

# Análisis de un esquema de coordinación para los procesos de descargue en grandes almacenes, basado en modelos por eventos discretos



**Mateo Pachón Rincón**

Departamento de ingeniería industrial, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Colombia

**Juan David Suárez Moreno**

Centro Latinoamericano de Innovación en Logística, Logyca/Investigación, Colombia

**Jorge Eduardo Ortiz Triviño**

Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

*Recibido: 7 de septiembre de 2016. Aceptado: 25 de mayo de 2017.*

## Resumen

En la ciudad de Bogotá (Colombia) se presenta una problemática relacionada con el uso de la infraestructura pública para realizar las actividades de cargue y descargue de mercancías. Es frecuente observar sobre la vía pública, incluso sobre grandes avenidas, largas filas de espera de vehículos de carga para ser atendidos por grandes almacenes. Estas colas generan un impacto negativo sobre los corredores donde estos vehículos se estacionan, en términos de cuellos de botella y aumento de tiempo de circulación sobre estas vías. Esta situación es atribuible entre otros factores a la falta de infraestructura para atender estos vehículos, a una mala gestión por parte de los almacenes que reciben la carga, así como también la ausencia de implementación de alternativas de gestión por parte de los organismos de control. A continuación, se presenta la evaluación de un esquema de coordinación como alternativa de gestión de las actividades de cargue y descargue. Para ello se desarrolló un modelo de simulación por eventos discretos de los procesos de carga y descarga en los diferentes establecimientos objeto de estudio para dos escenarios propuestos. El estudio realizado permite concluir que la coordinación entre los actores tiene un impacto positivo tanto en movilidad como en los costos en los que incurren los transportadores, disminuyendo los tiempos medios en cola y los tamaños de las mismas, así como el tiempo total en el sistema. Por otro lado, se muestra cómo afecta económicamente el tiempo en cola considerando el costo de oportunidad de los transportadores.

## Palabras clave

*Logística urbana  
Coordinación  
Procesos logísticos  
Simulación por eventos discretos*

## Abstract

**Coordination scheme analysis for unloading processes, in large stores, based in discrete events models.** In Bogota (Colombia) an issue related with the use of public infrastructure for goods loading and unloading activities is presented. It is frequently seen on the streets, even in large avenues, long queues of trucks waiting to be attended by department stores. These queues have a negative impact on the corridors where those trucks are parked, in terms of bottle necks and the increase of circulation time in these streets. This issue is attributable among many factors, to the lack of infrastructure to respond to the number of vehicles, mismanagement by the stores that receive or generates goods, as well as the lack of implementation of management alternatives by control agencies. The following paper presents the assessment of coordination scheme as a management alternative for the loading and unloading activities in Bogota city. For this a discrete events simulation model was developed in all the different stores for loading and unloading for two proposed scenarios. The study made allows to conclude that coordination between actors has a positive impact in mobility as well as in in incurred costs by the carriers, diminishing the average time in queue and also the size, as well as the total time in the system. On the other hand it is shown how the time in queue has economic impacts when carriers' opportunity cost is taken into account.

### Keywords

Urban logistics  
 Coordination  
 Logistic processes  
 Discrete event simulation

### Palavras chave

Logística urbana  
 Coordenação  
 Processos logísticos  
 Simulação por eventos discretos

## Introducción

Las dinámicas poblacionales de las ciudades generan carga a la infraestructura debido entre otras cosas al transporte de carga, que se hace esencial para suplir la demanda de bienes y servicios. Desde finales del siglo XX se empieza a generar un interés por la logística urbana y sus externalidades como, por ejemplo: el impacto en la movilidad, el deterioro del aire a causa del humo generado por los vehículos, y en últimas la calidad de vida de los habitantes de las mega-ciudades (Ruske, 1994). Un elemento importante en la investigación de la logística urbana es su carácter interdisciplinario donde convergen múltiples disciplinas como el transporte, las políticas públicas, la estadística entre otras (Gonzalez-Feliu, Semet y Routhier, 2014).

El presente estudio se centra en la simulación por eventos discretos de 5 almacenes de grandes superficies de Bogotá. Dichos almacenes generan una importante demanda de carga y una serie de externalidades, esto debido a las colas de camiones en el perímetro de las bodegas. De considerar que la población de Bogotá es cercana a los ocho millones de habitantes (censo 2005, DANE). Por otro lado, la carga que demandan estos almacenes es importante para el desarrollo de la ciudad, y para suplir la demanda de alimentos y otros productos de buena parte de los ciudadanos. Otro elemento a considerar es que el estudio toma una muestra no probabilística dado que se contaba con el acceso a datos de 5 grandes almacenes, y con los permisos necesarios para realizar el estudio de tiempos y demandas de procesos de carga y descarga en cada uno de los almacenes objeto de estudio.

El aumento en la población urbana y la demanda de bienes y servicios, además de otros factores, como el hecho que los puntos de consumo estén separados en espacio de los puntos de producción, tiene efectos de manera directa en el transporte de carga, necesitando en proporción al flujo físico un mayor número de vehículos para darle movilidad a la carga. Generando externalidades como: congestión, contaminación y reducción de accesibilidad y de seguridad; en términos generales afectando la calidad de vida y la productividad de las ciudades. Lo anterior puede hacer ver al transporte de carga como una amenaza para el bienestar de las ciudades, no obstante, hay que tener en cuenta que el transporte de carga es vital para el desarrollo de las economías.

