agentes racionales con el fin de mostrar que el comportamiento estratégico entre los clientes pueden presentarse cuando los proveedores asignan capacidad insuficiente en proporción con las órdenes de los clientes. Los proveedores en este modelo presentan información imperfecta, ya que no es posible distinguir entre el valor de la demanda final y aquella inflada por los clientes mayoristas. Porteus (1997) estudió un modelo similar al de Lee, pero este propuso un esquema de coordinación diferente, llamado “responsibility token”. Chen (1997) estudió un juego similar al popular Juego de la Cerveza (Sterman 1989), excepto en que las demandas en diferentes periodos son variables aleatorias independientes con una distribución común que es conocida por todos los jugadores.

Wike (1999) desarrolló un método heurístico en programación matemática y programación dinámica para la optimización de los inventarios en cada uno de los eslabones de la Cadena de Abastecimiento. Esta metodología de solución práctica buscaba determinar el calendario de envíos que permitieran minimizar los inventarios, las órdenes pendientes y los costos totales.

Cachon y Lariviere (1999a) examinaron como mecanismos de aprendizaje para la asignación impactan el comportamiento y el desempeño de la Cadena de Abastecimiento, mostrando que esto permite a los proveedores mejorar sus ganancias a expensas del desempeño de los clientes y de la cadena en general. Posteriormente estos mismos autores, analizaron el impacto de otros cuales mecanismos de asignación y de las decisiones de construcción de capacidad de los proveedores. Ellos construyeron un modelo multiperiodo donde los proveedores escogían el esquema de asignación, los clientes intermedios ponían sus órdenes y los proveedores finalmente decidían cuanta capacidad construir. En el 2000, Chen mostró que el Efecto látigo puede ser causado básicamente por dos causas: la técnica de pronóstico de demanda y los tiempos de retrasos.

Mientras que existe una disputa entre los investigadores defendiendo las causas operacionales y comportamentales de las inestabilidades de las Cadenas de Abastecimiento, Croson y Donohue (2002, 2003, 2005) sugieren que el Efecto látigo existe aun en la ausencia de las fluctuaciones de

los precios, órdenes por lotes o estimaciones en la demanda.

En el 2003, Alwan investigó el impacto de una demanda estacionaria combinada con diferentes técnicas de pronóstico y una política de manejo de inventarios ante la presencia de amplificaciones en las órdenes de los clientes mayoristas. Gonçalves (2003) investigó como diferentes parámetros (retardos en la adquisición de capacidad, competencia entre clientes, etc.) influyen el tamaño de la burbuja de demanda.

Una aproximación diferente a la formulación hecha desde el punto de vista de la Dinámica de Sistemas fue planteada por Warburton (2004), quien en lugar de usar simulaciones o experimentos con sujetos para generarlos resultados, derivó una solución analítica. Este modelo de Warburton difiere de aquel propuesto por Sterman (1989a) en algunos aspectos claves como lo son las demandas finales y las consideraciones tenidas en los tiempos de retardo. Sin embargo Warburton no plateó resultados analíticos teniendo en cuenta la presencia de ciclos de realimentación.

Miyaoka y Hausman (2004), Balakrishnan (2004) y Daganzo (2004) enfocaron sus estudios en la búsqueda de alternativas que permitieran mitigar el efecto látigo, utilizando información de los históricos de la demanda. Mientras que Kim (2006) utilizó un modelo que le permitiera plantear estrategias para reducir la variabilidad de los tiempos de retardo.

A partir de los estudios de Lee (1997), algunos autores como Zhang (2004) y Gilbert (2005) utilizaron algunas aproximaciones estadísticas para examinar el impacto de diferentes procesos de demanda y diferentes técnicas de pronóstico ante la presencia del efecto látigo. En Cadenas de Abastecimiento, Guillén et al (2005) formularon un modelo de Programación Entera Mixta para el diseño de una Cadena de Abastecimiento multiobjetivo estocástica, la cual resuelven utilizando el método de la restricciones ponderadas y la técnica de ramificación y acotamiento. Hayya et al (2006) investigaron algunas suposiciones de diferentes modelos del efecto látigo en las Cadenas de Abastecimiento y concluyeron que algunas diferencias podrían ser debidas a algunas suposiciones de cómo los tiempos de retardo son incorporados en los pronósticos de demanda de los proveedores. Rua (2008) considera la modelación de una Cadena de Abastecimiento, formada de varios conjuntos de proveedores, plantas, productos, bodegas y mercados el cual permite un tratamiento multiobjetivo y estocástico del problema, posibilitando la incorporación dinámica de las preferencias del decisor ante determinados escenarios.

De este modo, mientras que las consecuencias inmediatas de las órdenes infladas están claramente identificadas en la literatura, algunos de los impactos a largo plazo y los mecanismos que llevan a que se den los agotados no están aún muy bien comprendidos (Gonçalves, 2003 y 2010). Un abastecimiento seguro, es decir, que no se presenten excesos ni escasez, es uno de los desafíos principales que enfrenta toda cadena (Geary & Childerhouse, 2002). Los clientes mayoristas no son responsables por la estabilidad de la cadena, pero que ésta sea estable o no depende de la racionalidad individual de ellos a la hora de tomar decisiones. El interés principal del presente trabajo es entender la racionalidad de los individuos al tomar decisiones en pedidos que llevan a generar el problema de las burbujas de demanda a partir de un proceso de toma de decisiones dentro de la Cadena de Abastecimiento.

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Un problema particular que se presenta en las Cadenas de Abastecimiento, caracterizadas por tener múltiples clientes mayoristas y un único proveedor (Ver Figura 1) vendiendo un producto único e insustituible, es la existencia de déficit en algún lugar de la Cadena de Abastecimiento. Una vez se crea el déficit, se presentará una reacción en el resto de la cadena, la cual irá creciendo y no se detendrá hasta que sus efectos hayan desaparecido por completo. La presencia de déficit conlleva a que los múltiples clientes mayoristas, quienes compiten por el producto, empiecen a realizar pedidos más elevados de los necesarios. Estas múltiples órdenes dan una falsa impresión al proveedor de que la demanda de dicho producto está aumentando (Lee et al. 1997). En este momento el proveedor, quien basa su producción en un canal de órdenes y en su capacidad instalada, decide aumentar su capacidad de producción mientras los retardos en las entregas de los pedidos (inflados) de los clientes siguen retrasándose. La existencia de más retrasos provoca más pedidos inflados por parte de los clientes y mayor deseo de adquisición de capacidad por parte de los proveedores (Gonçalves, 2003). Así, el problema radica en la presencia de déficits en algún lugar de la cadena. Estos déficits son claramente influenciados por cada una de las decisiones que toman cada uno de los agentes dentro de la cadena y lo cual ocasiona una desestabilización de la misma. Luego, cuando el proveedor adquiere toda la capacidad necesaria, la burbuja creada por las inflaciones de los clientes mayoristas estalla (Gonçalves, 2003). El estallido es caracterizado por un periodo de cancelaciones de órdenes y una baja demanda de los clientes finales, mientras los clientes mayoristas reducen sus inventarios excesivos (Gonçalves, 2003). Este comportamiento de escasas, exceso e inestabilidades en las Cadenas de Abastecimiento crea el interés de estudiar: ¿Cuál es el comportamiento de las personas, asumiendo el rol de clientes mayoristas, a la hora de realizar los pedidos a sus proveedores, en una Cadena de Abastecimiento caracterizada por tener un producto único e insustituible y en la cual la adquisición de capacidad de producción por parte del proveedor es costosa y retardada? ¿Cómo afectan las decisiones de pedidos de los clientes mayoristas sus propios costos?

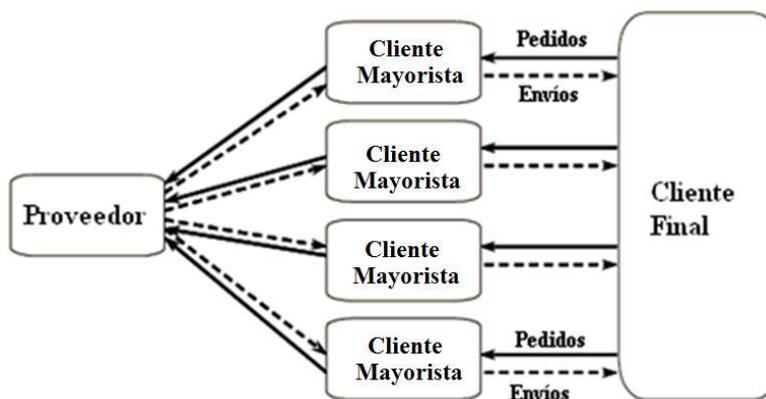


Figura 1 Representación gráfica del problema de estudio.

Esta tesis está enfocada en expandir las investigaciones en lo que se refiere las órdenes realizadas por los clientes directos enfrentando diferentes tiempos de retardo tanto en la respuesta de los

proveedores como en la colocación de sus propias órdenes. Con el fin de lograr unos resultados adecuados, se recurre a un modelo formal que capture los comportamientos de las personas, en el sistema de estudio; se trabaja en tiempo continuo y contando con tiempos de retraso endógenos, características que pueden ser aportadas a través del uso de la dinámica de sistemas. Para profundizar en el análisis de los resultados de del modelo se utilizará tanto la optimización como la experimentación. La optimización permite encontrar unos niveles de referencia adecuados para la toma de decisiones, pero que no permiten identificar los comportamientos de las personas cuando se enfrentan a determinados sistemas. Por esta razón, se utiliza como base para el actual estudio la experimentación, la cual es un campo en crecimiento dentro la dinámica de sistemas y la economía. Esta experimentación ha servido para el estudio de sujetos y de este modo facilitar tanto para la construcción de nuevas teorías como para la validación y formulación de alternativas. En el siguiente capítulo se realiza una clara descripción de la metodología a desarrollar.

## **2. METODOLOGÍA**

Las Cadenas de Abastecimiento se han estudiado utilizando diferentes metodologías con el fin de comprender y buscar soluciones a los diferentes problemas que éstas presentan. Una de las estrategias utilizadas ha sido representar las Cadenas de Abastecimiento mediante modelos matemáticos que permiten definir políticas de abastecimiento, producción y distribución (Rua, 2008). Como se dijo antes, si una empresa pudiera adquirir recursos cada vez que lo necesitara, y si las capacidades de las plantas fueran infinitamente expandibles y contraíbles a ningún costo, el programa de producción óptimo consistiría en la manufactura de productos de acuerdo a la demanda. Sin embargo, en muchas Cadenas de Abastecimiento el suministro de algunas materias primas está restringido, y se cuenta con largos tiempos de producción y abastecimiento. Además, la demanda para los productos fluctúa, tanto en volumen total como en mezcla de productos. Este tipo de problema puede resolverse mediante modelos de optimización matemática. La optimización consiste en encontrar las mejores decisiones que lleven a una deseable utilización de los recursos disponibles de los proveedores, fábricas, bodegas y minoristas (Escudero et al, 1999). En esta tesis, se recurrirá al uso de la optimización con el fin de encontrar una trayectoria de decisiones óptimas, que permita encontrar un nivel de referencia aceptable, para ser comparado con el desempeño de los sujetos. Cabe aclarar que la optimización de alguna parte de la cadena -optimización local de la cadena- no garantiza el óptimo global.

Dado que el objetivo de la tesis está relacionado con entender el comportamiento de las personas, es necesario utilizar una metodología de carácter experimental. Así, en este capítulo se realiza una descripción general de las metodologías a utilizar: se empieza con una breve revisión a los principios de herramientas como simulación, dinámica de sistemas y la experimentación, discutiendo los conceptos básicos de los experimentos de laboratorio en dinámica de sistemas.

### **2.1. SIMULACIÓN**

La simulación parte de la construcción de un modelo que reproduzca un determinado comportamiento problemático global, mediante el funcionamiento interrelacionado de la multiplicidad de mecanismos parciales que lo componen (Friedman & Cassar, 2004). De este modo se dispone de una herramienta que permite evaluar el impacto de distintas estrategias sobre las variables de interés y poder plantear estrategias de solución a diferentes tipos de problemas (Garayalde et al 1992). Los métodos y mecanismos para lograr plantear estas estrategias son muy variados. Unos son más apropiados que otros dependiendo de los problemas o intereses que conciernen a los observadores y de las características de los mismos sistemas de procesos. Algunos de los mecanismos, conocidos por muchos años siguen siendo utilizados ampliamente, mientras otros más recientes sólo empiezan a popularizarse. De este modo, se debe conocer bien cada uno de los métodos y sus aplicaciones, con el fin de escoger en cada caso los métodos de simulación más adecuados que permitan obtener los mejores resultados (Dyner et al 2008).

Para el desarrollo de esta tesis, el uso de la simulación es utilizada a partir de un modelo de Dinámica de Sistemas, el cual permite obtener trayectorias para las variables incluidas en el

modelo, mediante la aplicación de técnicas de integración numérica. Sin embargo, estas trayectorias nunca se interpretan como predicciones, sino como tendencias. El objeto de los modelos de Dinámica de Sistemas es, llegar a comprender cómo la estructura del sistema es responsable de su comportamiento (Dyner et al 2008). Esta comprensión normalmente debe generar un marco favorable para la determinación de las acciones que puedan mejorar el funcionamiento del sistema o resolver los problemas observados (Roberts, 1983). La ventaja de la Dinámica de Sistemas consiste en que estas acciones pueden ser simuladas a bajo coste, con lo que es posible valorar sus resultados sin necesidad de ponerlas en práctica sobre el sistema real (Dyner et al 2008).

## ***2.2. DINÁMICA DE SISTEMAS***

Dinámica de Sistemas es una técnica que permite comprender las causas de comportamientos interesantes en sistemas socio-económicos y naturales (Dyner et al 2008). El origen de esta técnica se remonta a finales de los años cincuenta y su implantación definitiva se produce durante la década de los sesenta. El desarrollo de este método se debe al trabajo de J. W. Forrester del Instituto Tecnológico de Massachussets, quien por primera vez utilizó técnicas pertenecientes a las disciplinas de ingeniería automática para el estudio de procesos sociales y económicos. Forrester construyó un puente entre los métodos empleados por los ingenieros en problemas tecnológicos y los métodos específicos de estudio de sistemas sociales. Al comienzo se aplicó la metodología para la realización de pruebas a modelos de comportamientos mediante una experimentación directa (Sterman, 1987), y luego para el estudio de la hipótesis de las malas percepciones de ciclos de realimentación con retardos a partir del conocido “Juego de la Cerveza” (Sterman, 1989a y 1989b).

Al igual que ocurre en la automática, la búsqueda de los lazos de realimentación que operan dentro de un sistema y la forma en que estos determinan el comportamiento dinámico del mismo constituye la piedra angular sobre la que descansa la Dinámica de Sistemas.

Un aspecto notable del método es su capacidad descriptiva (Dyner et al 2008). Situados en la perspectiva del modelador, su primera tarea consiste en determinar cuáles son los elementos que integran el modelo de acuerdo con los objetivos establecidos y decidir cuáles de ellos están relacionados entre sí. En esta tarea puede ser de ayuda ir construyendo un diagrama que muestre los elementos e ir especificando aquellos que están relacionados entre sí. Un diagrama de estas características se conoce como diagrama causal (Aracil et al, 1997). En un diagrama causal la naturaleza de la relación entre los elementos no está todavía explícita, se trata de una fase inicial en la conceptualización del modelo en la que se establece qué elementos pueden estar directamente relacionados y cuáles no (Sterman, 2000).

Simultáneamente, no después de terminar el diagrama causal, se debe iniciar la clasificación de las variables que aparecen en el modelo (Sterman, 2000). De acuerdo con las reglas de modelado de Dinámica de Sistemas hay dos tipos importantes de variables que deben ser discernidas. Las variables de estado del sistema, llamadas niveles y las variables responsables del cambio de las variables de estado, llamadas flujos (Dyner et al 2008). El modelador debe encajar los niveles con

los flujos responsables del cambio de los mismos construyendo subsistemas por los que circula un flujo continuo de una misma materia desde un nivel a otro o entre un nivel y un sumidero o fuente. El modelador debe, además, buscar los lazos de realimentación que definen los valores de las variables de flujo en función de los niveles y la de información que relaciona entre sí los diversos subsistemas conservativos del modelo (Sterman, 2000;Dyner et al 2008).

La claridad de estos diagramas en cuanto a representación de la estructura global del sistema y de las relaciones entre las variables que lo constituyen es tan sorprendente que los modelos pueden ser presentados a no especialistas y ser inmediatamente entendidos (Dyner et al 2008). Ello hace posible su crítica y una confianza o desconfianza en los modelos fundamentada en un conocimiento completo de las hipótesis utilizadas en su construcción. Con esta técnica, se han realizado aportaciones de interés en terrenos tan diversos como biología, economía, gestión empresarial, urbanismo, psicología y muchos otros (Aracil et al, 1997) y por estas razones es utilizada para plantear las hipótesis dinámicas del modelo de la cadena de abastecimiento estudiada en el desarrollo de esta tesis.

### **2.3. EXPERIMENTACIÓN**

Hoy en día la experimentación es un campo en crecimiento dentro la dinámica de sistemas y con la asociación con otros campos del conocimiento como la economía, ha servido tanto para la construcción de nuevas teorías como para su validación y formulación de otras teorías alternativas.

La economía experimental tuvo sus inicios en 1931 cuando L. L. Thurstone llevó a cabo unos experimentos económicos de laboratorio. Su objeto de estudio era la decisión individual y su objetivo, determinar a través del experimento las curvas de indiferencia de los participantes (Friedman et al, 1985). De aquí en adelante son muchos los estudios, críticas, complementos y validaciones que se han realizado a esta forma de estudiar los comportamientos y preferencias de las personas (Loewenstein 1994, Fatás 2004).

La teoría de economía experimental se fundamenta en que los sujetos son remunerados de acuerdo a la teoría de valor inducido, cuya idea básica es que la personas simplemente “jueguen” tratando de dar lo mejor de cada uno, lo cual se pretende lograr mediante la utilización de un incentivo como medio que permita al experimentador inducir características específicas en los sujetos participantes de los experimentos (Friedman y Sunder, 1994). El incentivo es el pago que reciben los participantes, el cual será función del desempeño de cada uno en el experimento.

Desde la década de los 80's, los investigadores de dinámica de sistemas, desde el punto de vista de la toma de decisiones, han usado el marco metodológico de laboratorio de experimentos para estudiar la dinámica de la toma de decisiones. Las investigaciones en este campo enfatizan en el vínculo entre el comportamiento de los sujetos y la evolución del sistema (Paich & Sterman, 1993). Las decisiones de los sujetos alteran el estado del sistema en maneras que cambian el entorno de decisión que será enfrentado en el futuro (Edwards, 1962; Brehmer, 1992; Paich&Sterman, 1993).

La aproximación experimental tradicional consiste en cortar algún lazo de realimentación con el fin de que las decisiones de los sujetos cierren dicho lazo basados en un caso de estudio en específico (Gary *et al.* 2008, Moxnes, 2004).

Los experimentos en dinámica de sistemas están en un ambiente que incluye estructuras de realimentación, retardos y no linealidades. De esta manera, la dinámica de sistemas responde a las críticas de que los datos obtenidos experimentalmente no representan un fenómeno económico real porque ellos son ejecutados en un entorno simple de laboratorio (Loewenstein, 1999; Fatás& Roig, 2004). Smith (1982) manejó este conflicto a partir del precepto del Paralelismo. De acuerdo con este principio, regularidades comportamentales persistirán en una nueva situación mientras las condiciones relevantes permanezcan substancialmente constantes. Por lo tanto, si un ambiente de laboratorio en particular difiere significativamente del mundo real, un nuevo experimento podría ser conducido para estudiar el efecto de dichas diferencias en el comportamiento humano (Fatás& Roig, 2004).

Desde el punto de vista de la validación externa, la simplicidad de los experimentos es una virtud mas que un defecto. La razón para esto es que el mundo real es frecuentemente demasiado complejo para aproximarlos en el laboratorio y aproximaciones inútiles para hacer esto podrían disminuir el valor científico del experimento (Friedman & Cassar, 2004).

En contraste, la simplicidad experimental permite controlar las variables y ofrece la mejor oportunidad de ganar perspicacia en las preguntas que motivan la investigación (Friedman & Sunder, 1994; Friedman & Cassar, 2004). La metodología de Economía experimental es bien presentada por Friedman & Sunder (1994) y/o Friedman & Cassar (2004), mientras los principales resultados son resumidos en *The Handbook of Experimental Economics Results* (Plott& Smith, 2008).

A continuación se examinan las aplicaciones de los experimentos de laboratorio en dinámica de sistemas. Las cuales se organizan básicamente en dos líneas de investigación: construcción de teoría y validación de teoría.

### **2.3.1. Construcción de Teoría**

Los experimentos en economía y psicología han sido importantes para la formulación de hipótesis que expliquen el comportamiento humano. En dinámica de sistemas, en contraste, la investigación experimental muestra un inmenso potencial para proponer hipótesis que expliquen por qué los sujetos fallan en entender y controlar un sistema dinámicamente complejo. En particular, dos hipótesis de comportamiento pueden ser identificadas: mala percepción de la realimentación y mala percepción de la Bio economía (Moxnes, 2004, Sweeney y Sterman, 2000). Mientras estas dos hipótesis enfatizan en la teoría de racionalidad limitada y enfatizan en el hecho de que las personas tienen modelos mentalmente pobres, cada uno de estos se enfocan en asuntos particulares (Friedman & Cassar, 2004).

Sterman (1989a y 1989b) formuló sus hipótesis de la mala percepción de las realimentaciones para explicar por qué los sujetos se desempeñan pobremente en ambientes caracterizados por una dinámica compleja. De acuerdo con sus hipótesis los sujetos fallan en entender correctamente la naturaleza y significancia de las estructuras de causalidad de cada sistema, en particular las relaciones causa efecto entre las decisiones y el entorno (Sterman, 1989a, p. 324). En Sterman 1989<sup>a</sup>, los sujetos juegan un rol de administrador de un sector económico completo tomando decisiones para satisfacer la demanda. Estas decisiones muestran oscilaciones costosas en las órdenes. En el juego de la cerveza (Sterman, 1989b), cada uno de los cuatro sujetos maneja un eslabón de una cadena de producción: minorista, mayorista, distribuidor y fábrica. Nuevamente, las decisiones de órdenes de los sujetos ocasionaron oscilaciones costosas. Estos resultados son explicados por Sterman por medio de la teoría de la racionalidad limitada (Simon, 1995 y 1979) y por Tversky y Kahneman (1974) usando heurísticas o simples reglas de decisión.

Inspirado en las hipótesis de baja percepción de las realimentaciones propuestas por Sterman, Moxnes (1998a y 1998b) estableció sus hipótesis de baja percepción en Bio economía para explicar por qué las personas no manejan bien los recursos bio económicos.

### **2.3.2. Validación de Teoría**

Los experimentos de laboratorio también han sido usados para la validación de algunas teorías relacionadas con la teoría de la racionalidad limitada en entornos dinámicamente complejos, en especial en Cadenas de Abastecimientos y entornos de competencia en mercados.

Los trabajos de Sterman, previamente discutidos, han generado una serie de experimentos a partir de un cambio en la complejidad de la dinámica, lo cual ha servido para manejar las limitaciones que se presentan en la toma de decisiones de las personas y mejorar el desempeño de ellas y por lo tanto de la comprensión de las realimentaciones presentes en esos ambientes dinámicos. Algunos ejemplos de este tipo de experimentos desarrollados son Kampmann (1992), Bakken (1993), Diehl y Sterman (1995), Langley et al. (1998), Croson y Donohue (2006), y Gary y Wood (2008), entre otros.

En sus experimentos en industrias de capital-intensivo, Bakken (1993) varió las condiciones que permitieron a los sujetos estar más familiarizados con la industria. Aplicaciones similares fueron obtenidas estudiando la difusión de nuevos productos en algún tipo de mercado (Paich & Sterman (1993), Langley et al. (1998) y Gary & Wood (2008)), en estos experimentos se desarrollaron diferentes procesos de realimentación, ciclos de vida de los productos y competencia de mercados. Por otra parte Diehl & Sterman (1995) y Barlas & Özevin (2004) continuaron los estudios experimentales del problema de la administración de inventarios, en los cuales incluyeron algunos retardos en el desarrollo de las actividades y diferentes patrones de comportamiento de la demanda final.

Para determinar si la complejidad de los simuladores causaba la mala percepción observada de la dinámica de la bio-economía, Moxnes (2004) diseñó un experimento para estudiar la administración de renos y líquenes con unos modelos simples de dinámica de sistemas: uno con un solo stock y

otro con dos. Moxnes encontró que la tendencia básica de la mala percepción de la bio-economía permanecía inclusive cuando los experimentos eran simplificados, mostrando que, modelos mentales inapropiados causan la baja comprensión de la dinámica de la bio-economía. Además, Moxnes encontró que el comportamiento de los sujetos puede ser explicado por un ajuste heurístico, soportado por la teoría de la racionalidad limitada. Estudiando ciclos de commodities, Arango (2006a) incrementó la complejidad de los mercados experimentales variando la longitud de los retardos de decisiones de inversión y de los tiempos de duración de la capacidad. Arango encontró tendencias cíclicas en los precios en la medida en que la complejidad del mercado aumenta.

Gonçalves & Arango (2010) realizaron unos experimentos en Cadenas de Abastecimientos en las cuales analizaron el efecto que tienen las decisiones de los proveedores enfrentando diferentes longitudes de retardos y de competencia mayorista, en estos experimentos se encontró nuevamente la presencia de bajo rendimiento de los sujetos a medida en que los retardos aumentan.

Los resultados experimentales de todos estos estudios son consistentes con los resultados iniciales de Sterman: los sujetos desempeñan pobremente respecto a los objetivos del experimento, debido a que las heurísticas que ellos usan sistemáticamente malinterpretan la estructura causal del sistema, produciendo tendencias cíclicas en el comportamiento del sistema. Todos estos resultados soportan la hipótesis de la mala percepción de las realimentaciones: cuando la complejidad dinámica del entorno es aumentada (disminuida), los resultados obtenidos empeoran (mejoran) con respecto al nivel óptimo o nivel de referencia establecido (Bakken, 1993; Paich&Sterman, 1993; Diehl&Sterman, 1995; Young *et al.*, 1997; Langley *et al.*, 1998; Atkinset *al.*, 2002; Barlas&Özevin, 2004; Wu&Katok, 2006; Gary & Wood, 2008). Finalmente, la mayoría de los experimentos que usan los principios de mejoramiento de la toma de decisiones muestran que estos principios pueden reducir los efectos negativos de la baja percepción (Domínguez *et al.*, 1998; Gröbller *et al.*, 2000; Howie *et al.*, 2000; Atkinset *al.*, 2002).

### **2.3.3 Principios de los experimentos de laboratorio**

Los experimentos de laboratorio toman lugar en un ambiente controlado compuesto por tres elementos: primero el objetivo, el cual corresponde a la meta que cada participante busca en el experimento. Segundo el sistema, el cual describe el ambiente de toma de decisiones y las reglas de comportamiento. Y tercero el comportamiento, el cual corresponde a las decisiones tomadas por los individuos que participan en el experimento (Friedman &Sunder, 1994; Friedman &Cassar, 2004).

Los experimentos de laboratorio son basados en los principios de la teoría del valor inducido (Smith, 1976 y 1982), y de paralelismo (Smith, 1982). La teoría del valor inducido dice que un uso adecuado de un medio de recompensa induce un comportamiento específico en los agentes. El paralelismo, compite con la validación externa de los datos experimentales a través del principio general de la inducción.

Con el fin de inducir un comportamiento en específico tres condiciones son suficientes: monotonicidad, prominencia y dominancia (Smith, 1982). La monotonicidad indica que ante un

medio adecuado de recompensa, más siempre es mejor (o alternativamente, menos es siempre mejor). Por ejemplo, se puede asumir que los humanos prefieren mayor cantidad de ingresos que menos, y prefieren menos trabajos duro que más. La prominencia indica que la recompensa recibida por los sujetos dependerá de sus decisiones, y en ocasiones de las decisiones del resto de sujetos (Friedman & Cassar, 2004).

Finalmente, la dominancia indica que las utilidades de los sujetos vienen dadas por el medio de recompensa y el resto de influencias son irrelevantes. Por ejemplo, los sujetos están siempre preocupados por las recompensas de los otros sujetos (Hey, 1996). Entonces, los procedimientos experimentales tienen que hacer irrelevantes las recompensas de los otros sujetos, haciendo imposible saber o estimar las recompensas del resto de los sujetos. Una forma usual de cumplir estas tres condiciones es realizando pagos (en la moneda local) que sean mayores que el costo de oportunidad de los sujetos (Hey, 1996).

Con el fin de obtener un mayor control y una mejor replicabilidad de los resultados en el desarrollo de unos experimentos de laboratorio, los expertos han planteado siete claves que deberían ser tenidas en cuenta con el fin de tener una adecuada experimentación (Friedman & Cassar, 2004). A continuación se resumen cada una de ellas:

1. Motive adecuadamente a los sujetos pagándoles adecuadamente después de que el experimento haya terminado. Esto ayudará a obtener monotonicidad y prominencia.
2. Busque sujetos con bajos costos de oportunidad y crecientes curvas de aprendizaje. Esto ayudará a obtener dominancia y prominencia a bajo costo.
3. Cree el ambiente económico más simple que le sea posible en el cual pueda manejar sus objetivos. La simplicidad promueve la prominencia y reduce ambigüedades en la interpretación de resultados.
4. Evite palabras “cargadas” en las instrucciones con el fin de promover la dominancia
5. Si la dominancia se convierte cuestionable, intente utilizando un incremento proporcional en la recompensa.
6. Mantenga en lo posible la privacidad de las decisiones de los sujetos, las recompensas y los objetivos. Esto ayuda a mejorar la dominancia.
7. Nunca le mienta a los sujetos de ninguna manera

## **2.4 OPTIMIZACIÓN**

Una vez desarrollado el experimento, es importante determinar un nivel de referencia con el cual se puedan comparar que tan buenas (o malas) fueron las decisiones tomadas por cada uno de los sujetos. Con el fin de determinar esta trayectoria de decisiones “óptima” se requiere de un método de optimización evolutiva

En general, un problema de optimización consiste en minimizar o maximizar el valor de una función objetivo. En otras palabras se trata de calcular o determinar el valor mínimo o el valor máximo de una función que depende de una o varias variables en el tiempo. Se debe tener presente que la función que se desea minimizar o maximizar debe ser expresada como función de las otras

variables y que para el caso de esta experimentación son las decisiones que cada uno de los sujetos toma a lo largo de los experimentos.

Sin embargo, dado que el modelo que se desea optimizar está inmerso en un sistema lleno de no linealidades y realimentaciones, es importante contar con un método de optimización meta-heurístico que permita evaluar con mayor precisión la trayectoria de decisiones.

La optimización evolutiva busca soluciones cercanas al óptimo, a través de una yuxtaposición de esquemas cortos, de bajo orden y de altas aptitudes. Estos métodos permiten funciones objetivo altamente no lineales, en la cual la búsqueda es guiada por información de valores de la función objetivo, que no necesita ser continua, diferenciable o unimodal. Además, buscan en una población y no en un único punto, esto incrementa la probabilidad de que no se quede atrapado en un óptimo local. Finalmente, permiten trabajar en paralelo buscando soluciones en espacios de decisión multimodales complejos.

Este método de búsqueda evolutiva será utilizado en la sección 4.3 con el fin de determinar la trayectoria de decisiones “óptima” en cada uno de los diferentes casos de estudio de esta experimentación.

### 3. MODELO

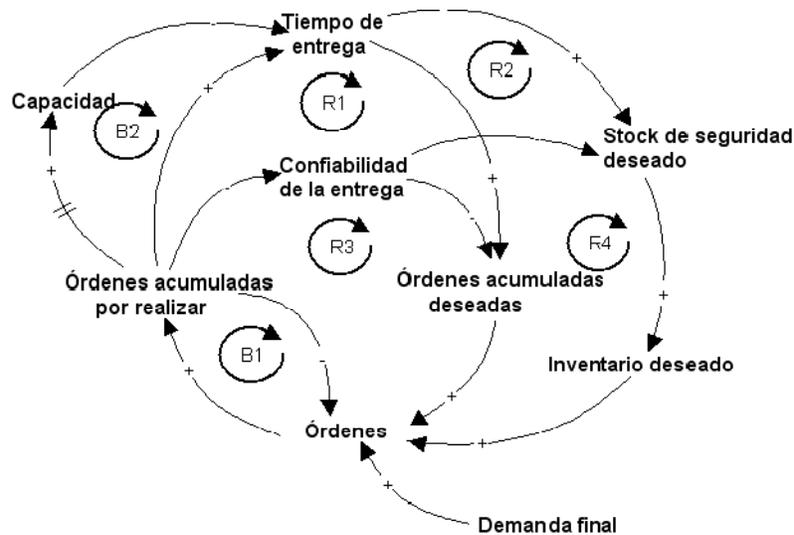
Luego de haber entendido los conceptos básicos de una Cadena de Abastecimiento y de las metodologías que se utilizarán para el estudio del problema de las burbujas de demanda y órdenes fantasmas, se procede a realizar una primera aproximación con las herramientas de la dinámica de sistemas. Durante este capítulo se presenta inicialmente el diagrama causal propuesto por Gonçalves (2003), que explica la interrelación entre cada una de las variables del problema en estudio, además se realiza una adaptación del modelo matemático de Gonçalves, utilizando un diagrama de flujos y niveles. Finalmente, con base en algunos resultados iniciales del modelo, se realiza la validación del modelo propuesto.

#### 3.1. DIAGRAMA CAUSAL

En una Cadena de Abastecimiento con un único proveedor y múltiples clientes mayoristas (Ver Figura 1), Gonçalves (2003) plantea que el cliente mayorista infla sus órdenes cuando un abastecimiento insuficiente es asignado en proporción con su demanda final. El cliente mayorista ajusta sus órdenes hasta que las órdenes acumuladas por recibir del proveedor se ajusten con sus niveles deseados, formando un ciclo negativo (**B1**), llamado *Ajuste de la línea de abastecimiento* en la Figura 2. El proveedor bajo condiciones estables basa su producción en las órdenes anteriormente recibidas, pero cuando un incremento repentino en estas órdenes ocurre, los clientes mayoristas y finales enfrentan tanto largos tiempos de retraso en las entregas como alta incertidumbre en las cantidades recibidas. Los clientes tienen que esperar semanas antes de recibir las entregas parciales de los productos deseados. ¿Cómo deberían los clientes mayoristas reaccionar ante estos problemas?

En este caso Gonçalves considera la reacción de los clientes ante un incremento en los tiempos de entrega: inclusive en la ausencia de competencia, los clientes tienen que incrementar sus pedidos con el fin de ajustar su línea de abastecimiento en línea con el nuevo retardo percibido en las entregas. Los clientes racionales ajustan el incremento en los retardos en las entregas, *Ordenando por adelantado* de sus necesidades. La Figura 2 muestra el ciclo positivo (**R1**) *Ordenando por adelantado*. La competencia entre los clientes mayoristas causa que éstos sobre-compensen los incrementos en los retardos en las entregas, ordenando por adelantado mucho más de lo necesario.

Por otra parte, el proveedor puede incrementar su capacidad – ciclo de *ajuste de capacidad* (**B2**) - con el fin de equilibrar el efecto del ciclo positivo en el sistema. Interesantemente, en la medida en que la capacidad se vuelve disponible, el ciclo de refuerzo puede actuar en la dirección contraria. En la medida en que las órdenes pendientes por recibir disminuyen y en que los tiempos de entrega caen, los clientes no sienten la necesidad de ordenar por adelantado. Por lo tanto, ellos reducen su línea de abastecimiento de órdenes, lo cual lleva a una disminución en las órdenes y a una disminución rápida del nivel de órdenes que tiene el proveedor por entregar. Una vez el producto está disponible, las órdenes infladas desaparecen por virtud del mismo ciclo positivo que había ocasionado en el inicio que estas aparecieran



**Figura 2** Diagrama causal del problema de estudio.

Otra consecuencia de mayores tiempos de retardo es el deseo de los clientes por tener mayores inventarios de seguridad, lo cual crea la necesidad de aumentar las órdenes realizadas al proveedor, aumentando las órdenes aumentadas por recibir y por lo tanto creando futuros tiempos de retardo aun más largos - **(R2) Ajuste de inventario**.

Ahora considérese la reacción de los clientes al recibir únicamente una fracción de sus pedidos: Esto ocasiona que los clientes pierdan confiabilidad en los envíos de los proveedores, por lo cual con el fin de compensar esta desconfianza ordenan más de lo necesario. Si los clientes esperan recibir solo una fracción de sus órdenes totales, ellos inflan sus órdenes – *ordenando defensivamente* – con la esperanza de obtener exactamente lo que ellos desean. Ordenando defensivamente, los clientes aumentan sus órdenes acumuladas e inventarios deseados. La Figura 2 muestra los ciclos de refuerzo **(R3) Ordenar defensivamente** y **(R4) Confiabilidad en la entrega**.

Con la descripción anterior, Gonçalves refleja que el comportamiento característico de las burbujas de demanda puede ser representado por un aumento y un colapso en las órdenes, debido a la respuesta de los clientes ante un déficit en el abastecimiento. Durante el periodo inicial del déficit, los clientes sobre-reaccionan inflando la burbuja de demanda a través de un sobre-ordenamiento. Luego, tan pronto el abastecimiento se normaliza, la burbuja estalla ocasionando graves consecuencias al proveedor que queda al final con grandes pérdidas reflejadas en inventarios de producto terminado y exceso de capacidad inutilizada.

Para mostrar un mejor entendimiento de los procesos que generan las burbujas de demanda y para plantear los escenarios necesarios para realizar la experimentación, se construye a continuación un modelo matemático formal de las relaciones claves discutidas anteriormente.