Lo anterior hace pensar que: se debe encontrar un equilibrio entre la movilización de la carga, el impacto generado por la misma, la productividad y la sostenibilidad de la ciudad (Institut Cerdá, 2010).

Es por lo anterior que se requiere de sistemas eficientes de transporte de carga para asegurar la disponibilidad de suministros para poblaciones cada vez mayores, lo que significa tener tanto agilidad, flexibilidad y capacidad respuesta para atender las necesidades del mercado. En este sentido siendo Bogotá el principal polo de actividad económica de Colombia; representa cerca del 25% del PIB nacional, es de vital importancia para la competitividad de la ciudad, abastecer las necesidades de los establecimientos comerciales e industriales efectivamente. Sin embargo, en diferentes zonas de Bogotá es posible observar grandes colas de vehículos esperando a ser atendidos por establecimientos comerciales.

La situación es más compleja debido a que estas colas de vehículos se ubican en espacio público, generando impactos en la movilidad debido a la obstrucción de la vía. Bajo este escenario, el artículo presenta como la coordinación en el arribo de los vehículos de carga a los lugares donde se desarrollan los procesos de cargue y descargue, puede disminuir los tamaños de las colas, así como, el tiempo de permanencia. Impactando los costos de la actividad en términos del costo de oportunidad de las empresas transportadoras, al disminuir los tiempos ociosos de sus vehículos, y en últimas atenuar las externalidades negativas que tiene el transporte de carga, lo anterior sin realizar ningún tipo de inversión en vías.

Para la evaluación de la alternativa propuesta se desarrolló un modelo de simulación por eventos discretos, bajo tres escenarios, en el primero toma como línea base los datos recogidos en el trabajo de campo; mientras que los otros dos simulan los escenarios coordinados. Comparando indicadores de desempeño como: tiempo medio en cola, tamaño promedio de la cola y número total de vehículos atendidos.

El artículo está dividido en cuatro secciones. La primera sección desarrolla las diferentes teorías y enfoques en las que se basa el planteamiento de la alternativa y el método de solución, seguida de ella se presenta la metodología de solución utilizada para la alternativa propuesta. La tercera sección presenta los resultados generales del experimento de simulación. Por último, se expone la discusión de los resultados y las conclusiones derivadas del estudio.

## Teoría y enfoques

Existen dos grandes corrientes de pensamiento en el estado del arte en materia de logística urbana:

- » Por un lado se tienen las teorías relacionadas con las políticas públicas impartidas y/o creadas por parte de la administración pública. Dichas políticas buscan regular, organizar y por qué no coordinar el transporte de carga en el interior de las ciudades, para de esta forma aumentar la eficiencia del transporte y a su vez disminuir las externalidades negativas generadas por el mismo (Taniguchi y Thompson, 2001).
- » Por otro lado se tienen iniciativas empresariales que buscan aumentar la productividad haciendo un uso eficiente de los recursos utilizados en los procesos de carga y descarga de mercancías. El presente artículo se centra en mostrar por medio de simulación por eventos discretos como la coordinación adoptada por una empresa

puede mejorar de forma racional el uso de recursos utilizados en los procesos de carga y descarga al interior de la ciudad.

La distribución urbana de mercancías es una actividad necesaria para el desarrollo económico de una ciudad. Sin embargo y aunque esta actividad es importante en muchas ocasiones, es vista como contraproducente. Entre las externalidades negativas que produce esta actividad se encuentran: la congestión vehicular, la contaminación visual y ambiental, entre otras. Externalidades que terminan afectando tanto la calidad de vida, como la eficiencia de las organizaciones. Sin embargo, es importante entender que la logística es una actividad importante en la planeación de una ciudad. La dinámica con la que se realizan las actividades logísticas puede ser un punto diferenciador en el desarrollo de las ciudades. Una solución posible que contribuya al desarrollo de las mega-ciudades es la aplicación de técnicas de colaboración entre agentes de la cadena de suministro. Lo que podría generar escenarios en los que las partes interesadas obtienen beneficios al disminuir o eliminar las externalidades negativas producidas por la logística urbana y más específicamente por los procesos de carga y descarga (Gonzalez-Feliu et al., 2013)

Se requiere de habilidades especiales en el manejo, transbordo y de funciones intermodales donde los servicios logísticos son en efecto el eje que soporta a la ciudad región global. Con el crecimiento continuo de la población urbana, y el subsecuente aumento en la demanda de bienes y servicios, la entrega de los mismos genera externalidades negativas subyacentes en la utilización de un mayor número de vehículos, resultando en una mayor congestión, contaminación y la reducción en accesibilidad y seguridad.

Particularmente en ciudades localizadas en economías emergentes, que enfrentan retos en el desarrollo de mercados, mayores requisitos ambientales, nuevas tecnologías y la evolución de cadenas de suministro complejas (Ehmke, 2012). Es indiscutible que la infraestructura disponible tiene una importante influencia en el nivel de actividades logísticas que puede desarrollar una ciudad. Sin embargo, la infraestructura no es el único aspecto importante (O'Connor, 2010).

La disponibilidad de espacio y la movilidad que exista en alguna ciudad determina además la habilidad de la ciudad de hacer frente a grandes demandas mediante una distribución física de manera ágil, oportuna y eficiente. No debe pensarse sólo en la racionalización del espacio en términos de desarrollo de infraestructura sino también en la implementación de nuevas tecnologías y políticas. La logística no es solo una actividad importante dentro de una ciudad, de hecho, la dinámica con la que se realizan estas actividades pueden ser un punto diferenciador en el desarrollo de las ciudades (O'Connor, 2010).