### 3.2. DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES

Una vez formulado el modelo causal, se presenta el diagrama de niveles y flujos, el cual básicamente convierte un modelo abstracto en un modelo formal o un objeto matemático. Este diagrama de flujos y niveles (adaptado de Gonçalves 2003) pretende capturar la relación entre un único proveedor (vendiendo un producto único e insustituible) y múltiples clientes mayoristas. El énfasis de mi análisis es resaltar el problema de los clientes mayoristas a la hora de decidir cuántas unidades ordenar a su proveedor, basado en la demanda del cliente final. Las órdenes pendientes por entregar ( $B$ ) por parte del proveedor aumentan con las órdenes del cliente mayorista ( $O_D$ ) y disminuyen con los envíos que realiza ( $E$ )

$$\dot{B} = O_D - E \quad (1)$$

El ajuste de las órdenes de los clientes mayoristas presenta dos componentes principales: la demanda del cliente final ( $d$ ) y un término de ajuste entre el nivel deseado de órdenes pendientes por recibir ( $B^*$ ) y las órdenes reales pendientes por entregar del proveedor ( $B$ ). Este ajuste permite al proveedor ajustar sus órdenes pendientes por entregar en un tiempo ( $\tau_B$ ). Finalmente, estas órdenes de los clientes mayoristas no deben ser negativas:

$$O_D = \text{Max} \left( 0, d + \frac{B^* - B}{\tau_B} \right) \quad (2)$$

Considérese ahora el flujo de envíos ( $E$ ), el cual está determinado por capacidad disponible del proveedor ( $C$ ).

$$E = \dot{C} \quad (3)$$

Sin embargo, el ajuste en la capacidad del proveedor depende de la capacidad actual, de una capacidad deseada y de un tiempo para construir capacidad ( $\tau_C$ ). La capacidad deseada depende de la relación entre las órdenes pendientes por entregar ( $B$ ) y un tiempo de entrega deseado ( $\tau_D$ ), cómo se muestra en la ecuación 4.

$$\dot{C} = \frac{B/\tau_D - C}{\tau_C} \quad (4)$$

El nivel deseado de órdenes pendientes por recibir ( $B^*$ ) depende de la demanda del cliente final ( $d$ ) y de una función ( $f$ ) de los retrasos esperados en las entregas ( $RE$ ). Los retrasos esperados en las entregas se determinan a partir de una función ( $g$ ) de los retrasos actuales ( $RA$ ), dado por la relación entre las órdenes pendientes por entregar ( $B$ ) y los envíos ( $E$ )

$$B^* = d * f(RE) = d * g(B/E) \quad (5)$$

La función ( $f$ ) de los retrasos esperados captura el ajuste realizado por los clientes mayoristas sobre los retrasos actuales. Es decir, cuando se enfrentan con altos retrasos en las entregas, los clientes ajustan sus expectativas ( $RE$ ) por encima de los retrasos reales ( $RA$ ) de los proveedores. Mayores retrasos esperados en las entregas ( $ED$ ) que los reales ( $RA$ ) llevan a mayores órdenes pendientes por recibir ( $B^*$ ) y por lo tanto a una mayores órdenes por parte de los clientes mayoristas.

Por simplicidad, se asume que los clientes mayoristas ajustan sus expectativas en los retrasos proporcionalmente a los retrasos mostrados realmente por parte del proveedor:

$$f(x) = \alpha * g(x), \text{ donde } \alpha \geq 1 \quad (6)$$

Donde  $\alpha$  muestra la agresividad de los clientes mayoristas (directos) a la hora de realizar sus pedidos al proveedor. Finalmente, con el fin de incluir los inventarios y déficits del cliente final propongo un par de acumuladores, basados en las cantidades que el cliente final ordena al cliente mayorista y las cantidades recibidas por el cliente mayorista por parte del proveedor.

$$\dot{D}_{CF} = d \quad (7)$$

$$\dot{E}_P = E \quad (8)$$

Este modelo se enfoca en un Cadena de Abastecimiento con un proveedor vendiendo a múltiples clientes mayoristas, en el cual se observan 4 variables de estado ( $\dot{B}$ ,  $\dot{C}$ ,  $\dot{D}_{CF}$  y  $\dot{E}_P$ ). El modelo

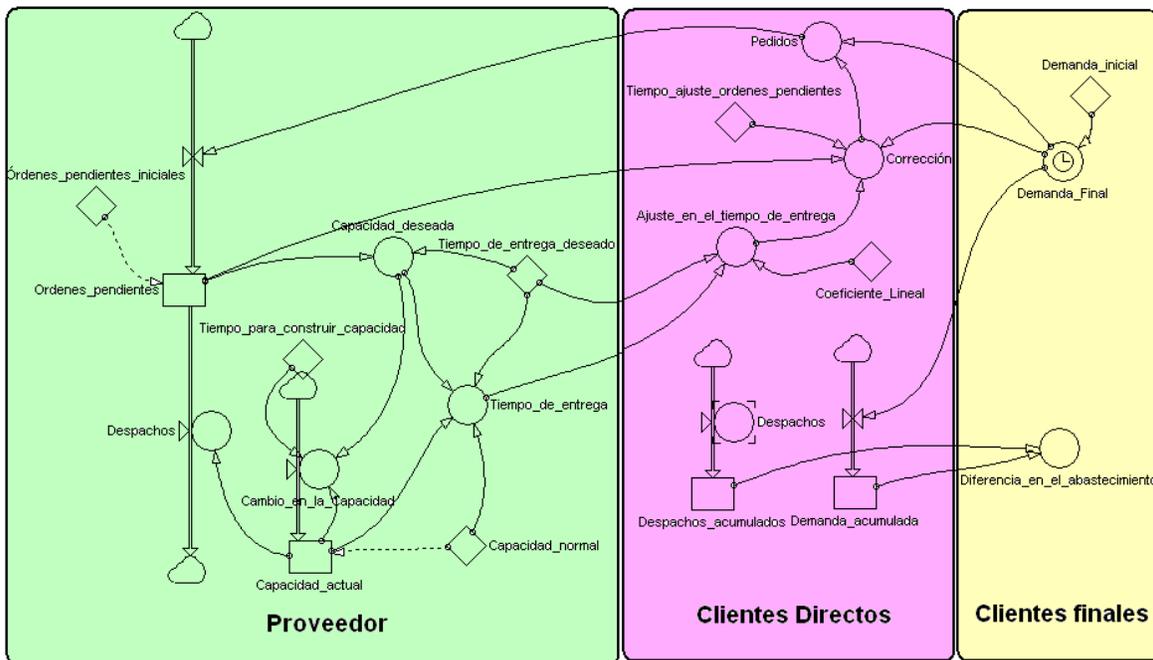
completo es capturado por un sistema de cuarto orden con ecuaciones diferenciales no lineales. Las ecuaciones generales son mostradas en las ecuaciones (9 a 12) y representadas gráficamente en la Figura 3.

$$\dot{B} = \text{Max}\left(0, d + \frac{d * g(B/E) - B}{\tau_B}\right) - \frac{B/\tau_D - C}{\tau_C} \quad (9)$$

$$\dot{C} = \frac{B/\tau_D - C}{\tau_C} \quad (10)$$

$$\dot{D}_{CF} = d \quad (11)$$

$$\dot{E}_p = E \quad (12)$$



**Figura 3** Diagrama de flujos y niveles del problema de estudio.

La Figura 3 representa el diagrama de Flujos y Niveles del modelo matemático descrito previamente. Esta figura se encuentra dividida básicamente en tres partes: Proveedor, Clientes Directos y Clientes Finales. En cada una de estas partes se agrupa las variables que están directamente implicadas en el proceso de toma de decisiones de ellas. Para el proveedor se tienen básicamente dos niveles: uno relacionado con la cantidad de órdenes pendientes por entregar al cliente directo y el otro relacionado con la capacidad de producción. En cuanto a los Clientes

Directos se cuenta básicamente con las decisiones de pedidos que se le realizan al proveedor y con la contabilización de las unidades que le fueron ordenadas y las que ellos enviaron. Finalmente, los Clientes Finales son aquellos que ponen la demanda final y quienes deben ser abastecidos.

### 3.3. RESULTADOS DEL MODELO

A partir del análisis matemático del modelo, es posible realizar simulaciones que permitan reflejar gráficamente el comportamiento de éste. Así con el fin de observar que efectivamente el modelo propuesto en la sección anterior es adecuado para reflejar el comportamiento del sistema proveedor-cliente mayorista, se simula por un periodo de 25 semanas. Inicialmente, el modelo es dejado en un equilibrio dinámico, de modo que los valores de las variables y de los flujos son constantes en el tiempo, por lo tanto las órdenes pendientes por entregar y la capacidad permanecen en sus valores iniciales. Posteriormente, se introduce un incremento del 20% en la demanda final  $d$  en el tercer periodo (Ver Figura 4) con el fin de sacar al sistema del equilibrio dinámico en el que se encontraba.

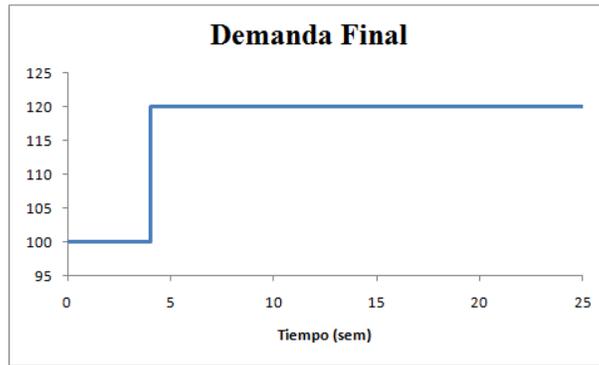


Figura 4 Demanda Final vs. Tiempo.

Bajo las condiciones inicialmente preestablecidas, la Figura 5 realiza un enfoque sobre la parte del cliente mayorista. Esta figura muestra las gráficas de pedidos realizados y de retrasos esperados en las entregas (RE) y retrasos actuales en las entregas (RA).

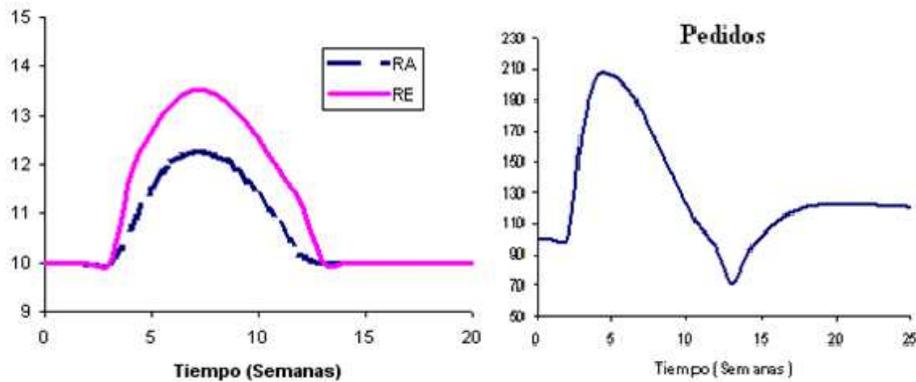
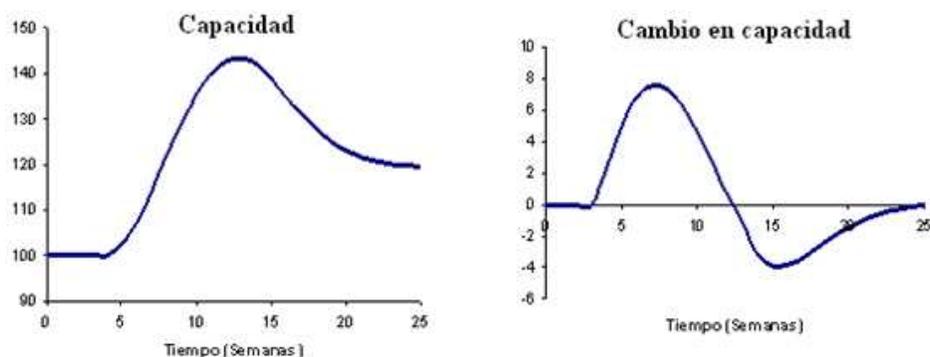


Figura 5 Retrasos y Pedidos vs. Tiempo.

Como se ilustra en esta Figura 5, ante un incremento en la demanda final, el cliente mayorista incrementa rápidamente sus pedidos al proveedor, bajo la idea de que la demanda final seguirá aumentando. Además, este cliente mayorista debido a los aumentos en sus pedidos comienza a percibir retrasos en las entregas por parte del proveedor (RA). Esto ocasiona que sus pronósticos de los tiempos para recibir sus pedidos se inflen por encima de lo que realmente es (RE), teniendo que ordenar más de lo necesario por adelantado. La Figura 6 muestra las gráficas de capacidad y cambio en capacidad del proveedor. Esta figura refleja el comportamiento del proveedor, al éste sentir que su demanda está aumentando y que está empezando a tener tiempos de retraso en sus entregas, decide invertir rápidamente en capacidad con el fin de conocer cuanto antes la demanda final. Una vez tiene suficiente capacidad para atender la demanda final, los clientes mayoristas empiezan a no inflar sus pedidos, permitiéndole al proveedor reducir nuevamente su capacidad y encontrar el valor de la demanda final.



**Figura 6** Capacidad y Cambio en Capacidad vs. Tiempo.

Este aumento y disminución de la capacidad del proveedor representa un aspecto importante del comportamiento de este tipo de sistemas. Mientras la demanda del cliente final se incrementa un 20%, los pedidos de los clientes mayoristas y la capacidad del proveedor tienen un aumento más significativo (del 100% y del 50% respectivamente, según los resultados de la simulación).

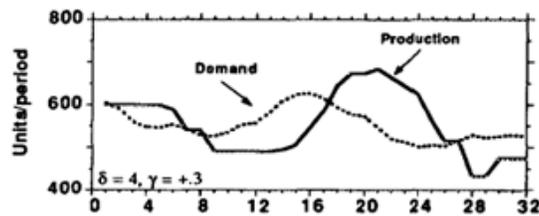
A continuación se realizan unas validaciones y unos análisis de sensibilidad sobre algunas condiciones y parámetros representativos del modelo.

### 3.4. VALIDACIÓN

Se realizan diferentes tipos de validaciones al modelo, con el fin de analizar ciertos comportamientos y condiciones que le dan robustez al modelo y por lo tanto a la etapa de experimentación. Esta validación nos permite analizar tanto la estructura como el comportamiento del modelo y así poder crear un modelo que pueda ser ajustado adecuadamente a la realidad (experimentos).

### 3.4.1. Validación del Comportamiento

Inicialmente se realiza una validación del comportamiento, para lo cual se recurre a algunos resultados obtenidos experimentalmente por Diehl y Sterman (1995). Diehl y Sterman (1995) desarrollaron unos experimentos en los cuales pretendían mostrar que las personas tienen bajos desempeños en la medida en que se enfrentan con ciclos de realimentación, retardos y no linealidades. Ellos desarrollaron unos experimentos en los cuales los sujetos manejaban un inventario, enfrentando demandas estocásticas. Como resultados de estos experimentos, analizaron el comportamiento típico del efecto látigo (Figura 7).

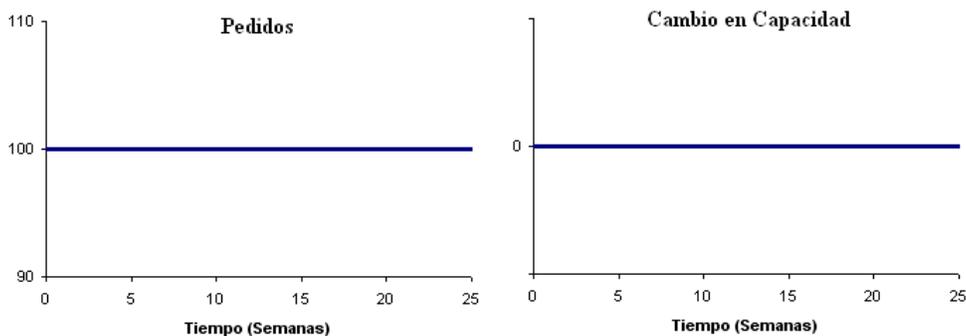


**Figura 7** Efectos de los retardos en Cadenas de Abastecimiento. *Fuente: Diehl & Sterman, 1995.*

Estos resultados, reflejan el comportamiento obtenido a partir modelo propuesto en la sección anterior. Obsérvese como un aumento en la demanda (para este caso es la del cliente mayorista), afecta la producción (capacidad) del proveedor, formando en el largo plazo la burbuja (Ver Figura 5 y Figura 6).

A continuación se hacen algunas validaciones sobre el modelo, aplicando **condiciones extremas**:

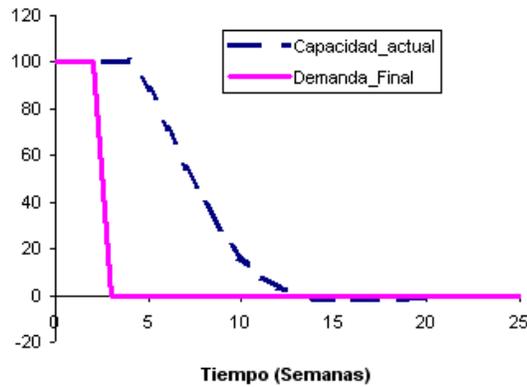
- ¿Qué pasaría si la demanda del cliente final permaneciera en 100 unds/sem?



**Figura 8** Validación con demanda final 100.

Si la demanda del cliente final nunca variara, lo que debería suceder es que el sistema siguiera estable, es decir, el cliente mayorista seguiría haciendo pedidos iguales a 100 unidades y el proveedor nunca variaría su capacidad actual, pues tendría la necesaria para cumplirle a su cliente.

- *¿Qué pasaría si la demanda del cliente final fuera cero en la semana 4?*

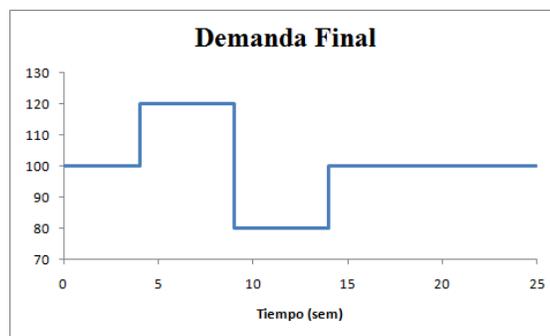


**Figura 9** Validación con demanda final cero.

Como muestra la Figura 9, si la demanda final disminuye a cero, la capacidad del proveedor se debe ir ajustando lentamente hasta alcanzar el valor de cero, ya que si no hay demanda que cumplir, no tiene sentido tener capacidad para producir.

- *¿Qué pasaría si el proveedor tiene capacidad fija y la demanda del cliente final tiene una oscilación tal como lo muestra la Figura 10?*

Del equilibrio, se introduce una modificación en la demanda del cliente final. Esta modificación es compuesta de un incremento transitorio, seguido por un descenso. En particular, la magnitud de la modificación está compuesta por un 20% de incremento temporal (realizado en el periodo 4, con una duración de 6 periodos), seguido por un descenso del 20% (comenzando en el periodo 10, con una duración de 6 periodos).

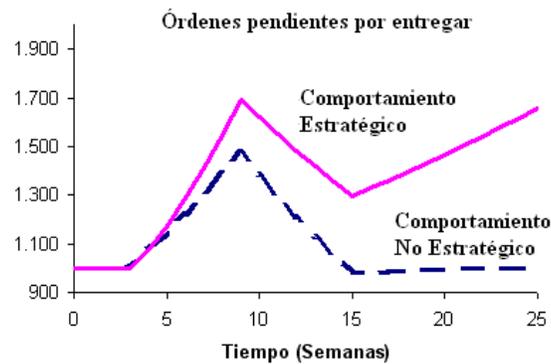


**Figura 10** Validación con demanda final oscilatoria.

Obsérvese que la duración y la magnitud de los incrementos y descensos en la demanda final son exactamente iguales, sin embargo, el comportamiento del sistema va a depender de si el cliente mayorista asume una posición estratégica o no.

Si el cliente mayorista asume un comportamiento *no estratégico* ante el déficit que perciba inicialmente, es decir, si el cliente mayorista está simplemente ajustando sus pedidos de acuerdo con la línea de abastecimiento y los retrasos en las entregas reales (RA) que perciba, el sistema debería de retornar a la posición de equilibrio. De este modo, si los clientes mayoristas no sobre-reaccionan durante el periodo de déficit, el periodo de exceso es exactamente suficiente para no desequilibrar el sistema (Figura 11).

Por otra parte, cuando los clientes mayoristas asumen una posición *estratégica* (como la representada en el modelo matemático expresado anteriormente), el comportamiento del ciclo de refuerzo (R1, *Ordenar por adelantado*) domina el comportamiento del sistema. Así ante un déficit temporal, el cliente mayorista continúa inflando sus órdenes (incrementando las órdenes pendientes por entregar del proveedor), lo cual lleva al sistema a un punto inestable, lo que ocasionaría altos retrasos en las entregas y altas ordenes pendientes por entregar por parte del proveedor, produciendo a largo plazo, la necesidad del proveedor de invertir innecesariamente en capacidad (Figura 11).



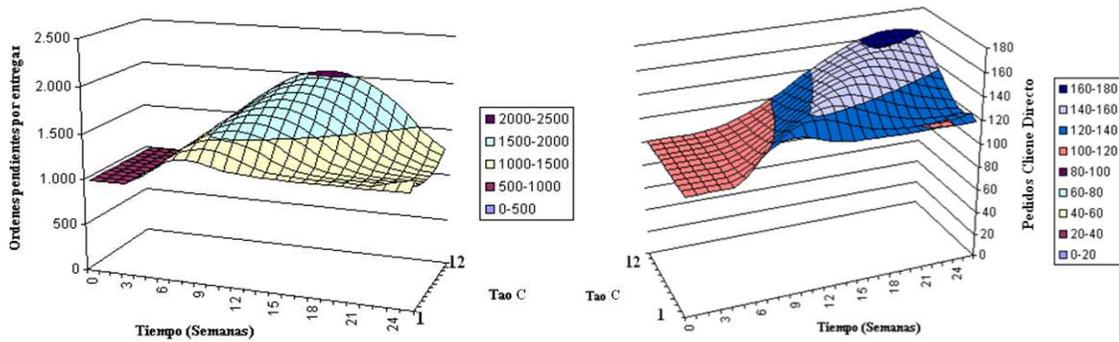
**Figura 11** Órdenes pendientes por entregar vs. Tiempo.

A continuación se realiza una investigación sobre los impactos de los principales parámetros del modelo.

### 3.4.2. Análisis de Sensibilidad de los Parámetros

- *Tiempo para construir capacidad  $\tau_c$*  :

En primer lugar, se analiza el comportamiento del modelo bajo diferentes valores en el tiempo de adquisición en capacidad por parte del proveedor. Los valores analizados van desde 1 periodo hasta 12 periodos. La Figura 12 muestra el comportamiento de los pedidos de los clientes mayoristas y de las órdenes pendientes por entregar del proveedor.

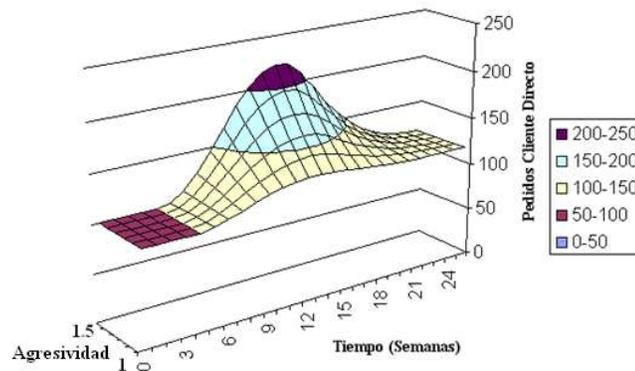


**Figura 12** Órdenes pendientes por entregar y Pedidos Cliente mayorista vs. Tiempo vs. Tao C.

Mayores tiempos para la adquisición de capacidad llevan a que el cliente mayorista tenga que inflar mucho sus pedidos y por lo tanto el proveedor enfrente unos déficits excesivos. Estos resultados sugieren que la habilidad del proveedor para adquirir capacidad rápidamente, reduce el tamaño de la burbuja y la duración del problema.

- *Agresividad en los pedidos del cliente mayorista:*

Ahora se analiza el efecto de la agresividad del cliente mayorista al percibir aumentos en los tiempos de entrega por parte del proveedor. Clientes mayoristas no estratégicos simplemente ajustan sus pedidos en proporción con el incremento de los retrasos en las entregas ( $\alpha = 1$ ). La Figura 13 muestra el efecto que tiene esta agresividad en la forma como los clientes mayoristas inflan sus pedidos. Se muestran diferentes valores de  $\alpha$ , desde 1 hasta 1.5.

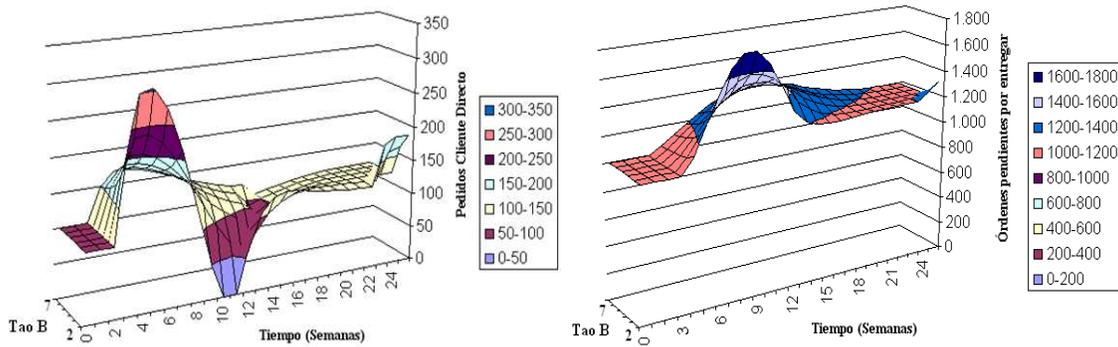


**Figura 13** Pedidos Cliente mayorista vs. Tiempo vs. Agresividad.

Esta figura representa la decisión individual de los clientes mayoristas como respuesta a los retrasos de sus pedidos. Bajo estas condiciones el proveedor debería enfocarse en manejar adecuadamente la agresividad de sus clientes, con el fin de prevenir reacciones más agresivas en otros clientes. Es decir, respuestas más agresivas pueden ser obtenidas en ambientes más competitivos, en los cuales se espera a que el tamaño de la burbuja sea mucho más pronunciada. De este modo dar prioridad a los clientes de mayor tamaño o limitar el número de clientes mayoristas (menor competencia), ayudan al proveedor a reducir posibles inflaciones que ocurran.

- *Tiempo para que los clientes mayoristas perciban los retrasos en las entregas ( $\tau_B$ ):*

Se analiza el impacto de la cantidad de tiempo que toma a los clientes mayoristas percibir los retrasos. El modelo es analizado bajo diferentes tiempos  $\tau_B$  (desde 2 hasta 7 periodos). La Figura 14 muestra los resultados.



**Figura 14** Pedidos Cliente mayorista y Órdenes por entregar vs. Tiempo vs. Tao B.

Como muestra la Figura 14 el sistema es más estable cuando los clientes mayoristas enfrentan largos tiempos en percibir los déficits del proveedor. Es decir, si los clientes perciben tarde el retardo actual, sus reacciones también estarán retardadas en el sistema y cuando el cliente sobreordene, el proveedor habrá tenido cierto tiempo en conocer la órdenes previas (reales) de su cliente mayorista. Por lo tanto podrá tomar mejores decisiones de inversión en capacidad y el sistema será más estable. Analíticamente, mayores tiempos en la percepción de estos retrasos disminuyen la ganancia del ciclo de refuerzo (R1) que genera la burbuja, disminuyendo así la inestabilidad en la cadena.

## 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Con el fin de conocer la forma cómo las personas toman decisiones en el tipo de la cadena de abastecimiento en estudio, se elabora un procedimiento experimental. Los experimentos están diseñados con el fin de explorar dos características básicas, identificadas previamente por Gonçalves (2003) y Gonçalves & Arango (2010), de las Cadenas de Abastecimiento.

- Retardos entre el momento en que el cliente mayorista pone una orden y el momento en que esta es recibida por el proveedor.
- Retardos en la adquisición de capacidad por parte del proveedor.

El estudio de estas características permite conocer, comparar y comprender las decisiones de las personas, al enfrentarse a estructuras un poco diferentes entre sí (escenarios). Estas diferentes estructuras afectan el desempeño de las decisiones de los clientes mayoristas (directos) y por lo tanto de la cadena.

Para analizar la influencia de estas variables se diseñó un experimento de una Cadena de Abastecimiento caracterizada por tener un único proveedor quien vende un producto insustituible a múltiples clientes mayoristas. En el experimento se analiza el comportamiento de las personas a la hora de asumir el rol de Clientes mayoristas. El experimento posee un diseño factorial con cuatro casos diferentes, teniendo en cuenta los retardos en cambio en capacidad (Corto = 1 y Largo= 3) y los retardos de las decisiones de los pedidos realizados por los clientes mayoristas (Corto = 2 y Largo = 3). La Tabla 1 especifica todos los casos desarrollados en el experimento. Obsérvese que la diferencia entre cada uno de los caso es leve, pero permite identificar posibles variaciones en el comportamiento de las personas y obtener una mejor comprensión de éstos.

**Tabla 1** Casos Experimentales.

		<b>Retardos en las decisiones de los clientes mayoristas</b>	
		2	3
<b>Retardos en invertir en capacidad <math>\tau_C</math>(semanas)</b>	1	T1 (N=15)	T3 (N=15)
	3	T2 (N=15)	T4 (N=15)

El experimento es realizado por tiempo de simulación de 35 periodos (semanas), en el cual se toman decisiones semana a semana. La decisión de los sujetos es definir cuántas unidades ordenar a su proveedor, con el fin de cubrir toda la demanda de sus clientes. Las decisiones que los sujetos toman, son recibidas por su proveedor a los dos (tres) periodos siguientes de realizada la orden y son acumuladas en un canal de órdenes pendientes. La capacidad inicial de producción del

proveedor era de 100 unidades por semana, sin embargo, el tiene la opción de cambiar su capacidad según la órdenes que los sujetos le realice, a mas órdenes mayor inversión en capacidad. El tiempo de construcción de capacidad del proveedor es de una (o tres) semana (s). En caso de que el proveedor no tenga la capacidad suficiente para satisfacer las necesidades del cliente mayorista, este empieza a tener retrasos en las entregas de los pedidos y por lo tanto los sujetos (cliente mayorista) también les incumplirán a sus clientes finales. Todo esto lleva, claramente, a que el desempeño de los sujetos no sea el adecuado y se aleje del nivel de referencia encontrado.

El desempeño de los sujetos, se calcula por medio de los costos totales acumulados. Los costos en que ellos incurren cada semana tienen dos componentes:

1. *Costo por Ordenar (CO):*

$$CO = \frac{1 * (\text{Decisión Pedidos})^2}{1000} \quad (13)$$

2. *Costo por Déficit o Inventario (CD):*

$$CD = \frac{2 * (\text{Déficit})^2}{1000} \quad (14)$$

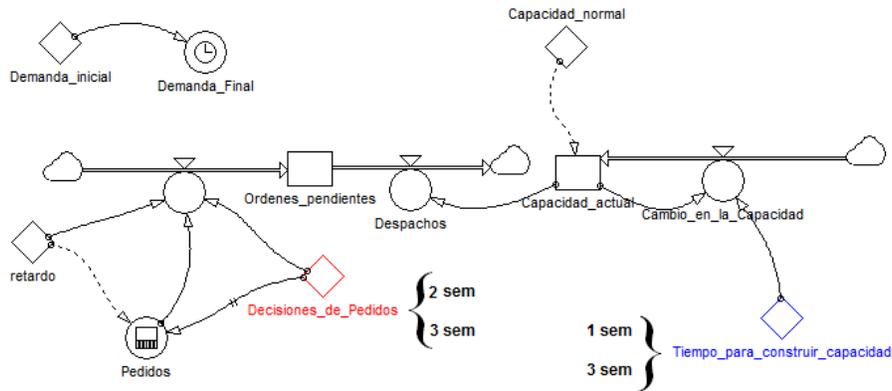
De esta manera, el costo total acumulado CTA (o en otras palabras **la función objetivo que se desea minimizar**) en los que se incurre en la experimentación es la suma de estos costos en toda la simulación, así:

$$CTA = \sum_{t=1}^T (CO_t + CD_t) \quad (15)$$

Inicialmente, los sujetos ordenan 100 unidades por semana, durante las tres primeras semanas como periodo de aprendizaje, luego los sujetos deciden libremente cuántas unidades ordenar a su proveedor (mayores o iguales a cero) basados en sus condiciones actuales, en la demanda del cliente final y en el cumplimiento en las entregas por parte del proveedor. Como se describe en el modelo, los sujetos (clientes mayoristas) enfrentan un incremento de un 20% en su demanda y es con lo cual deben combatir a lo largo de la simulación (Ver Apéndice 2)

El modelo experimental es representado por modelo de Dinámica de sistemas, como es mostrado en la Figura 15, obsérvese que no existen estructuras de realimentación que alimenten las decisiones de pedidos que van a realizar los sujetos (clientes mayoristas), debido a que este es el comportamiento

que se desea conocer. Además se indican las variaciones que se realizan para obtener cada uno de los casos de estudio (Ver parámetros: Decisiones de pedidos y tiempo para construir capacidad).



**Figura 15** Modelo y casos experimentales.

#### **4.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Los experimentos planteados han considerado las bases usadas en economía experimental y el protocolo estándar de la metodología (Friedman & Sunder, 1994; Friedman & Cassar, 2004). Los sujetos fueron reclutados de una misma población de estudiantes de cuarto y quinto año de los programas de Ingeniería Industrial, administrativa y economía de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, durante el segundo semestre de 2010. Cada uno de los estudiantes utilizados en la experimentación no tenía experiencia previa en ningún tipo de experimento relacionado. A cada uno de los participantes se les informó que recibirían un pago de Col\$10.000 por el simple hecho de participar y que recibirían adicionalmente un pago variable (entre Col\$0 y Col\$30.000) dependiendo del desempeño que tuvieran en la simulación.

Una vez los estudiantes se encontraban en el entorno del laboratorio, se les asignaron unas hojas de instrucciones, las cuales describían adecuadamente el sistema de producción en estudio, las decisiones y el objetivo del juego (Ver Apéndice 2). A los participantes se les permitía realizar preguntas tanto de las instrucciones como de la interfaz, con el fin de que toda la información fuera conocida para todos los participantes.

Los experimentos fueron realizados en el software de simulación Powersim Constructor 2.51®, el cual corre automáticamente y guarda los históricos de las variables de interés, incluyendo las decisiones de los sujetos (Ver Apéndice 1). Sin embargo, también se les solicitó a los sujetos que escribieran en una hoja de papel cada una de las decisiones que tomaran, esto con el fin de tener un respaldo físico de las decisiones.

El experimento fue corrido por alrededor de una hora y cada uno de los estudiantes fue informado previamente de esta duración, además se les garantizó que sus recompensas fueran mayores que sus

costos de oportunidad en Colombia, esto con el fin de inducir en ellos un comportamiento adecuado.

#### **4.2. RECOMPENSA MONETARIA**

La recompensa monetaria dada a los sujetos es estimada como sigue:

$$Recompensa[\$] = 1000 * R_{max} * \frac{1}{1 + K * R_{min}^{CTA}} \quad (15)$$

Donde K es un parámetro de ajuste para cada uno de los casos, Rmax y Rmin son las recompensas máximas y mínimas estimadas para el desarrollo de los experimentos, y CTA son los costos totales acumulados obtenidos por cada uno de los sujetos en el desarrollo de los experimentos.

De este modo, los costos experimentales serían:

Número de casos experimentales: 4

Número de sujetos por caso de estudio: 17

Recompensa monetaria Promedio: \$25.000

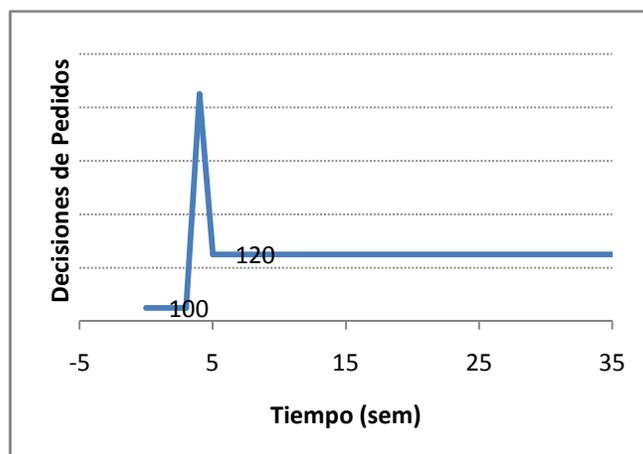
#### **4.3. NIVELES DE REFERENCIA**

Dados los diferentes casos de estudio, es importante determinar un nivel de referencia que permita saber que tan buenos son los resultados obtenidos por cada uno de los participantes a lo largo del experimento. Por lo tanto, se requiere encontrar una trayectoria de decisiones que *minimice* los costos acumulados asumidos por el cliente mayorista a lo largo de la simulación (minimizar la función objetivo: ecuación 15).

El nivel de referencia de las decisiones de órdenes de los clientes mayoristas fue estimado usando un algoritmo genético (Método de búsqueda evolutiva). Este método evolutivo es un proceso de búsqueda constante de los objetivos, donde las mejores soluciones de una simulación determinada son utilizadas como puntos de partida para la siguiente simulación. Este es un método adecuado, debido a que existen grandes dependencias entre las variables objetivo y las variables de entrada al modelo.

Con el fin de obtener mejores resultados, el modelo de simulación fue corrido muchas veces, variando las condiciones iniciales y las propiedades de la búsqueda. Este proceso no garantiza una trayectoria de decisiones óptima, pero permite una buena solución que sirva para determinar el nivel de referencia para estudiar los experimentos desarrollados.

Posteriormente, una vez encontrada esta solución dada por el método de la búsqueda evolutiva, se suaviza la solución encontrada para cada caso de estudio. Esto con el fin de reducir los efectos del ruido y los problemas de cola al final de la simulación.



**Figura 16** Nivel de referencia para las decisiones de pedidos del cliente mayorista.

La Figura 16 muestra el comportamiento que tiene la trayectoria de decisiones que minimiza los costos acumulados para cada uno de los cuatro casos de estudio. Esta regla de decisión es caracterizada por un alto valor en la decisión de pedidos, por parte del cliente mayorista, en el periodo cuarto; seguido por una decisión constante durante el resto de periodos de 120 unidades por semana.

De este modo, los costos totales acumulados obtenidos como nivel de referencia para cada uno de los casos de estudios, se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2** Niveles de Referencia.

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
<b>Nivel de Referencia (\$)</b>	\$632,34	\$699,69	\$679,49	\$766,25

Una vez conocida y ejecutada la metodología para el desarrollo de los experimentos que envuelven esta tesis y habiendo determinado un nivel de referencia a partir de las técnicas de la programación matemática, se procede ahora a analizar los resultados de la experimentación, con el fin de dar respuesta a los objetivos que se plantearon inicialmente.

## 5. RESULTADOS

A continuación se presentan los principales resultados de las decisiones tomadas por los sujetos, en el desarrollo de los cuatro casos experimentales. Cabe resaltar que para todo el análisis de los resultados se tuvo en cuenta un total de 15 (de un total de 17) experimentos por caso de estudio. Estos resultados fueron seleccionados basados en una regla estadística (método de la varianza), la cual excluye aquellas observaciones que son numéricamente distantes del resto de los datos. Estas exclusiones se realizan a partir de un análisis de residuales y determinando que valores se encuentran a más de dos desviaciones estándar de la media (Ver apéndice C para conocer el criterio de selección).