En este contexto se hace relevante la aplicación de la coordinación en la gestión de las operaciones de cargue y descargue, desdoblada a través de dos posibles estrategias: un esquema o bien un mecanismo de coordinación, a continuación, se desdobra el concepto de coordinación.

### *Coordinación en la cadena de suministro*

El concepto de coordinación está íntimamente relacionado a la teoría de la gestión de la cadena de suministro. Una primera definición realizada por (Harland, 1996) habla sobre la gestión de las actividades y las relaciones al interior de la organización a lo largo de la cadena de suministro. Por otro lado (Lee and Billington, 1995) involucra el término de manera explícita dentro de la gestión de la cadena de suministro al establecer que SCM por sus siglas en inglés (*Supply chain management*) se refiere a

la coordinación de producción, logística, y gestión de materiales, desde las materias primas hasta el cliente final.

Otras definiciones explican la gestión de la cadena de suministro a través de la coordinación y la gestión del aprovisionamiento, flujo y control de materiales (Monczka et al., 1998), mientras que (Mentzer et al., 2001) establece que la SCM es la coordinación sistemática y estratégica de las funciones empresariales tradicionales a través de las empresas en la cadena de suministro.

El éxito de SCM está basado en determinar quiénes son los miembros clave de la cadena de suministro, con cuales integrar los procesos de la misma y finalmente cuales son los procesos que deben integrarse con los miembros clave y que tipo de nivel de integración debe ser aplicado en cada uno de estos procesos (Lambert, Cooper and Pagh, 1998).

La gestión de la cadena de suministro busca la sincronización y convergencia de las capacidades estratégicas y operativas tanto al interior como al exterior de la empresa para crear una sola fuerza de mercado (Ross, 1998), como una filosofía integradora orienta a los miembros de la cadena de suministro a desarrollar soluciones innovadoras para crear fuentes únicas y personalizadas de valor para el cliente (Mentzer et al., 2001)

*Mecanismos de coordinación en la cadena de suministro*

La coordinación en una cadena de suministro implica que las decisiones individuales consideren el estado de sus pares, y los posibles resultados tanto individuales como de la cadena de suministro en sí. Lo anterior con el objetivo de optimizar los criterios de decisión (Stadtler, 2008). Esta alineación en la toma de decisiones requiere que en algunas ocasiones los decisores en un punto determinado de la cadena de suministro, definan sus variables de decisión lejos de sus óptimos locales. Un problema clave en la SCM es crear estrategias que puedan alinear los objetivos de los integrantes independientes de la cadena; y coordinar sus decisiones y actividades para optimizar el desempeño del sistema de forma agregada.

Estas estrategias utilizadas para la adecuada coordinación de una cadena de suministro se encuentran en la literatura referenciadas de dos maneras. La primera bajo el nombre de esquema de coordinación, y la segunda como mecanismo de coordinación. En el Cuadro 1 se puede observar la definición propuesta por (Albrecht, 2010)

*Cuadro 1. Estrategias de coordinación en cadena de suministro. Fuente: Albrecht 2010.*

Estrategia	Definición
Esquema de coordinación	Es un conjunto de reglas que especifican acciones cuya implementación por las partes descentralizadas potencialmente coordina el sistema
Mecanismo de coordinación	Es un mecanismo por el cual la aplicación de las estrategias óptimas por parte de las entidades descentralizadas con intereses propios puede resultar a un resultado coordinado sin violar la racionalidad individual de las partes involucradas ni el balance presupuestario del sistema

Otra definición sobre lo que es un mecanismo de coordinación en SCM, es la propuesta por (Li y Wang, 2007), quienes lo definen como un plan operacional que coordina los miembros individuales de la cadena de suministro y mejora la rentabilidad del sistema. Así mismo especifican que los miembros de la cadena son entidades económicamente independientes. El mecanismo debe incluir un esquema de incentivos para asignar los beneficios de la coordinación entre ellos de tal manera que se incentive la cooperación. Los mecanismos de coordinación tienen como objetivo encontrar la solución óptima

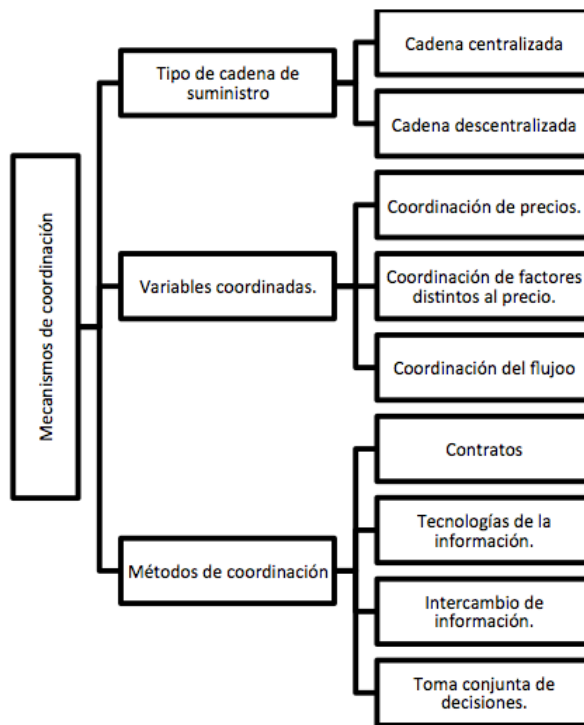


Figura 1 Taxonomía de mecanismos de coordinación en cadena de suministro. Fuente: Fugate et al. 2006.

para toda la cadena y animar a sus miembros a adoptar esta solución (Giannoccaro and Pontrandolfo, 2004).