En este capítulo, inicialmente, se presentan los resultados de las decisiones a lo largo de la simulación; luego, el desempeño que tuvieron los sujetos comparados con el nivel de referencia y finalmente la evidencia del efecto látigo ocasionado por las decisiones de los sujetos y la estructura del sistema.

### 5.1. COMPORTAMIENTO DE LAS DECISIONES DE LOS SUJETOS

Para la toma de decisiones de los sujetos, ellos fueron informados de la estructura del sistema, los retardos y las diferentes causas por las cuales se incurren en costos; luego se les solicitó que tomaran decisiones de pedidos a su proveedor con el objetivo de minimizar los costos acumulados al final de la simulación. La Figura 17 muestra el comportamiento para cuatro sujetos seleccionados (uno para cada caso) los cuales capturan el comportamiento típico en cada uno de los casos.

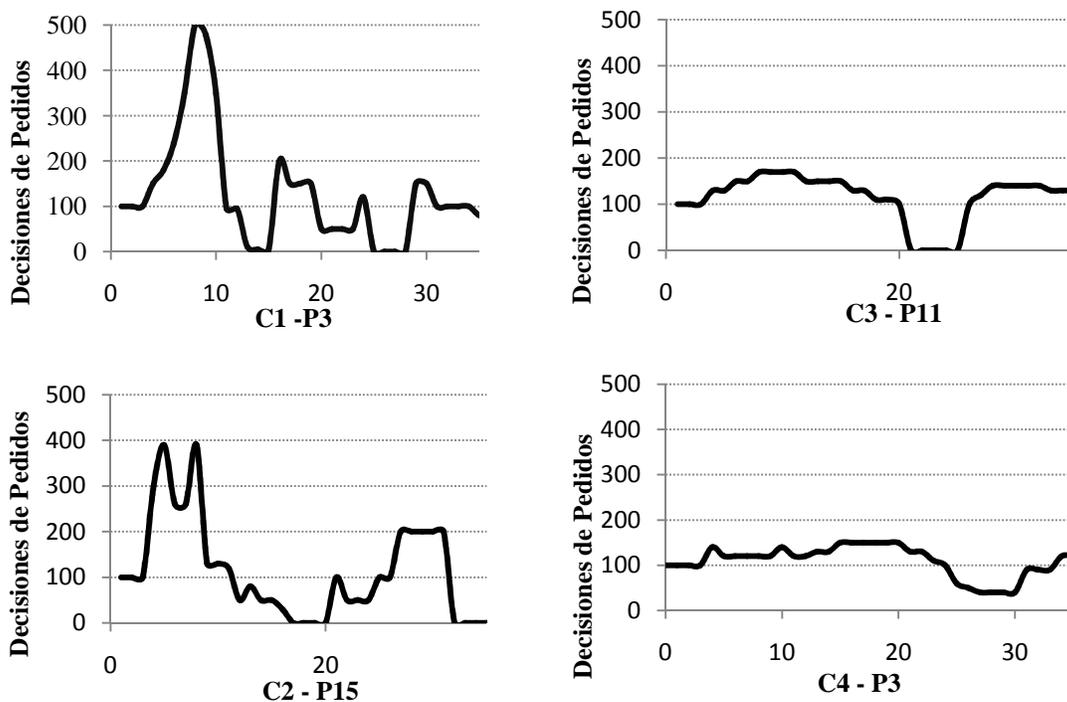
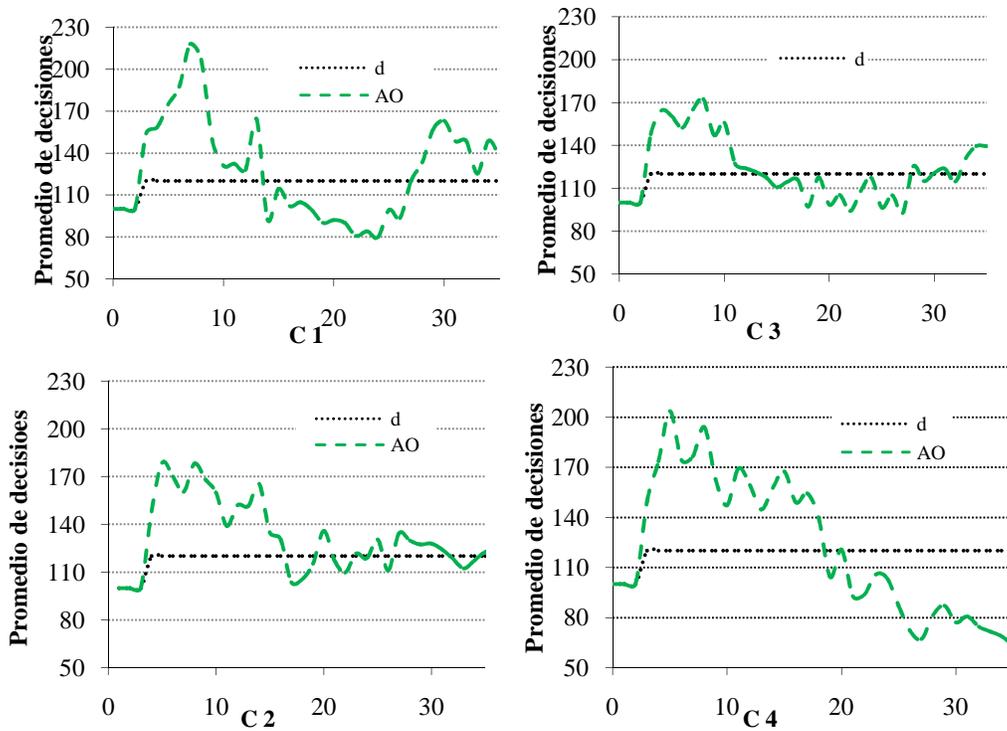


Figura 17 Resultados típicos experimentales ( $P_i$  indica el número de jugador y  $C_i$  el caso).

En general, los resultados de un mismo caso y entre diferentes casos muestran un patrón de comportamiento común: una vez los sujetos perciben el incremento en la demanda final, inflan (por encima de 120 unds/sem) sus órdenes al proveedor; posteriormente se observa una reducción (por debajo de 100 unds/sem) de las órdenes con el propósito de encontrar un equilibrio cercano a 120 unds/sem (demanda final)

La figura 5 además muestra que los sujetos en los C1 y C2 inflan sus pedidos por menos cantidad de periodos durante la simulación (alrededor de 10 semanas), lo cual ocasiona que las personas vayan alcanzando buscando alcanzar la demanda final en menos tiempo. Por otra parte, en los C3 y C4, los sujetos enfrentan mayores retardos en sus sistemas provocando que los periodos de sobreordenamiento se dé por mayor cantidad de periodos durante la simulación, lo cual les lleva a tener más dificultades para alcanzar la demanda final y por lo tanto mayores inestabilidades y mayores costos acumulados.

Con el fin de evaluar gráficamente el comportamiento global de los sujetos y dejar de lado las particularidades de cada caso de estudio, se grafican los promedios de las decisiones de los sujetos para cada caso (Ver Figura 18). Estos se comparan con la demanda final, la cual es el nivel de referencia para saber que tanto se inflaron las órdenes de los sujetos. Los resultados promedio permiten observar lo discutido previamente, obsérvese que en promedio la primera reacción de los sujetos es realizar pedidos por encima de la demanda percibida y luego realizar pedidos por debajo de esta con el fin de encontrar un equilibrio a lo largo del tiempo. Además también se observa que en los casos con mayor valor en los retardos (C3 y C4) genera inestabilidades y oscilaciones con una longitud mayor comparada con el caso más sencillo (C1).



**Figura 18** Demanda Cliente final (*d*) y Decisiones promedio (*AO*) para cada caso.

## 5.2. DESEMPEÑO DE LOS SUJETOS

El principal objetivo de los sujetos en el experimento es minimizar los costos totales acumulados a lo largo de la simulación. Es relevante comparar los costos obtenidos con los de los niveles de referencia mostrados en capítulos anteriores, ya que permite dar una idea de que tan buenos (o malos) son los resultados de las personas. La Tabla 3 muestra el desempeño de cada uno de los participantes analizados, los costos promedio y el nivel de referencia para cada caso de estudio.

**Tabla 3** Costos acumulados, promedios y de referencia para cada caso.

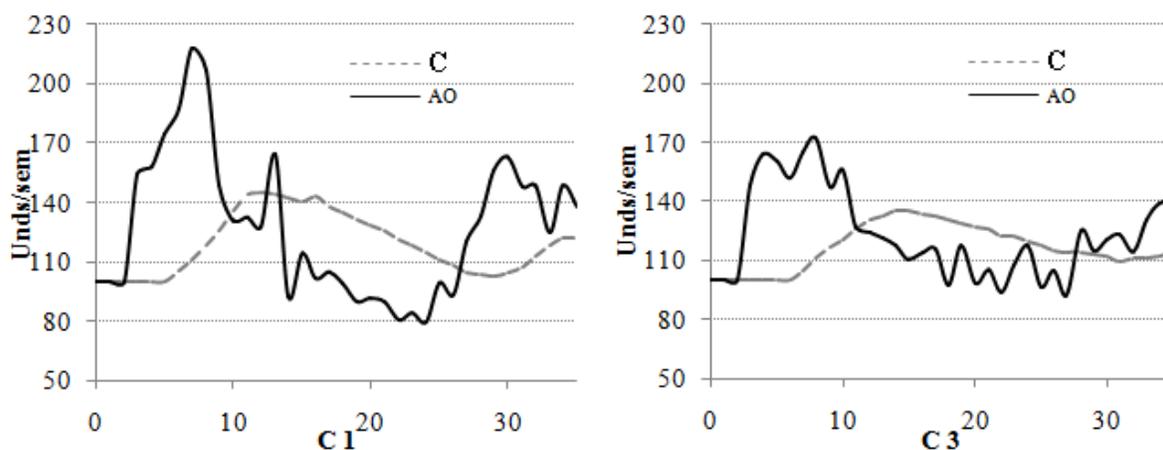
<b>Sujeto</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>P1</b>	\$2.331,95	\$3.243,45	\$1.285,69	\$41.569,73
<b>P2</b>	\$16.186,75	\$1.313,24	\$6.349,57	\$1.576,23
<b>P3</b>	\$17.921,82	\$6.806,07	\$1.439,31	\$1.976,48
<b>P4</b>	\$3.995,25	\$3.017,32	\$2.441,01	\$19.297,83
<b>P5</b>	\$845,6095	\$878,90	\$8.854,54	\$12.619,97
<b>P6</b>	\$3.834,15	\$899,15	\$1.407,55	\$37.655,30
<b>P7</b>	\$6.805,24	\$14.624,58	\$2.086,54	\$30.220,81
<b>P8</b>	\$25.358,16	\$854,73	\$3.946,30	\$4.258,17
<b>P9</b>	\$4.056,73	\$10.944,48	\$2.410,65	\$2.214,28
<b>P10</b>	\$1.664,46	\$2.438,42	\$2.958,85	\$1.403,54
<b>P11</b>	\$1.511,78	\$1.002,29	\$1.202,67	\$2.294,44
<b>P12</b>	\$1.193,47	\$46.973,16	\$1.106,48	\$2.649,15
<b>P13</b>	\$4.790,34	\$2.792,65	\$885,04	\$13.445,40
<b>P14</b>	\$805,8646	\$7.144,60	\$961,68	\$35.200,88
<b>P15</b>	\$27.068,96	\$5.362,77	\$1.719,34	\$1.388,21
<b>Promedio</b>	\$7.891,37	\$7.219,72	\$2.603,68	\$13.851,36
<b>Min</b>	\$805,86	\$854,73	\$885,04	\$1.388,21
<b>N. Referencia</b>	\$632,34	\$699,69	\$679,49	\$766,25

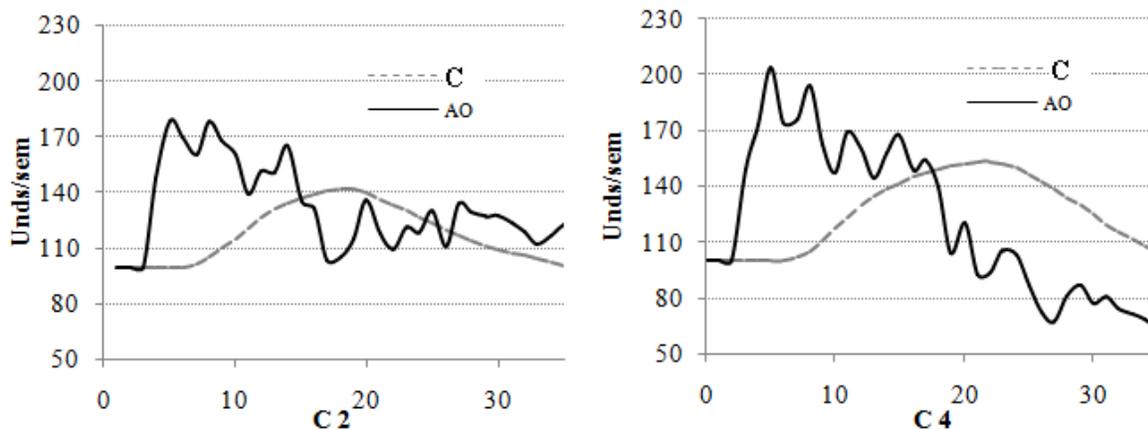
Una visión general de los resultados muestra que la mayoría de los sujetos se desempeña lejos del nivel de referencia. Así por ejemplo, el menor costo acumulado alcanzado por uno de los sujetos es un 22% mayor que el nivel de referencia, el cual es alcanzado por el sujeto P8 en el caso C2. Por otra parte, los mejores desempeños observados en cada uno de los otros tres casos eran 27% (C1), 30% (C3) y 81% (C4) mayores que el nivel de referencia de cada caso. Por otra parte, los costos promedio varían entre un 400% y un 1800% mayores que los niveles de referencia.

Como muestra la Tabla 3, el menor valor obtenido para los niveles de referencia es el arrojado en el Caso 1 (\$632.34) y el mayor valor se da en el Caso 4 (\$766.25). Estos resultados reflejan el aumento en la dificultad en el sistema de experimentación a medida que aumentan los valores de los tiempos de retardo. Este análisis también aplica para el caso de los resultados de los sujetos: los costos acumulados de los sujetos en Casos más sencillos (retardos más cortos) son menores que aquellos obtenidos en los más complejos (retardos más largos). Por ejemplo, en los C1, C2 y C3 la mayoría de los costos acumulados son menores a \$10.000, mientras que para el C4 se tienen algunos valores que inclusive superan la barrera de los \$20.000.

### 5.3. EVIDENCIA DEL EFECTO LÁTIGO

La Figura 19 muestra para cada uno de los Casos tanto la evolución de las decisiones promedio de los sujetos como la capacidad de producción que tiene el proveedor periodo a periodo. El comportamiento de las cuatro gráficas muestra como el aumento en un 20% la demanda del cliente final conllevan a que los clientes mayoristas realicen órdenes que sobrepasan la capacidad del proveedor. Posteriormente, el proveedor construye más capacidad con el objetivo de compensar el incremento percibido en la demanda. La capacidad del proveedor continúa creciendo, sobrepasando inclusive la demanda del cliente final (120 unds), debido a que esta capacidad es insuficiente como para alcanzar las órdenes que recibe de los clientes mayoristas.





**Figura 19** (C) Capacidad del Proveedor y (AO) Decisiones promedio por caso.

Cuando los envíos del proveedor (Capacidad) son tan grandes como las órdenes de los clientes mayoristas, la capacidad de producción del proveedor alcanza su máximo. Más o menos alrededor de este máximo, los clientes mayoristas responden realizando una reducción en sus órdenes, las cuales llegan a estar inclusive por debajo de la demanda final. Esto muestra la evidencia del efecto látigo en las Cadenas de Abastecimiento (Figura 7) y más específicamente en los experimentos de laboratorio desarrollados (Figura 19).

Una vez analizado gráficamente los resultados de las decisiones de las personas, se procede a buscar unas reglas de decisión que permitan dar una explicación de cómo las personas toman sus decisiones de pedidos al proveedor a la hora de enfrentar un déficit. Para esto se recurre al uso de teorías de la toma de decisiones y la racionalidad limitada, profundizadas a través de una herramienta como la econometría.

## 6. MODELAMIENTO DE REGLAS DE DECISIÓN

Dada la cualitativa similaridad de los resultados en cada uno de los experimentos y al análisis previo de su comportamiento, pasamos a explorar el posible ajuste de una regla de decisión (Sternan, 1989<sup>a</sup>). Por esta razón, basado en el modelo matemático (heurístico) discutido en el Capítulo 2, se propone una regla de decisión para la toma de decisiones de los clientes mayoristas basados en: la demanda ( $d$ ), las órdenes recibidas por el cliente mayorista ( $C$ ) y por un ajuste entre el nivel deseado de órdenes pendientes por recibir ( $B^*$ ) y las órdenes reales pendientes por entregar del proveedor ( $B$ ), tal y como se muestra en la ecuación 2 (Gonçalves 2003 y Gonçalves & Arango 2010).

Partiendo de la ecuación 2 y teniendo en cuenta la hipótesis planteada en el modelo (Ecuaciones 1 a 6) y agrupando términos semejantes, es posible obtener un modelo lineal (Ecuación 16) que pretenda explicar las decisiones:

$$DP = \left( d + \frac{\alpha^* d^* \tau_D}{\tau_B} \right) - \left( \frac{\alpha^* d^* \tau_D}{\tau_B^* N_C} \right) C + \left( \frac{\alpha^* d - N_C}{\tau_B^* N_C} \right) B \quad (16)$$

Dónde  $N_C$  es la capacidad de producción del proveedor al inicio de la simulación. De este modo, se tiene un modelo lineal que puede ser analizado econométricamente.

Este modelo será analizado utilizando dos métodos diferentes: primero, se utilizará una estimación por mínimos cuadrados, el cual es un método que permite estimar los parámetros desconocidos en un modelo de regresión lineal; y segundo se agruparan los datos del experimento como un panel, esto con la idea de mejorar la eficiencia de las estimaciones y de la representatividad de la regla de decisión. Este método permite realizar estimaciones y comparaciones entre los sujetos de un mismo caso de experimento y entre diferentes casos.

### 6.1. ANÁLISIS DE MÍNIMOS CUADRADOS

El modelo obtenido en la ecuación número 16 puede ser reescrito como:

$$DP_{(t,j)} = \beta_{(0,j)} + \beta_{(1,j)} C_{(t)} + \beta_{(2,j)} B_{(t)} + \varepsilon_{(t,j)} \quad (17)$$

Donde  $\beta_{(i,j)}$  representa el  $i$ -ésimo coeficiente para el caso  $j$  ( $i = 1, 2, 3$  y  $j = 1, 2, 3, 4$ ) y  $\varepsilon_{(t,j)}$  es el término de error. De acuerdo con la formulación de esta regla de decisión, se esperaría que el coeficiente  $\beta_{(0,j)}$  tenga un valor alrededor de 120, que  $\beta_{(1,j)}$  que sea un valor menor que cero y que  $\beta_{(2,j)}$  sea positivo. Los coeficientes  $\beta_{(1,j)}$  y  $\beta_{(2,j)}$  pretenden reflejar la influencia que tienen la capacidad del proveedor y las órdenes pendientes por recibir en la toma de decisiones de pedidos por parte del cliente mayorista. Así, de acuerdo con la regla de decisión mostrada en la ecuación 16, estimaciones (matemáticas) para los coeficientes son mostradas en la Tabla 4. Para estas estimaciones se tuvieron en cuenta los valores de equilibrio para los parámetros que así lo requerían ( $\tau_D=10$ ,  $N_C=100$  y  $d=120$ ).