De manera general los mecanismos de coordinación pueden clasificarse en dos grandes grupos, el primero son mecanismos para cadenas centralizadas. En una cadena de suministro centralizada se le otorga el poder de la toma de decisiones a una sola entidad encargada de maximizar la rentabilidad de la cadena de suministro. En este enfoque se comparte todo tipo de información entre los miembros de la cadena de suministro con el fin de reducir la incertidumbre (Chen et al., 2010).

Por otro lado, está el enfoque de cadenas de suministro descentralizadas. Desde esta perspectiva, cada unidad económica toma sus decisiones en búsqueda de obtener los mejores beneficios. Por lo general en una cadena de suministro descentralizada ninguna de las partes tiene el conocimiento requerido para una planeación integrada. Además, el compartir información es considerado negativo ya que esta constituye una ventaja estratégica para negociar, la cual se pierde al ser revelada (Albrecht, 2010).

Un mecanismo de coordinación: Es un plan operacional que alinea las acciones y planes de todas las partes involucradas pertenecientes a la cadena de suministro, el plan tiene el objetivo común de mejorar los rendimientos globales y así mismo aumentar la ganancia de los agentes que componen la cadena. Una condición para que sea un mecanismo de coordinación es que al implementarlo se genere una mejora en el sistema. La coordinación de una cadena de suministro necesita información precisa y oportuna sobre las decisiones operacionales y actividades. Lo anterior genera la necesidad de compartir información entre todos los miembros y de esta forma reducir la incertidumbre. Este proceso es complicado en una cadena de suministro descentralizada.

De lo anterior (Li and Wang, 2007) propone tres elementos que debe tener un mecanismo de coordinación para una cadena de suministro descentralizada: 1) Un plan operacional para coordinar las decisiones y actividades de los miembros de la cadena, 2) una estructura para compartir información entre los miembros involucrados y 3) un

esquema de incentivos para asignar los beneficios de la coordinación para incentivar la cooperación de todos los miembros.

Otras taxonomías, encontradas en la literatura clasifican los mecanismos de coordinación de acuerdo al tipo de variables que se quiere coordinar en el sistema, mientras que otras se centran en el tipo de cadena de suministro o en los métodos de coordinación (Fugate, Sahin, and Mentzer, 2006); esta información puede verse de manera gráfica en la Figura 1.

Beamon y Xu (2006) discuten las diferentes características que componen un mecanismo de coordinación, y propone un marco de referencia para la selección del mecanismo apropiado según las características de este último. El cuadro 2 presenta las diferentes posibles características de un mecanismo de coordinación:

*Cuadro 2. Componentes y características de los mecanismos de coordinación. Fuente: Benita et al., 2006.*

Propiedad	Clasificación	Descripción
Estructura de recursos compartidos	Ninguna	No se comparten recursos
	Recursos operacionales	Comunicación a nivel operacional, se comparte información de los puntos de venta.
	Recursos tácticos	Comunicación entre gerencias de las mismas funciones de diferentes empresas para alcanzar consistencia, o desarrollo conjunto de planes de inventario y producción.
	Recursos estratégicos	Formación de alianzas estratégicas, creación conjunta de planes estratégicos, se comparten recursos para crear ventajas competitivas.
Distribución del riesgo y beneficios	Justa	Una firma toma una mayor cantidad de riesgos, pero así mismo toma mayores beneficios.
	Injusta	Una firma toma poco riesgo y recibe mayores beneficios, o en el sentido contrario toma muchos riesgos, pero pocos beneficios.
Estilo de la decisión	Centralizada	Una sola empresa tiene el control en la toma de decisiones.
	Descentralizada	Cada empresa toma decisiones de manera individual.
Nivel de control	Alto	Las firmas involucradas en el mecanismo de coordinación desarrollan reglas, rutinas y sistemas de monitoreo detallados y estrictos.
	Bajo	Poco o ningún control y monitoreo.

La elección del mecanismo de coordinación adecuado debe tener en cuenta entre otros factores, los expuestos por (Beamon y Xu, 2006) los costos de transacción y factores ambientales. Dependiendo de las características propias de un mecanismo en particular este será más o menos elegible, obedeciendo esto a las condiciones en las que se debe implementar. También aborda el grado de interdependencia, la incertidumbre y el uso de tecnologías de información, y la variación en los costos de implementación de los diferentes mecanismos.

## Metodología

El modelado por eventos discretos o teoría de colas abstrae el comportamiento de la generación de líneas de espera, como es el caso de los procesos de carga y descarga en la ciudad de Bogotá. Estos procesos generan dependiendo del flujo de carga, encolamiento en las vías cercanas al lugar donde se lleva a cabo el proceso.

La gestión de colas o los modelos de línea de espera consisten en una serie de elementos que generan esperas en las entidades o agentes a esperas de ser atendidas. De manera general, los modelos de colas tienen dos componentes. Los elementos que se procesan en el sistema son entidades, dichas entidades se atienden según un criterio definido. La atención de las entidades se realiza por un servidor (que presta un servicio), por ejemplo: una caja registradora, un surtidor de gasolina, la pista de aterrizaje de un aeropuerto, etc. (Law and Kelton, 1991; Khoshnevis, 1994).