**Tabla 4** Estimación matemática de los coeficientes.

$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$
360,00	-2,40	0,073

Para cada uno de los individuos, se utilizó el análisis de mínimos cuadrados (usando el software R) para analizar el ajuste de los parámetros al modelo propuesto. La Tabla 5 muestra:

1. Las estimaciones de los  $\beta_{(i,j)}$  para cada sujeto.
2. Las estimaciones para los  $\beta_{(i,j)}$  después de realizar el experimento utilizando las decisiones promedio obtenidas en cada caso.

3. Los valores promedio de los  $\beta_{(i,j)}$  para todos los sujetos que tienen alta significancia.
4. Los valores de los  $r^2$  para todas las regresiones realizadas.

A priori, cómo se había mencionado, se espera que  $\beta_{(1,j)}$  tenga valores negativos y  $\beta_{(2,j)}$  sea positivo. Se podría analizar estos parámetros matemáticamente; sin embargo, estos resultados son intuitivos: pequeños valores en las órdenes recibidas por parte del proveedor indican la necesidad de incrementar el valor de las órdenes; por lo tanto  $\beta_{(1,j)}$  debería ser negativo. Por otra parte, altos valores de las órdenes pendientes por recibir (B) indican problemas en los envíos por parte del proveedor, por lo tanto el cliente mayorista debería incrementar sus órdenes ( $\beta_{(2,j)}$  positivo).

**Tabla 5** Estimación de los coeficientes para cada sujeto en cada caso.

Sujeto	Caso 1				Caso 2			
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r^2$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r^2$
1	120,00†	0†	0†	0,49	150,91†	2,57†	0,21†	0,26
2	51,82	-2,72†	0,31†	0,18	235,50†	-2,17†	0,13†	0,74
3	152,33†	-3,35†	0,30†	0,18	176,03†	-2,62†	0,22†	0,20
4	158,21†	-8,01†	0,77†	0,60	411,27†	-2,95†	0,02	0,21
5	399,56†	1,24	-0,35†	0,60	300,41†	-1,45†	0,01	0,72
6	213,21†	-1,57	0,06	0,02	246,57†	-1,28†	0,03	0,50
7	86,56†	-9,09†	0,93†	0,71	342,49†	-2,06†	0,02†	0,69
8	200,65†	-1,00	0,04	0,02	269,08	1,59	0,35†	0,11
9	149,31†	-5,85†	0,55†	0,31	428,02†	-1,99†	-0,04†	0,89
10	238,34†	0,11	-0,11	0,05	267,14†	-3,89†	0,25†	0,56
11	147,57†	0,09	-0,03	0,06	199,24†	-0,79	0,02	0,25
12	86,49	-8,61†	0,89†	0,76	178,31†	-3,20†	0,29†	0,62
13	19,83	-1,39	0,25	0,72	181,57†	-3,26†	0,28†	0,38
14	209,31†	-0,48	-0,02	0,01	-50,04	1,97	-0,06	0,00
15	276,87†	-4,11†	0,33†	0,20	189,95†	-2,45†	0,18†	0,21
<b>Promedio - sign</b>	157,22	-6,08	0,53	0,42	238,88	-2,69	0,17	0,51
<b>Usando decisiones promedio</b>	204,29†	-6,61†	0,59†	0,59	244,74†	-1,99†	0,11	0,65

Sujeto	Caso 3				Caso 4			
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	r2	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	r2
1	221,21†	-4,43†	0,36	0,15	407,04†	0,21	-0,12†	0,89
2	397,79†	0,52	-0,21†	0,51	143,26†	2,48†	0,24	0,27
3	278,59†	-0,29	-0,07	0,04	283,51†	-3,68†	0,22†	0,62
4	196,76†	1,66	-0,24	0,00	50,69	-3,66†	0,40†	0,78
5	78,39†	-8,06†	0,83†	0,55	285,54†	-2,24†	0,14†	0,15
6	493,60†	-3,08†	-0,02†	0,72	258,51†	-2,17†	0,15†	0,14
7	212,80†	-1,09	0,01	-0,03	221,68†	-3,25†	0,25†	0,34
8	177,36†	-7,46†	0,72†	0,28	108,62†	-2,22†	0,23†	0,30
9	213,39†	-3,65†	0,29†	0,13	255,72†	-0,55	-0,06	0,57
10	180,94†	-2,47†	0,17	0,08	124,97†	-1,09	0,08	0,01
11	204,84†	-6,43†	0,56†	0,51	111,33†	1,01	-0,09	0,01
12	159,97†	1,34†	-0,16†	0,35	195,81†	-4,31†	0,38†	0,57
13	203,33†	-5,57†	0,49†	0,44	140,76†	-1,75†	0,15†	0,08
14	301,77†	-3,80†	0,24†	0,46	158,89†	-1,08†	0,09	0,12
15	86,88†	-3,47†	0,38†	0,24	9,40	-0,19	0,08	0,01
<b>Promedio - sign</b>	213,28	-4,47	0,37	0,41	213,49	-2,81	0,22	0,31
<b>Usando decisiones promedio</b>	170,19†	-5,98†	0,56†	0,47	156,86†	-3,20†	0,29†	0,67

† Significancia al 5%

Los resultados de la Tabla 5 muestran inicialmente que una alta fracción de los parámetros estimados es significativa (al 5%). Por ejemplo, se encontraron valores significativos en los 3 parámetros en el 40%, 60%, 60% y 47% para los Casos C1, C2, C3 y C4 respectivamente, lo que implica el 52% de toda la muestra. Se observa que solo el 40% de los valores de  $R^2$  son mayores a 0.4, pero los  $R^2$  de los sujetos con parámetros significativos muestran que las regresiones en promedio están entre 0.31 y 0.51.

Como se discutió en el capítulo anterior, el estudio cualitativo de los resultados utilizando las decisiones promedio en cada Caso son realmente cercanos al comportamiento del modelo mostrado

en el Capítulo 2. Por esta razón, se analizan los resultados experimentales utilizando mínimos cuadrados. En primer lugar, se plantea la hipótesis de que las órdenes de los clientes mayoristas (de los sujetos) en cada Caso pueden ser explicadas por un modelo de regresión lineal múltiple (Ecuación 16 y 17). Ahora, basados en los resultados y significancias obtenidas en la Tabla 5, se puede aceptar la idea de que el modelo econométrico es una forma de explicar y ajustar el comportamiento de los sujeto en este tipo de Cadena de Abastecimiento. De hecho, la Tabla 5 también muestra que los  $R^2$  de estas decisiones promedio se encuentran entre 0.47 y 0.67.

Finalmente, el 78% de los coeficientes de todos los Casos es significativo para la mayoría de los coeficientes. Por ejemplo, el coeficiente  $\beta_1$  es consistente con el signo esperado (negativo) y significativo para la mayoría de los sujetos; se encontraron valores significativos en el 53%, 80%, 73% y 67% para los casos C1, C2, C3 y C4 respectivamente, lo que implica el 68% de toda la muestra. Y además, la mayoría de los signos (78%) de este parámetro son negativos. Por otra parte, el coeficiente  $\beta_2$  tiene valores positivos en el 77% y se encontraron valores significativos para el 60%, 67%, 67% y 60% en los casos C1, C2, C3 y C4 respectivamente. La constante  $\beta_0$  es significativa para el 88% de la muestra.

En conclusión, este análisis de mínimos cuadrados permite realizar un análisis más específico sobre cómo es el comportamiento de cada individuo al enfrentarse a algún caso de estudio. Los resultados mostraron una buena significancia tanto para cada individuo cómo para el promedio. Ahora, con el fin de estudiar las decisiones cómo conjunto al interior de cada caso de estudio, se agrupan los resultados de los experimentos en un Panel.

## **6.2. ANALISIS DE PANEL**

Con el propósito de estudiar las variables de los experimentos que varían en el tiempo, pero que son constantes al interior de los sujetos de un mismo Caso de estudio, se organizan los datos del experimento como un panel. Este tipo de análisis mejora la eficiencia de estimación de los parámetros y mejora la significancia de la regla de decisión. Este análisis de panel permite realizar estimaciones entre los individuos y los diferentes casos. Se asume inicialmente que la covarianza entre las variables es igual a cero y la existencia de efectos aleatorios entre los individuos (Greene, 1997) para cada Caso, esto con el fin de darle explicación completa al comportamiento. Los resultados del análisis de Panel son mostrados en la Tabla 6 y fueron estimados usando el software estadístico **R** 2.12.2.

El test de significancia del modelo usando el estadístico F muestra que todos los valores P son menores que 0.05, lo cual implica que los coeficientes del modelo econométrico son diferentes de cero y que por tal razón el modelo propuesto puede servir como aproximación para explicar las decisiones de los sujetos.

La Tabla 6 muestra además tres cálculos diferentes para el  $R^2$  (*within*, *between* y *random*) para cada uno de los Casos. El valor de *within* quiere mostrar que porcentaje de variabilidad del modelo es

explicada por la interacción entre las decisiones de un mismo sujeto periodo a periodo (al interior de cada sujeto), el valor de *between* refleja que porcentaje de la variación del modelo es explicada por las similitudes de las decisiones de los sujetos en cada periodo (entre sujetos) y el valor *random* explica el porcentaje debido a la existencia de efectos aleatorios entre los sujetos. Como se observa en la Tabla 6 los valores del  $R^2$  para los casos *within* y *random* son realmente bajos, lo que muestra que la variabilidad del modelo no se ve afectada fuertemente por los efectos aleatorios o por la relación de las decisiones al interior de los sujetos. Sin embargo, se observan valores del  $R^2$  para el caso *between* que varían entre 0.58 para el C2 hasta 0.65 para el C3. Estos resultados muestran la importante relación entre los sujetos en cada Caso a lo largo del tiempo. En otras palabras, los sujetos tienden a tomar decisiones similares ante este tipo de sistemas.

**Tabla 6** Estimación de los coeficientes a partir del análisis de panel.

<b>Regresor</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
<b><math>\beta_0</math> (intercepto)</b>	100,75† (15,36)	133,46† (11,96)	127,85† (16,012)	106,91† (13,197)
<b><math>\beta_1</math> (Capacidad)</b>	-3,916† (0,435)	-2,403† (0,191)	-4,37† (0,483)	-1,727† (0,222)
<b><math>\beta_2</math> (Ordenes Pendientes)</b>	0,413† (0,042)	0,226† (0,016)	0,433† (0,047)	0,183† (0,019)
<b>Estadístico – F</b>	47,7325	93,0629	42,4084	44,9515
<b>Valor P</b>	2,22E-16	2,22E-16	2,22E-16	2,22E-16
<b>R –Cuadrado</b>				
<i>within</i>	0,1377	0,2389	0,1228	0,1227
<i>between</i>	0,6276	0,5883	0,6504	0,5936
<i>random</i>	0,1625	0,2745	0,1461	0,1535
<b>N Observaciones</b>	495	495	495	495

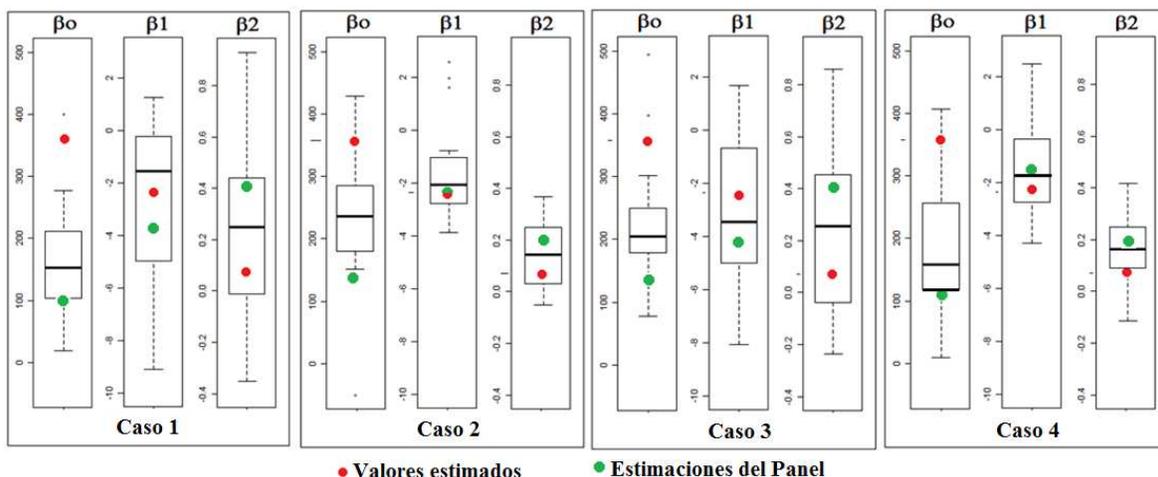
† Significancia al 1% y el Error Estándar entre Paréntesis

Por otra parte, los coeficientes arrojados por este análisis de Panel muestran alta significancia para todos los casos y con los signos adecuados. El coeficiente  $\beta_1$  es negativo, como se esperaba; sin embargo la magnitud es mucho menor de lo esperada (Ver Tabla 4). El coeficiente  $\beta_2$  es

significativo y positivo para todos los Caso, pero es alrededor de 10 veces mayor que el valor esperado. Finalmente, los valores de la constante son cercanos a 120 y son altamente significativos para todos los Casos.

La Figura 20 resume la información numérica obtenida a lo largo de los últimos dos capítulos. En primer lugar, se construye un diagrama de bigotes utilizando los parámetros estimados obtenidos para todos los sujetos en cada Caso y en segundo lugar se indican tanto los valores de los parámetros estimados matemáticamente como aquellos obtenidos por el análisis de panel.

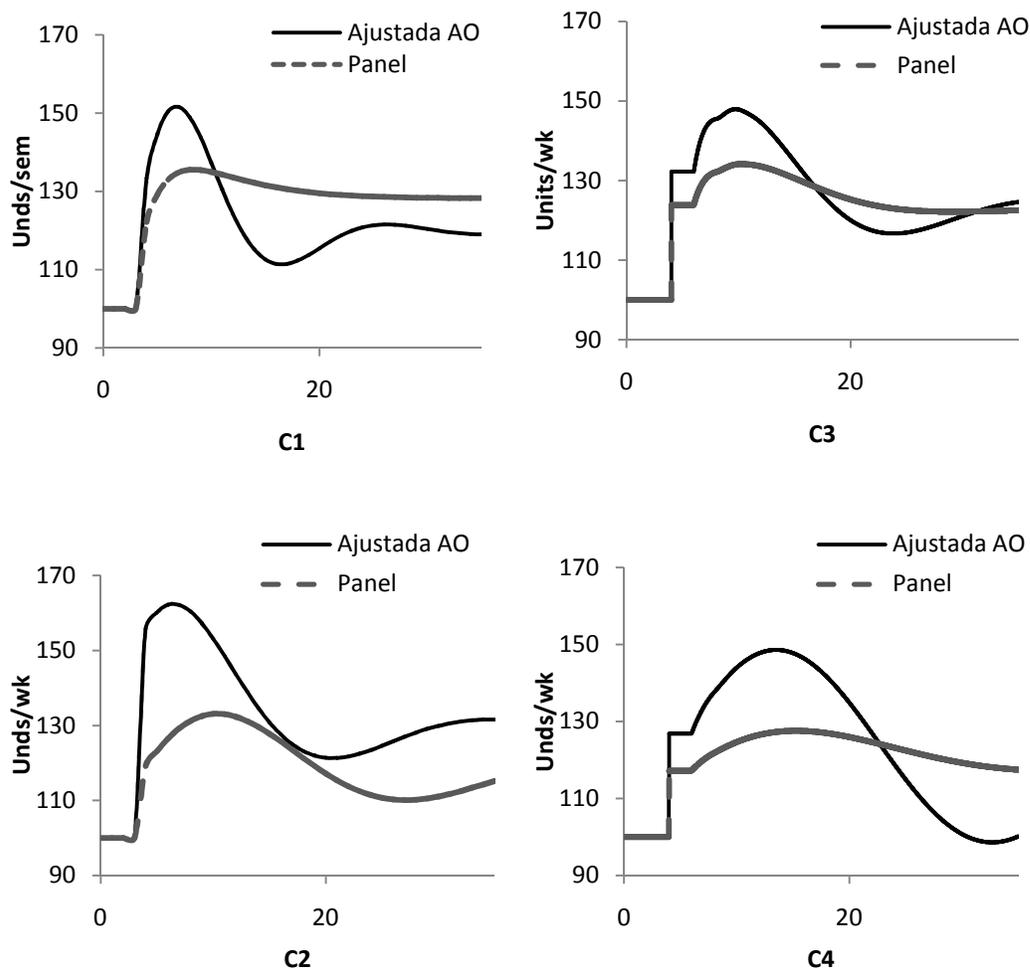
El diagrama de bigotes, de la Figura 20, muestra una distribución general para cada parámetro, permitiendo identificar si la distribución de estos es sesgada o no. Por ejemplo,  $\beta_2$  en el C2 muestra una gráfica corta y prácticamente simétrica, lo cual indica que la muestra es compacta y que probablemente las estimaciones que se realicen tengan menor incertidumbre; por otra parte  $\beta_1$  en C1 muestra una gráfica estirada y con una distribución asimétrica. La Figura 20 muestra además que el 50% de los dos tipos de estimaciones (matemáticamente y Panel) se encuentran entre el Q1 y el Q3 en todos los Casos. Este porcentaje no es mayor debido a que todos los valores de  $\beta_0$  estimados matemáticamente son mayores que aquellos obtenidos experimentalmente. Sin embargo, los resultados de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  muestran que los valores estimados tienen en general el signo correcto y además se encuentran cercanos a la mediana del diagrama de bigotes y a las estimaciones utilizando el análisis de panel.



**Figura 20** Comparación gráfica entre los resultados experimentales, estimados y del Panel

Los resultados obtenidos en la estimación de parámetros utilizando el panel y aquellos resultados obtenidos usando las decisiones promedio son ingresados y ejecutados en el modelo de simulación que se desarrolló dentro del experimento. La Figura 21 muestra el comportamiento de estos dos modelos, los cuales pretenden resumir el comportamiento de la decisiones tomada por los sujetos experimentados. Es posible realizar estas simulaciones debido a que los coeficientes de los modelos econométricos son significativos y cuentan con un aceptable valor del R2.

Se observa que la heurística propuesta replica el *patrón* de comportamiento (descrito a lo largo de esta tesis, tanto desde el planteamiento del modelo como en el análisis de resultados promedio) para todos los Casos de estudio. Es decir, se evidencia la forma como las personas inflan sus órdenes a los proveedores para posteriormente, cuando tengan altos inventarios, realizar pedidos por debajo de la demanda final. Finalmente, las simulaciones con consistentes con el bajo desempeño observado en los sujetos: se observa mayor amplitud en las oscilaciones a medida en que se enfrentan con mayores retardos en el sistema.



**Figura 21** Simulación de la heurística propuesta usando el modelo econométrico con las decisiones promedio (Ajustada AO) y con los parámetros del Panel (Panel)

## CONCLUSIONES

En esta tesis se realizó un estudio del efecto látigo en las Cadenas de Abastecimiento por medio de modelamiento, simulación y de experimentos de laboratorio. Para esto se desarrolló un modelo

formal en dinámica de sistemas basado en Gonçalves (2003) y Gonçalves & Arango (2010). El modelo fue utilizado para plantear una hipótesis de comportamiento de los sujetos, que pudiera capturar la racionalidad humana en una Cadena de Abastecimiento con características específicas: un único proveedor quien es el encargado de producir y vender un producto único e insustituible a múltiples clientes mayoristas, quienes compiten por este producto escaso. Este modelo de simulación fue corrido por un tiempo de simulación de 25 periodos y se evidenció el comportamiento característico del efecto látigo. De esta manera se evidencia como las herramientas de modelamiento y simulación se unen para explicar, comprender y actuar sobre los sistemas.