Para la construcción del modelo de simulación se siguieron tres fases. Lo primero fue la identificación de los casos a modelar, luego por medio de aforos se tomaron datos de tiempos correspondientes al tiempo entre arribos al sistema. En paralelo se tomaron datos de tiempo de la duración de los procesos de carga y descarga. Después de realizar la toma de datos se analizaron los tiempos de servicio y de arribos, para ajustar los datos a unas distribuciones estadísticas necesarias para plantear el modelo de línea de espera. Importante resaltar que el ajuste de las distribuciones fue realizado aplicando pruebas Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov con un  $\alpha$  del 5%.

Con las distribuciones se construyó el simulador, a este se le realizó el proceso de verificación que consiste en hacer las corridas piloto y observar el comportamiento de las mismas. Una vez realizada la verificación, se contrasta este comportamiento con la información proporcionada por los aforos, y posteriormente se ajusta el simulador de forma tal que el sistema real y las corridas piloto sean análogas.

Por último, se realiza una serie de corridas del simulador, se capturan datos importantes y se realizan recomendaciones de cómo mejorar el sistema simulado. Por extensión, se hacen recomendaciones sobre el sistema real por medio de la coordinación de arribos al sistema. Las recomendaciones generan la disminución o la eliminación de la cola generada, todo lo anterior se valida mediante las corridas del simulador como se podrá observar más adelante. La Figura 2 presenta la metodología utilizada para realizar la investigación. Por último, de enunciar que el muestreo de los almacenes es por conveniencia, dado el acceso a la información de cada uno de ellos y los permisos que se tenían para realizar la toma de tiempos. Adicionalmente el hecho de que son almacenes que suplen de alimentos y otros productos a una parte importante de la población de Bogotá.

## Resultados

A continuación, se presentan los resultados de simulación de los procesos de carga y descarga en 5 almacenes de grandes superficies de la ciudad de Bogotá. El objetivo del estudio de simulación es evidenciar el efecto de la coordinación bajo tres escenarios, un escenario que parte del análisis de datos de la línea base de información y otros dos escenarios correspondientes al planteamiento de la modificación del proceso de arribos de los vehículos a los almacenes. El flujo físico para satisfacer la demanda de productos de consumo masivo genera impactos negativos con respecto a la movilidad de una gran urbe como lo es la ciudad de Bogotá, que cuenta con una población de 7.878.783 de personas (censo 2005- DANE).



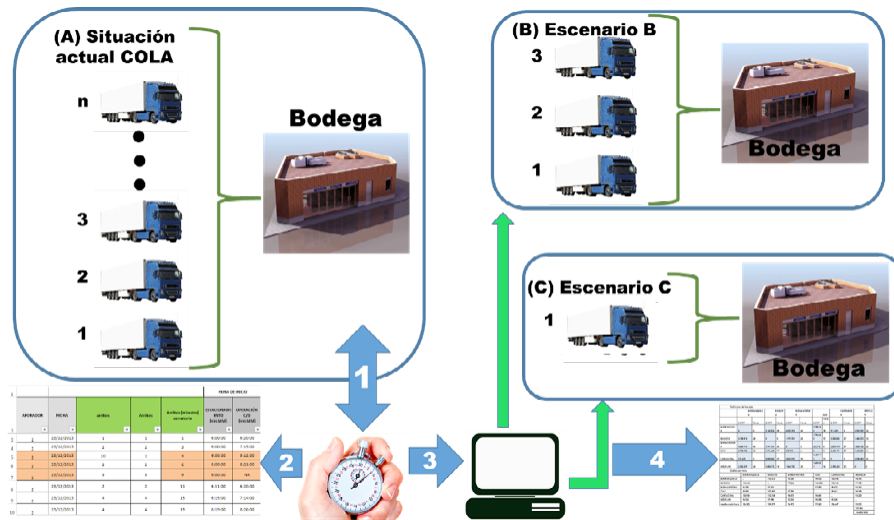


Figura 2. Metodología utilizada en el estudio. Fuente: Realizada por los autores.

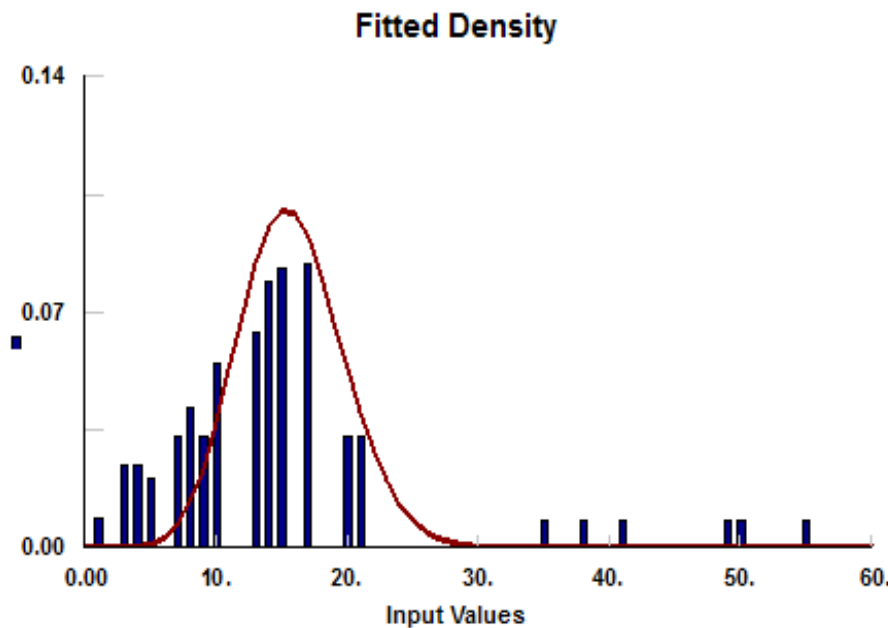


Figura 3. Distribución ajustada de la línea base arribos tienda uno. Fuente: Realizada por los autores

El estudio de simulación se centra en 5 almacenes de grandes superficies que demandan carga, en su mayoría alimentos (90% de la carga de los almacenes estudiados). Un dato importante es que al día en Bogotá se mueven aproximadamente 8.565 toneladas de alimento para satisfacer la demanda. El flujo físico genera una serie de externalidades en la ciudad y afecta directamente a las partes interesadas; por ejemplo: el flujo de camiones de carga impacta negativamente en la infraestructura que es compartida para otra gran cantidad de usos, por ejemplo, el transporte de pasajeros. Por otro lado, el flujo de alimentos y otras cargas es vital para el desarrollo de la ciudad.

A continuación, se expone uno de los casos simulados por la metodología de eventos discretos, en primer lugar, se presenta la línea base de información, esto es la simulación inicial considerando los datos recopilados in situ y por otro lado se muestran posibilidades de mejora al implementar la coordinación de arribos.

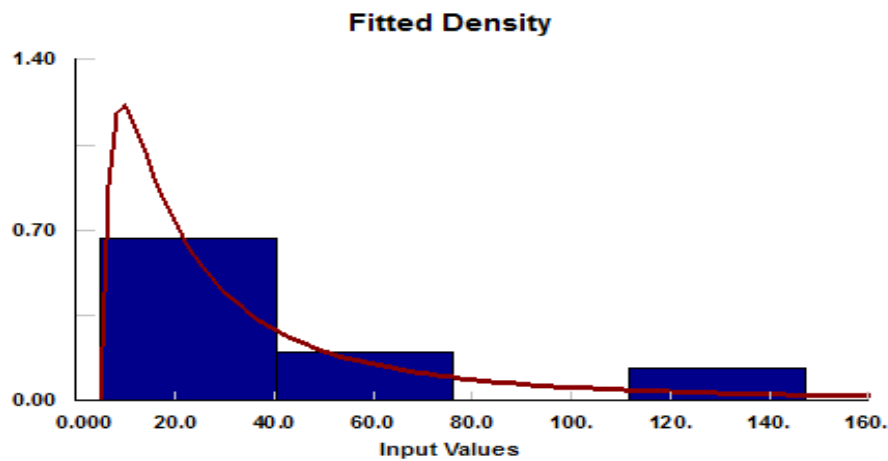


Figura 4. Distribución ajustada de los procesos de cargue y descargue de la tienda uno. Fuente: Realizada por los autores.

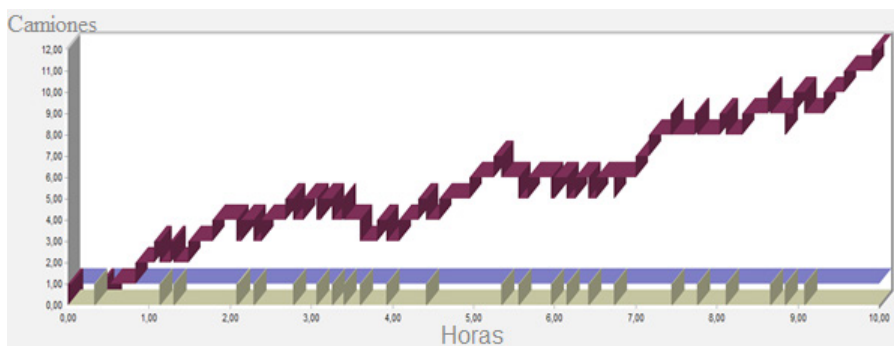


Figura 5. Resultados de la simulación por eventos discretos para la situación actual. Fuente: Realizada por los autores.

### Escenario base

Comportamiento estadístico de los arribos al sistema: partiendo del muestreo realizado. En la zona en particular (sector Búcaros Ferias) se generó una distribución estadística ajustada a los datos recolectados. Se concluye que los arribos de camiones en el caso particular tienen una distribución aproximada de probabilidad Poisson con media 15.8; dado en minutos, así:  $P(15.8)$  min. La Figura 3 presenta la distribución ajustada para el comportamiento de los arribos. Por otro lado, el comportamiento de los procesos de carga y descarga de mercancías, se ajusta a una distribución Lognormal, con la siguiente distribución: Lognormal (24., 16.01, 7.25), el ajuste de la distribución se puede observar en la Figura 4.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la simulación por eventos discretos, considerando el resultado emergente de la interacción entre arribos y procesamiento en la tienda estudiada. En la figura podemos ver la variación de la cantidad de vehículos que se encuentran haciendo cola para los diferentes momentos comprendidos durante las 10 horas que represento el proceso de simulación. Es de resaltar que a medida que avanzan las 10 horas se presenta un gran encolamiento, el cual llega a su máximo de 12 vehículos. Por otro lado, el tamaño promedio de la cola es de 6,12 vehículos.