Se construyó un experimento de laboratorio, en el cual los sujetos fueron remunerados económicamente mientras asumían el rol de clientes mayoristas. La labor de estos sujetos era la de tomar decisiones de pedidos al proveedor, mientras enfrentaban un incremento repentino de la demanda final. Los experimentos estuvieron divididos en cuatro casos que pretendían evaluar el comportamiento ante valores diferentes de los tiempos de construcción de capacidad por parte del proveedor y del tiempo que toma la información en pasar desde el cliente mayorista hasta el proveedor. En este caso, la economía experimental fue una metodología que se ajustó adecuadamente a las necesidades de interactuar virtualmente con la forma de pensar y actuar de los sujetos ante un problema en específico.

El desempeño de los sujetos en los diferentes casos experimentales se comparó con los resultados óptimos de decisiones. La trayectoria óptima de decisiones se obtuvo por medio de algoritmos evolutivos. De este modo se observó que los resultados experimentales eran considerablemente alejados de la trayectoria de decisiones referencia y que por lo tanto los sujetos incurrieron en costos más altos. Por ejemplo, el promedio de desempeño de los sujetos en los 4 Casos varía desde un 400% hasta un 1800% mayor que los niveles de referencia; inclusive, el mejor desempeño encontrado es un 22% mayor que el nivel de referencia. Las inferencias sobre los resultados contribuyeron a la comprensión del comportamiento de los clientes mayoristas cuando enfrentan agotados de sus productos, en particular se evidenció la existencia de racionalidad limitada cuando los seres humanos se enfrentan a un ambiente dinámico complejo

Los resultados experimentales mostraron que los sujetos durante los primeros periodos de la simulación inflaban sus órdenes y más tarde cuando el proveedor había adquirido suficiente capacidad de producción, los sujetos sub-ordenaban. Esto creaba que el proveedor quedará con un exceso de capacidad y un bajo desempeño, lo que muestra una evidencia efecto látigo. Adicionalmente, se observó que la onda (inflada) de órdenes de los participantes tiende a ser mas larga en los Casos en los cuales se presentaban mayores tiempos de retardo (C3 y C4). Consistente con la complejidad de los casos, los costos finales acumulados son menores en los Casos más sencillos (menores tiempos de retardo) y más altos en los más complicados (C4). De hecho, los sujetos en el C4 reaccionaron más agresivamente debido a la mayor dificultad de que sus decisiones tuvieran efecto para buscar el equilibrio.

El modelo desarrollado utiliza el uso de una heurística o regla de decisión basado en el hecho de que las personas no tienen la capacidad de tomar en primera instancia el mejor conjunto de

decisiones a lo largo del tiempo, debido a que les es difícil dominar la presencia de las no linealidades y realimentaciones en las cuales se encuentran (somos seres racionalmente limitados), por tal razón la heurística propuesta está basada fundamentalmente en hechos causales (relaciones causa-efecto). A partir de un análisis econométrico de la heurística de decisión propuesta, se encontró que los sujetos usan una heurística simple de ajuste para decidir cómo tomar sus decisiones. Para encontrar esta regla heurística, se recurrió al modelo desarrollado previamente, y así linealizar la parte del modelo que es de interés para este estudio (decisiones de los clientes mayoristas). Con este modelo linealizado, se desarrollaron tres tipos de análisis: primero, se determinaron los parámetros de ajuste del modelo lineal múltiple para cada uno de los sujetos experimentado; luego se determinaron los parámetros utilizando las decisiones promedio de los sujetos en cada Caso y finalmente se estructuraron los datos para cada Caso en un Panel.

Las estimaciones estadísticas mostraron una relación negativa entre las decisiones del cliente mayorista y la capacidad del proveedor (C) y una relación positiva con respecto a la cantidad de órdenes pendientes por recibir (B); tal y como era de esperarse. Se encontró además que en más del 50% de los sujetos los parámetros estimados eran significativos (al 5%) y el 40% de las regresiones contaban con un valor superior a 0.40. El panel fue creado con la idea de mejorar la eficiencia en las estimaciones y mejorar la representatividad de la regla de decisión. Este análisis de panel nos permite obtener mayor información sobre las explicaciones de la variabilidad de los resultados, las colinealidades posibles e inclusive permite controlar, para la dinámica de cada individuo, la heterogeneidad no observada. Las estimaciones del panel han mostrado que los coeficientes de las variables son significativos para todos los Casos de estudio y además los signos son correctos y significativos. El modelo econométrico es aceptado de acuerdo al test de significancia (el estadístico F muestra que todos los valores P son menores que 0.05) y se observa también que la diferencia entre los sujetos de un mismo Caso no contribuye a explicar la varianza inexplicada.

El análisis de las decisiones promedio mostró dos resultados diferentes: primero, se puede observar un ajuste visual entre las decisiones promedio y el modelo matemático desarrollado, y segundo, el análisis econométrico arroja una buena significancia en la estimación de los parámetros y los signos.

Con el propósito de llevar a cabo el precepto de paralelismo requerido para este tipo de experimentos, una validación externa es necesaria. De esta manera, el experimento es desarrollado a partir de un modelo de simulación que captura las estructuras de realimentación y retardos características del sistema real de estudio; y además ha sido analizado formalmente en términos de estructura y comportamiento. El modelo soporta el análisis de casos reales que permite una apropiada validación externa, la cual se ve respaldada en términos de modelo de un problema real, complejidad del sistema, resultados y soporte en casos reales.

Además estos experimentos son un problema específico de las Cadenas de Abastecimiento, en la cual toman lugar las burbujas de demanda u órdenes fantasmas causadas por el efecto del sobre ordenamiento que ocasionan problemas de sobre-capacidad.

Finalmente, en esta tesis se evaluó de forma sistemática la manera como las personas, asumiendo el rol de clientes mayoristas, toman decisiones de pedidos a su único proveedor. Se evidenció además, que el uso de la dinámica de sistemas y la economía experimental son herramientas que permiten evaluar tanto la consistencia del modelo matemático a desarrollar (hipótesis) como para el desarrollo experimental que se requería para evaluar los comportamientos de las personas. Por otra parte, el uso de la estadística aplicada permitió estudiar qué tan significativos eran cada uno de los parámetros analizados y, de este modo, la significancia del modelo econométrico propuesto. Todos estos estudios nos llevan a concluir que las personas tienden a actuar de manera similar cuando se enfrenta con condiciones similares, tendiendo a tener bajo desempeño en la medida que se enfrentan con retardos mayores.

## **TRABAJO FUTURO**

Después del desarrollo de esta tesis, se crean una serie de alternativas y nuevas preguntas de investigación que llaman a la creación de nuevas experimentaciones, como resultado mismo de la experimentación. Con el fin de mejorar la comprensión y mejorar el conocimiento sobre las dinámicas de este tipo de Cadenas de Abastecimiento, se planteas los siguientes temas para ser desarrollados en trabajos futuros:

- Conducir unos nuevos experimentos en los cuales se tenga la posibilidad de que varios sujetos (clientes mayoristas) tomen decisiones en simultánea, esto con el fin de identificar el efecto de la competencia mayorista en este tipo de Cadena de Abastecimiento. Para esto es necesario planear nuevas hipótesis.
- Realizar el análisis de otros tipos diferentes de heurísticas que tengan en cuenta el déficit o exceso de productos con los que el cliente mayorista cuenta periodo a periodo.
- Realizar una nueva experimentación en la cual se pueda adicionar, periodo a periodo, diferentes tipos de patrones de demanda final.
- Dado que hasta el momento se hizo el estudio de toma de decisiones, sería interesante e importante realizar análisis y experimentación de políticas estabilizadoras del efecto látigo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADELMAN, D. 2001. "First Loss Sets Gloomy Tone at CISCO." *Wall Street Journal*. May 9, B1.
- ALWAN, L., J. LIU, AND D. YAO (2003): "Stochastic characterization of upstream demand process in a supply chain," *IIR Transactions*, 35, 207–219
- ARACIL J. y Gordillo A. 1997. *Dinámica de Sistemas*, Alianza Universidad.
- ARANGO, S (2006a). Cyclical Behaviour, a Function of Market Complexity? Expanding the Cobweb Experiment. S Arango, *Essays on Commodity Cycles Based on Expanded Cobweb Experiments of Electricity Markets*. PhD Thesis, University of Bergen, Social Science Faculty. Bergen, Norway.
- ARMONY, M., Plambeck, E. 2005. The Impact of Duplicate Orders on Demand Estimation and Capacity Investment. *Management Science* 51 (10), pp. 1505-1518.
- ATKINS, PWB, Rutgers, P & Wood, RE. 2002. The Effects of Feedback Format on Dynamic Decision Making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 88(2): 587-604.
- BAKKEN, Be (1993). *Learning and Transfer of Understanding in Dynamic Decision Environments*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management. Cambridge (MA), USA.
- BALAKRISHNAN, A. , Geunes, J. and Pangburn, M. 2004. Coordinating supply chains by controlling upstream variability propagation. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(2), pp 163-183
- BREHMER, B (1992). Dynamic Decision Making: Human Control of Complex Systems. *Acta Psychologica* 81(3): 211-241.
- CACHON, G., y Lariviere, M. 1999a. "Capacity Allocation Using Past Sales: When to Turn and Earn." *Management Science*. 45(5): pp. 685-703.
- CHARU C; Sameer K. 2000. "Supply Chain Management in Theory and Practice: A Passing Fad or a Fundamental Change?" *Industrial Management & Data Systems [electronic journal]*, Volume: 100 Number: 3, pp. 100 – 114.
- CHEN F, A. Federgruen y Zheng. 1997. "Coordination Mechanisms for decentralized distribution system", Columbia School of Business, working paper

CHEN, F., Z.Drezner, J.Ryan, and D.Simchi-Levi. 2000. "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information." *Management Science*, 46(3), pp. 436- 443.

CHENG Zhang y ChenghongZhang. 2006. "Design and simulation of demand information sharing in a supply chain", Department of Information Management and Information Systems, School of Management, Fudan University, #220 Rd. Handan, Shanghai 200433, China

GARY, MS & Wood, Re. 2008. *Mental Models, Decision Rules, Strategies, and Performance Heterogeneity*. MIT Sloan School of Management Research Paper No. 4736-09. Sloan School of Management, MIT.

CROSON, R., Donohue, K., 2002. Experimental Economics and Supply Chain Management. *Interfaces* 32 (5), 74- 82.

CROSON, R., Donohue, K., 2003. Impact of POS Data Sharing on Supply Chain Management: An Experimental Study. *Production and Operations Management* 12 (1), 1-11.

CROSON, R., Donohue, K., 2005. Upstream Versus Downstream Information and its Impact on the Bullwhip Effect. *System Dynamics Review* 21 (3), 249-260.

DOMÍNGUEZ, JA, Ruiz, JC, Domingo, MA & González, MM. 1998. Our Ten Years of Work on Transparent Box Business Simulation. *Proceedings of the 16th International Conference of the System Dynamics Society*. Québec City, Canada.

DIEHL, E., Sterman, J.D., 1995. Effects of Feedback Complexity on Dynamic Decision Making. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 62 (2), 198-215.

DYNER, Isaac, Peña, Gloria y Arango, Santiago. 2008. Modelamiento para la simulación de sistemas socio-económicos y naturales. Universidad Nacional de Colombia

EDWARDS, W. 1962. Dynamic Decision Theory and Probabilistic Information Processing. *Human Factors* 4(2): 59-73.

FATÁS, E & Roig, JM (2004). Una Introducción a la Metodología Experimental en Economía. *Cuadernos de Economía* 27(75): 7-36.

FOREMSKI, T. 1999. " Intel struggles to meet strong demand for chips," *Financial Times (London)*, November 18, p.42.

FORRESTER, J.W. 1958. " Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers." *Harvard Business Review*. 36(4): 37-66.

- FORRESTER, J.W. (1961), *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- FRIEDMAN, Daniel. (1985). *Experimental Economics: Comment*, *The American Economic Review*, Vol.75, No.1., p.26
- FRIEDMAN D, Cassar A. (2004). *Economics Lab: An Intensive Course in Experimental Economics*. Routledge: London.
- FRIEDMAN D, Sunder S. (1994). *Experimental Methods: A Primer for Economists*. Cambridge University Press: Cambridge.
- GARAYALDE I. y Rodríguez De Yurre L. 1992. *Perspectivas del mercado de trabajo en la C.A.P.V.: Aplicación de un modelo de simulación Ad Hoc*.
- GARY, MS & Wood, RE (2008). *Mental Models, Decision Rules, Strategies, and Performance Heterogeneity*. MIT Sloan School of Management Research Paper No. 4736-09. Sloan School of Management, MIT.
- GILBERT S. M, BhaskaranSreekumar R. (2005), "Selling and Leasing Strategies for Durable Goods with Complementary Products.", *Management Science* 51(8) 1278-1290.
- GAITHER, C. (2001). "Intel Beats Forecast; Warns of Revenue Shortfall," *The New York Times*, Enero 17, T1
- GEARY, S., Childerhouse, P., Towill, D.R., (2002). *Uncertainty and the seamless supply chain*. *Supply Chain Management Review (USA)* July/August, 52–61.
- GONÇALVES, Paulo. (2003). *Demand Bubbles and Phantom Orders in Supply Chains*. PhD thesis, MIT Sloan School of Management, Boston, USA.
- GONÇALVES Paulo, Arango Santiago. (2010). *Supplier Capacity Decisions Under Retailer Competition and Delays: Theoretical and Experimental Results*. A preliminary version for the 28th International Conference of the System Dynamics Society, Seoul, Korea.
- GRÖßLER, A, Maier, FH & Milling, PM (2000). *Enhancing Learning Capabilities by Providing Transparency in Business Simulators*. *Simulation & Gaming* 31(2): 257-278.
- GUPTA A. Maranas C. (2003). *Managing demand uncertainty in supply chain planning*. *Computers & Chemical Engineering* 27, p. 1219 – 1227.
- HAYYA J. C., Chatfield D.C. y T.P. Harrison. 2006. *An XML-centered approach to creating object oriented supply chain simulation models*. *International Journal of Simulation and Process Modeling* 2 (3/4):115- 123.

- HEY, JD (1996). *Experimentos en Economía*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica
- HOWIE, E, Sy, S, Ford, L & Vicente, KJ. 2000. Human-Computer Interface Design Can Reduce Misperceptions of Feedback. *System Dynamics Review* 16(3): 151-171.
- HWARNG Brian, Xie Na. 2008. Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective, *European Journal of Operational Research* (184), pp 1163 – 1178.
- HOLMSTRÖM, 2004. Solution Design as a heuristic for conducting explorative supply chain research. Helsinki University of Technology.
- KIM, S.W. (2006a), “The effect of supply chain integration on the alignment between corporate competitive capability and supply chain operational capability”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 26 No. 10, pp. 1084-107.
- KIM, S.W. 2006b, “Effects of supply chain management practices, integration and competition capability on performance”, *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 11 No. 3, pp. 241-8.
- KIMBROUGH S, WU D.J., ZHONG F. 2002. “Computers play the beer game: can artificial agents manage supply chains?”. *Decision Support Systems* 42, pp. 323 – 333.
- LAMBERT D y Cooper M. 2000. Issues in Supply Chain Management, *Industrial Marketing Management* 29, p 65- 83.
- LANGLEY, PA, Paich, M & Stermann, JD. 1998. Explaining Capacity Overshoot and Price War: Misperceptions of Feedback in Competitive Growth Markets. *Proceedings of the 16th International Conference of the System Dynamics Society*. Québec City, Canada
- LEE, H., Padmanabhan, V y Seungjin Whang. 1997a. “Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect.” *Management Science*, 43(4), pp. 546-558.
- LEE, H., Padmanabhan, V, and Seungjin Whang. 1997b. “The Bullwhip Effect in Supply Chains.” *Sloan Management review*, Spring, pp. 93-102.
- LI, L. 1992. “The Role of Inventory in Delivery Time Competition.” *Management Science*. 38(2): pp. 182-197.
- LOEWENSTEIN, G 1999. Experimental Economics from the Vantage-Point of Behavioural Economics. *The Economic Journal* 109(453): Features, F25-F34.

MASS, N. 1975. “Economic Cycles: An Analysis of Underlying Causes.” Cambridge, Mass. Wright-Allen Press.

MIN, H. & Zhou, G. 2002. “Supply chain modelling: past, present and future”. *Computers & Industrial Engineering* 43. pp. 231-249.

MITCHELL, T.W. 1924. “Competitive Illusion as a Cause of Business Cycles.” *Quarterly Journal of Economics*, **38**(4):p. 631-652.

MIYAOKA, J., W. Hausman. 2004. How a base stock policy using “stale” forecasts provides supply chain benefits. *Manufacturing and Service Operations Management* 6 (2) 149-162.

MORECROFT, J.D. 1980. “A Systems Perspective on Material Requirements Planning.” *Decision Sciences*. 14: pp. 1-18.

MOXNES, E. 1998a. Not Only the Tragedy of the Commons: Misperceptions of Bioeconomics. *Management Science* 44(9): 1234-1248.

MOXNES, E. 1998b. Overexploitation of Renewable Resources: The Role of Misperceptions. *Journal of Economic Behavior and Organization* 37(1): 107-127.

MOXNES, E. 2004. Misperceptions of Basic Dynamics: The Case of Renewable Resource Management. *System Dynamics Review* 20(2): 139-162.

OVALLE O., Crespo A., 2003. “The effectiveness of using e-collaboration tools in the supply chain: an assessment study with system dynamics”, *Journal of Purchasing & Supply Management* 9, pp. 151 -163.

ÖZBAYRAK Mustafa, PapadopoulouTheopisti, AkgunMelek. 2007. Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system, *Simulation Modelling Practice and Theory* (15), pp. 1338–1355

PAICH, M &Sternan, JD. 1993. Boom, Bust, and Failures to Learn in Experimental Markets. *Management Science* 39(12): 1439-1458.

PARLAR, M. 1988. Game theoretic analysis of the substitutable product inventory problem with random demands. *Naval Research Logistics* **35**(3) 397–409.

PLOTT, CR. 1982. Industrial Organization Theory and Experimental Economics. *Journal of Economic Literature* 20(4): 1485-1527.

PLOTT, CR & Smith, VL. 2008. *The Handbook of Experimental Economics Results*. Amsterdam: North Holland.

ROBERTS N., Wesley A. 1983. Introduction to computer simulation: a system dynamics modelling approach.

ROUWETTE EAJA, Größler A, Vennix JAM. 2004. Exploring Influencing Factors on Rationality: A Literature Review of Dynamic Decision-Making Studies in System Dynamics. *Systems Research and Behavioral Science* 21: 351-370.

RUA, Gisela. 2008. “Modelación de una cadena de suministro considerando múltiples objetivos y múltiples parámetros bajo incertidumbre”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, COLOMBIA.

SIMON, HA. 1955. A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics* 69(1): 99-118.

SIMON, HA. 1979. Rational Decision Making in Business Organizations. *The American Economic Review* 69(4): 493-513.

SMITH, VL 1976. Experimental Economics: Induced Value Theory. *The American Economic Review* 66(2): 274-279.