Se observa un total de 37 arribos al sistema para las 10 horas y un total de procesos de carga y descarga de 25; lo cual indica que al final de las 10 horas quedan aún 12 vehículos en la calzada en espera de poder realizar el proceso de carga y descarga. El tiempo promedio de un vehículo en cola es de 88.79 minutos, el tiempo promedio del proceso de carga y descarga es de 23.66 minutos, motivo por el cual se presenta un encolamiento en el sistema.

Posterior a la simulación de la línea base se plantea coordinar el arribo de camiones para permitir la disminución del uso de la infraestructura y de esta forma impactar positivamente en el sistema particular y en las externalidades generadas en la ciudad.

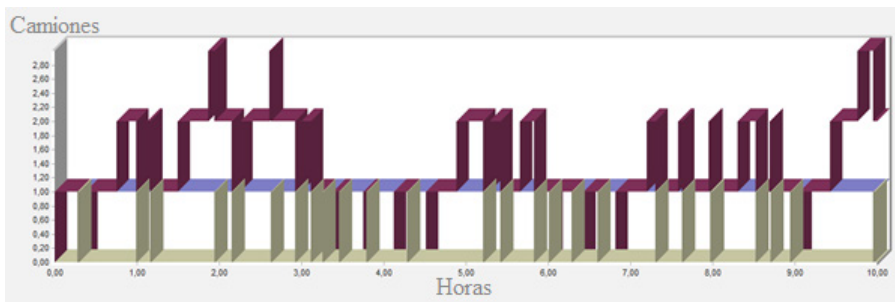


Figura 6. Resultados de la simulación por eventos discretos para el escenario 1. Fuente: Realizada por los autores.

### Escenario uno

Para este primer escenario se modifica la distribución del comportamiento estadístico de los arribos al sistema. Se evalúa la posibilidad de controlar los arribos de forma que se presenten como mínimo cada 20 minutos, con una moda de 22.5 minutos y un tiempo máximo entre arribos de 25 minutos. Dada una distribución triangular así:  $T(20, 22.5, 25)$  min.

El proceso de carga y descarga al interior de la bodega es susceptible de mejorar, no obstante, el estudio particular se centra en el mejoramiento partiendo de la propuesta de coordinar los arribos de vehículos. Por otro lado, se espera que las simulaciones hechas sirvan para formular alternativas y/o políticas que restrinjan, coordinen u ordenen el uso de la vía pública para procesos de carga y descarga.

Comparativamente al comportamiento del simulador de la línea base, se evidencia una disminución en el encolamiento, el número de vehículos a los que se le realizó el proceso de carga y descarga es de 25 contra los 25 de la línea base. Lo anterior indica el mantenimiento del servicio por parte de la tienda de gran superficie. No obstante, los tiempos promedio en cola disminuyeron de 88.79 minutos a 26.8 minutos, lo que representa una disminución del tamaño de la cola a lo largo de las 10 horas de atención. El tamaño promedio de la cola con la nueva configuración es de 1.21 vehículos. La Figura 6 presenta los resultados para el primer escenario propuesto simulado.

### Escenario dos

Para el escenario dos se evalúa la posibilidad de controlar los arribos de forma que se presenten con una media de 23 minutos y una media rango de dos minutos así:  $U(23,2)$  min. Esta distribución en particular implica un tiempo entre arribos más estandarizado para el cual la varianza entre los tiempos de llegada es menor.

Con respecto a la línea base se evidencia una disminución en el encolamiento, el número de vehículos a los que se le realizó el proceso de carga y descarga es de 25 contra los 25 de la situación actual. No obstante, los tiempos promedio en cola disminuyeron de 88.79 minutos a 34.42 minutos; lo que representa una disminución del tamaño de la cola a lo largo de las 10 horas de atención. Por otro lado, el tamaño promedio de la cola con esta configuración es de 1.55 vehículos. En la Figura 7 puede observarse el comportamiento del sistema para el segundo escenario propuesto.

### Comparación de escenarios

El Cuadro 3 resume la simulación del escenario base en comparación con las simulaciones de los escenarios uno y dos, en las que se modificó la distribución de probabilidad que representaba el arribo de vehículos a la tienda, para su posterior proceso de carga y descarga. En la tabla se observa que el tamaño de la cola y los tiempos medios en cola disminuyen al coordinar la llegada de los vehículos a la tienda.

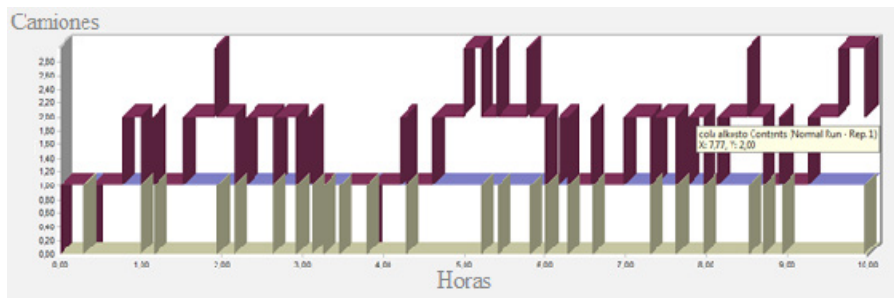


Figura 7. Resultados de la simulación por eventos discretos para el escenario 2. Fuente: Realiza por los autores.

Cuadro 3. Resultados de las simulaciones para el caso analizado y escenarios propuestos. Fuente: Realizada por los autores.