SMITH, VL 1982. Microeconomic Systems as an Experimental Science. *The American Economic Review* 72(5): 923-955.

SMITH, V.L. 1994: Economics in the Laboratory, *Journal of Economic Perspectives* 8 (1), 113-131.

SMITH, V L. 2002, “Method in Experiment: Rhetoric and Reality,” *Journal of Experimental Economics*.

STERMAN, J. D. 1987. Testing Behavioral Simulation Models by Direct Experiment. *Management Science*, 33, 1572-1592.

STERMAN, John. 1989a. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. En: *Management Science*. Vol. 35, no. 3; p. 321-339.

STERMAN, John. 1989b. Misperceptions of feedback in dynamic decision making. En: *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. Vol. 43, no. 3; p. 301-335.

STERMAN, J.D. 2000. “ Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World.” Chicago, IL, Irwin-McGraw Hill.

TVERSKY, A &Kahneman, D. 1974. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science* 185(4157): 1124-1131.

WARBURTON (2004), Una aproximación diferente a la formulación hecha desde el punto de vista de la Dinámica de Sistemas fue planteada por

WU, DY &Katok, E. 2006. Learning, Communication, and the Bullwhip Effect. *Journal of Operations Management* 24(6): 839-850

YOUNG, SH, Chen, CP, Wang, S-W & Chen, CH. 1997. The Landmine Structure and the Degrees of Freedom of Decision-Making. *Proceedings of the 15th International Conference of the System Dynamics Society*. Istanbul, Turkey.

ZHANG, X. 2004. The impact of forecasting methods on the bullwhip effect. *International Journal of productioneconomics*, 88, 15-27.

# APENDICE

## Apéndice 1. Interfaz del experimento

### CONTROL DEL JUEGO

DECISIONES DE PEDIDOS [unds/sem]:

  
  
  
  
Semana: 1

### REPORTES

#### OPERACIONES

DEMANDA [unds/sem]:	100
DÉFICIT [unds]:	0
UNDADES RECIBIDAS [unds]:	100
TIEMPO DE ENTREGA [sem]:	10.00
UNDADES PENDIENTES POR RECIBIR [unds]:	1000

#### COSTOS

POR ORDENAR [\$/sem]:	10
POR DÉFICIT [\$/sem]:	0
COSTOS TOTALES SEMANALES [\$/sem]:	10
<b>COSTOS ACUMULADOS [\$/sem]:</b>	<b>0</b>

### PEDIDOS

### DEMANDA

### COSTOS

## Apéndice 2. Instrucciones para el Caso 3

### INSTRUCCIONES

#### POR FAVOR NO TOCAR EL COMPUTADOR HASTA QUE NO SE LE INDIQUE

Bienvenido, a partir de este momento usted hace parte de un experimento de toma de decisiones, en el cual asumirá el papel de gerente de una empresa mayorista. Su responsabilidad es **minimizar los costos acumulados** al final de la simulación del juego (**50** semanas), y de acuerdo a su desempeño obtendrá un pago en dinero efectivo, de un proyecto de investigación patrocinado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Su decisión semanal es definir cuántas unidades **ordenar** a su proveedor, con el fin de cubrir toda la demanda de sus clientes (en el experimento, esta decisión se toma en la casilla ubicada al frente de “*Decisión de Pedidos*”). La decisión que usted toma, será recibida por su proveedor tres semanas después de realizada la orden y serán acumuladas en un canal de órdenes pendientes. La capacidad inicial de producción de su proveedor es de 100 unidades por semana, sin embargo, él tiene la capacidad de cambiar su capacidad según la órdenes que usted le realice, a mas órdenes mayor inversión en capacidad. El tiempo de construcción de capacidad de su proveedor es de una semana. En caso de que su proveedor no tenga la capacidad suficiente para satisfacer sus necesidades, este va a empezar a tener retrasos en las entregas de los pedidos (mayores a 10 semanas) y por lo tanto usted también le incumplirá a sus clientes.

Se incurre en costos cada semana por dos componentes:

#### 1. Costo por Ordenar (CO):

$$CO = \frac{1 * (\text{Decisión Pedidos})^2}{1000}$$

Con una cantidad inicial de pedidos de 100 unidades, este costo en la primera semana es de \$10.000.

#### 2. Costo por Déficit o Inventario (CD):

$$CD = \frac{2 * (\text{Déficit})^2}{1000}$$

Con un déficit de 0 unidades, el costo en la primera semana es de \$0.

De esta manera, el costo total acumulado CTA es la suma de estos costos en toda la simulación, así:

$$CTA = \sum_{t=1}^T (CO_t + CD_t)$$

Inicialmente, usted ordena 100 unidades por semana, lo cual le permite a su proveedor conservar un tiempo de entrega objetivo de 10 semanas como condición inicial. Recientemente, aplicaciones novedosas del producto crearon un aumento en su demanda. El incremento en la demanda será permanente y del orden de 20 unidades por semana. Dado que usted no estaba atento a estas nuevas aplicaciones, el aumento en la demanda lo tomó por sorpresa y se da cuenta que su déficit está aumentando y por lo tanto perdiendo clientes y prestigio.

**Usted iniciara por 3 semanas decidiendo 100 unidades como periodo de aprendizaje.** Después su tarea es manejar la compañía durante la simulación, decidiendo cuánto ordenar a su proveedor mientras que minimiza el costo total acumulado CTA.

**PAGO:** El pago será en efectivo al final del experimento. Corresponde a una suma por participación de \$10000 mas una suma variable entre \$0 y \$30000 en función del CTA, a menor costo total CTA mayor pago.

**NOTA:** *Por favor no divulgar información del experimento con sus compañeros para no perder la validez científica del experimento.*

## GLOSARIO

### (ACERCA DE LOS RESULTADOS QUE SE OBSERVAN EN “REPORTES”)

**Sección de Operaciones:** Da información del sistema del mayorista (usted).

DEMANDA [unds/sem]:	100	→ 1
DÉFICIT [unds]:	0	→ 2
UNIDADES RECIBIDAS [unds]:	100	→ 3
TIEMPO DE ENTREGA [sem]:	10,00	→ 4
UNIDADES PENDIENTES POR RECIBIR [unds]:	1000	→ 5

1. Son las órdenes que usted recibe de sus clientes finales. Esta es la demanda que se debe cubrir cada periodo.

2. Son las unidades que le faltan por entregar (si es **negativo**, indica **inventario**).
3. Son las unidades que le llegan cada periodo al mayorista (a usted) por parte del proveedor y son con las que dispone por periodo para satisfacer la demanda.
4. Es el tiempo de entrega promedio de las órdenes, contados desde el momento en que usted realiza las órdenes hasta el momento en que las recibe. El tiempo de entrega ideal es de 10 semanas.
5. Acumulan la diferencia entre las órdenes realizadas y las recibidas por el mayorista (usted) en el tiempo. Inicialmente usted tiene una cantidad acumulada de pedidos realizados de 1000 unidades, que serían recibidos de a 100 unidades durante 10 semanas.

**Sección de Costos:** Da información acerca de cada componente de sus costos:

### COSTOS

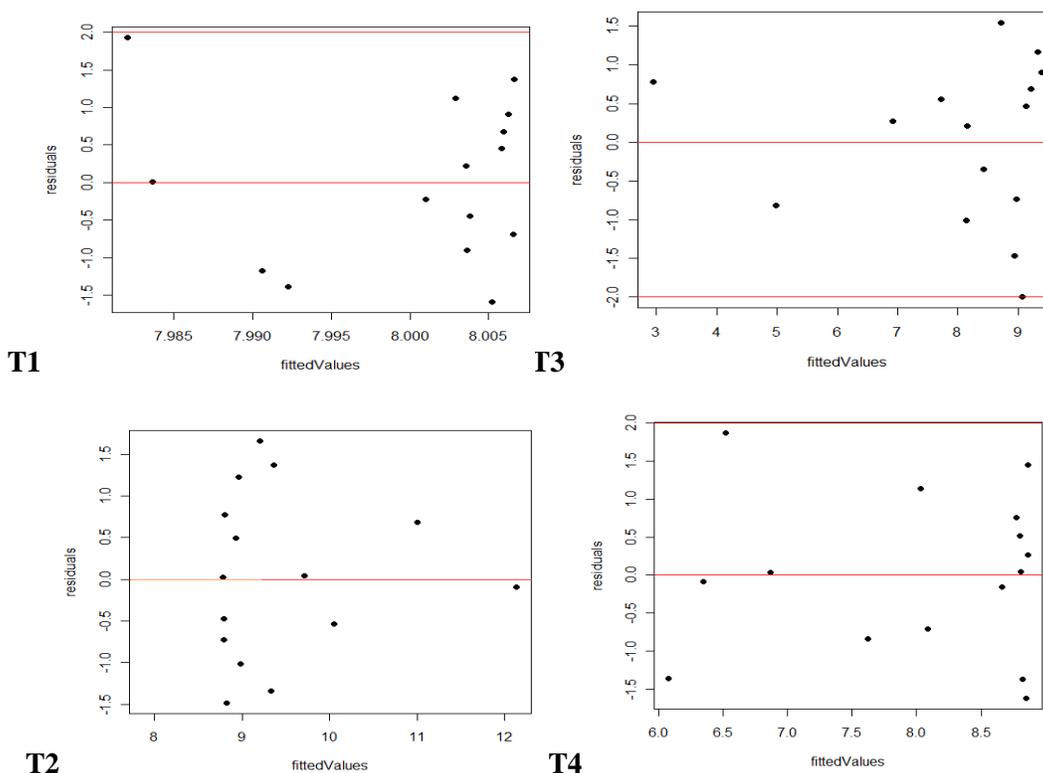
	[\$/und]		
POR ORDENAR [\$/sem]:	1	10	→ 6
POR DÉFICIT [\$/sem]:	2	0	→ 7
COSTOS TOTALES SEMANALES [\$/sem]:		10	→ 8
<b>COSTOS ACUMULADOS [\$]:</b>		0	→ 9

6. Costos por la decisión tomada cada periodo.
7. Costo por tener inventario o deberle unidades al cliente final (\$/semana)
8. Es la suma de los dos componentes de los costos cada semana.
9. Es el costo total acumulado en el tiempo CTA.

### Apéndice 3. Análisis de residuales para el desempeño de los sujetos

Los experimentos fueron corridos con más de 15 personas; sin embargo, con el fin de realizar mejores análisis a lo largo de la tesis y poder estudiar resultados similares y significativos para cada caso, se realizó un análisis estadístico. La siguiente figura muestra el análisis de residuales para cada caso de estudio. Como se puede observar todos los puntos en cada una de las gráficas se encuentran entre las líneas de residuales igual a -2 e igual 2, es decir, a no más de dos desviaciones estándar de la media (los puntos que se encontraron por fuera de estas dos líneas fueron excluidos para los análisis). De esta forma se puede garantizar una homogeneidad y significancia de los datos seleccionados para realizar los análisis estadísticos del estudio.

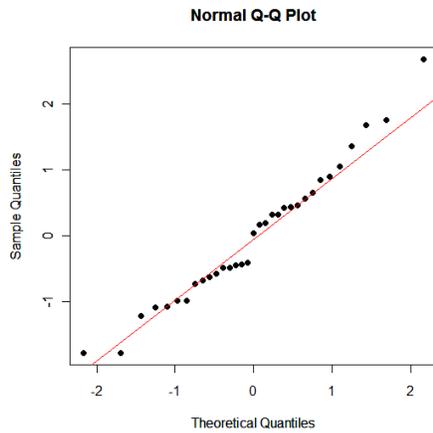
Después de analizar las decisiones de los sujetos, se encontró que el comportamiento de los sujetos excluidos se desviaba marcadamente del comportamiento de los sujetos que fueron aceptados. En particular, un sujeto excluido realizó decisiones de gran orden de magnitud comparada con el resto de sujetos (ej. Decisiones del orden de 9000 unidades/semana, lo que es 90 veces mayor que la demanda inicial). En particular, es importante resaltar que el remover algunos sujetos del estudio, no cambia en gran medida los resultados globales obtenidos, pero nos permite prevenir que los estudios estadísticos obtengan algún tipo de sesgo no deseado.



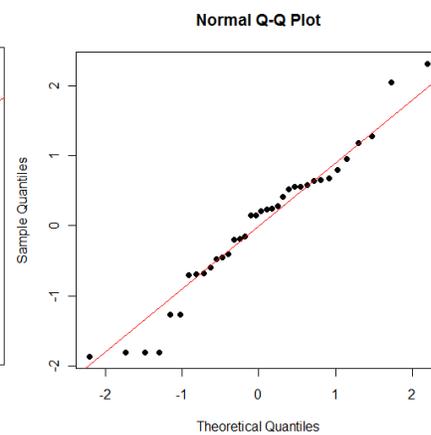
Residual analysis for each subject performance

#### Apéndice 4. Validación de las suposiciones del modelo econométrico

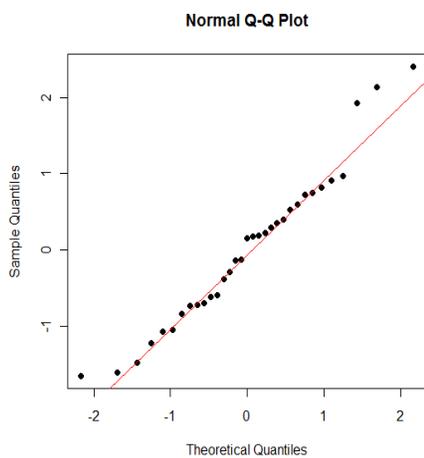
Con el propósito de que tanto el modelo econométrico utilizado y los parámetros encontrados sean aceptados, se debe garantizar que los errores del modelo siguen una distribución normal y tienen varianza constante. Por esta razón, en la siguiente figura se realiza un simple test gráfico de normalidad sobre los residuales de cada uno de los casos. Como se puede observar, los puntos de los residuales tienden a ajustarse bien a una línea recta (roja), especialmente en el medio de la gráfica. Por esta razón podemos decir que el supuesto de normalidad es satisfecho por cada uno de los resultados de cada uno de los casos de estudio.



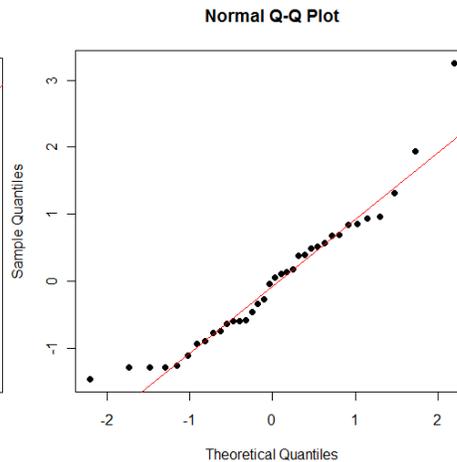
**Caso 1**



**Caso 3**



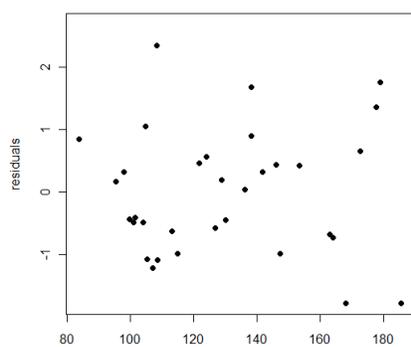
**Caso 2**



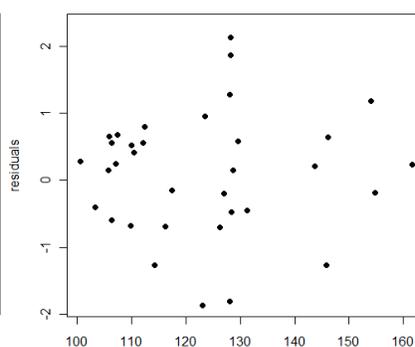
**Caso 4**

#### Análisis de Normalidad por Caso de Estudio

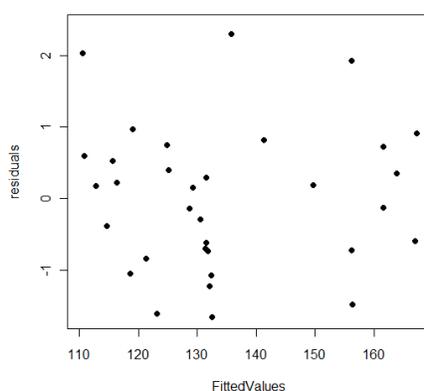
Por otra parte, con el fin de determinar que los residuales tienden a tener varianza constante, se realiza otro análisis gráfico. La siguiente figura muestra como los puntos en cada una de las gráficas tiende a fluctuar aleatoriamente alrededor de cero, sin seguir ningún tipo de patrón específico de comportamiento. Por esta razón, la prueba no muestra evidencia de que las suposición de varianzas constantes de los residuales se esté incumpliendo.



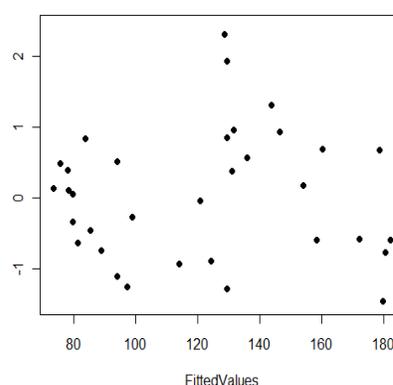
**Caso 1**



**Caso 3**



**Caso 2**



**Caso 4**

### Análisis de la varianza para cada caso de estudio

Como se observó en el análisis econométrico del modelo propuesto, las estimaciones de los parámetros son significativas para la mayoría de las estimaciones y por otra parte el análisis de residuales satisfizo las restricciones de normalidad y varianza constante. Ahora con el propósito de mostrar un análisis un poco mas profundo de la robustez del modelo, en la siguiente tabla se determinan el mayor y menor valor propio para los datos de cada Caso de estudio. Posteriormente, se determina la relación entre estos dos números (Condición). Ahora, como este número (condición) es menor que 100, se puede asegurar que no existe una seria multicolinealidad entre las variables usadas en el modelo econométrico.

**Tabla. Selección del modelo econométrico**

	<b>Max Valor Propio</b>	<b>Mín Valor Propio</b>	<b>Condición (Max/min)</b>	<b>AIC Initial</b>	<b>AIC -x1</b>	<b>AIC -x2</b>
<b>T1</b>	1,956	0,044	44,619	196,560	223,880	230,490
<b>T2</b>	1,838	0,162	11,375	170,150	179,180	198,760
<b>T3</b>	1,976	0,024	83,463	203,990	221,530	224,840
<b>T4</b>	1,871	0,129	14,490	231,300	269,640	269,960

Finalmente, esta tabla también muestra el *Akaikeinformationcriterion* (AIC), el cual es una medida de que tan bien se ajustan determinados datos a un modelo estadístico. El AIC no es teóricamente un test que se pueda validar a partir de determinadas hipótesis, pero es una buena opción para selección entre modelos. En la tabla se muestran tres valores diferentes para el AIC: 1) El modelo econométrico ajustado teniendo en cuenta  $x_1$  y  $x_2$ , 2) el modelo sin tener en cuenta a  $x_1$  y 3) el modelo sin tener en cuenta  $x_2$ . El mejor de los tres modelos para cada Caso de Estudio es seleccionado a partir de aquel que tenga el menor valor del AIC. Para los valores de AIC mostrados en la tabla, podemos concluir que el modelo es más explicativo cuando se utilizan ambas variables ( $x_1$  y  $x_2$ ), evidenciando nuevamente la baja colinealidad entre las variables.

Apéndice 5. Ambiente de laboratorio