Alternativas	Tiempo medio en cola (m)	Número de vehículos a los que se les realizo el proceso de C/D	Tamaño promedio de la cola
Situación actual	88,79	25	6,12
Escenario uno	26,80	25	1,21
Escenario dos	34,42	25	1,55

Teniendo en cuenta el modelo de simulación se planteó la alternativa de suavizar la demanda de infraestructura para desarrollar procesos de carga y descarga en la ciudad de Bogotá. Cinco casos de estudio fueron caracterizados, considerando el arribo de camiones a las diferentes instalaciones y la generación de colas en vía pública. Por último y por medio de simulación por eventos discretos se plantearon dos escenarios por cada caso de estudio, los cuales se compararon con un escenario base producto de la caracterización. El Cuadro 4, presenta el resumen de las diferentes distribuciones para cada una de las 5 tiendas.

Cuadro 4. Distribuciones de probabilidad para las diferentes simulaciones. Fuente: Realizada por los autores.

		Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Tienda 1	Arribos	P (15.8) min	T(20,22.5,25) min	U (23,2) min
	Proceso	Lognormal (24., 16.01, 7.25) min		
Tienda 2	Arribos	P (13.1) min	T (14.5,15,16) min	U (15,0.5) min
	Proceso	E(15., 57.1) min		
Tienda 3	Arribos	P (48.4) min	U (90,10) min	T (65, 70, 75) min
	Proceso	Lognormal (100, 4.42, 1.14) min		
Tienda 4	Arribos	P (15.5) min	U (17,2) min	T (16, 17, 18) min
	Proceso	Lognormal (20.0, 20.58, 10.16) min		
Tienda 5	Arribos	P (9.42) min	T (8,11,16) min	T (10,11,12) min
	Proceso	E(12., 41.8) min		

Los resultados generales del estudio son presentados a continuación: la Figura 8 muestra como el tiempo de espera puede disminuir tras suavizar la demanda de los procesos de carga y descarga, de forma tal que los arribos de los vehículos sean coordinados generando una disminución del tiempo de los vehículos en cola. Un elemento que marco el diseño de los escenarios es la no modificación de los servidores que en este caso son muelles para la realización de los procesos de carga y descarga; por otro lado, se trató de conservar al máximo el número de vehículos atendidos, estos elementos pueden ser observados en la Figura 9, en ella se muestra cuantas entradas globales se presentaron en el sistema.

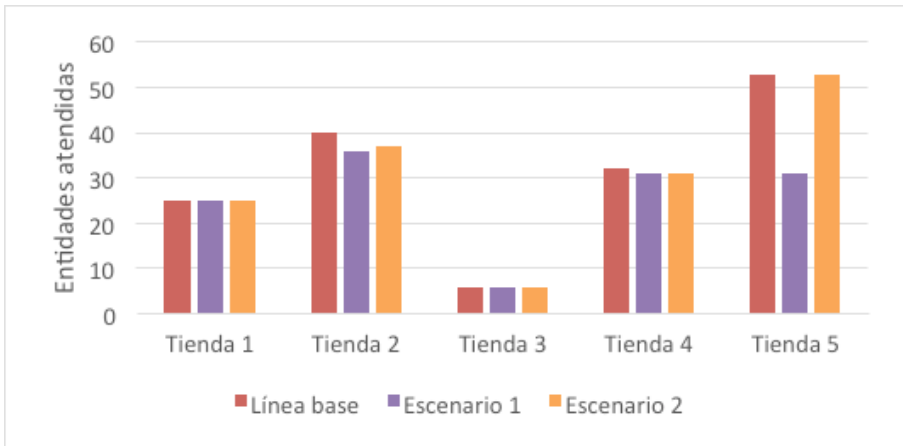


Figura 8. Número de entidades atendidas. Fuente: Realizada por los autores.

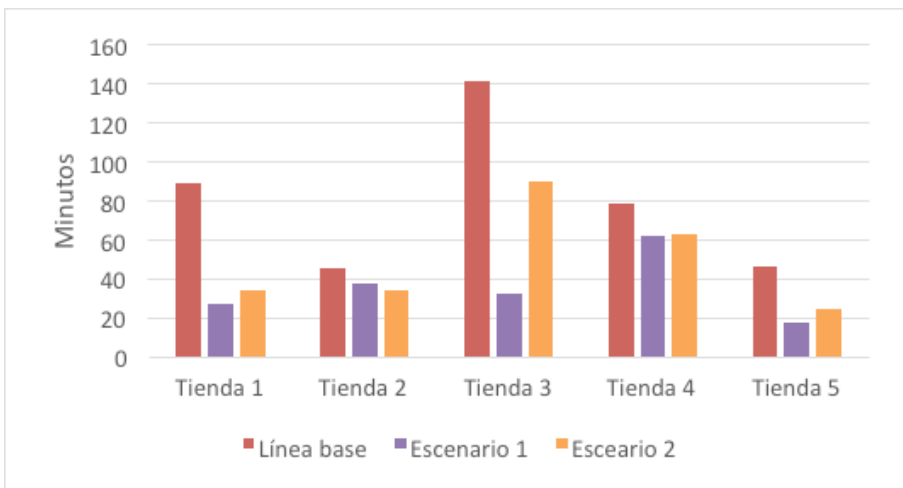


Figura 9. Tiempo promedio en cola. Fuente: Realizada por los autores.

Los tiempos promedio en cola disminuyeron para los escenarios uno y dos comparado con el escenario base. Por otro lado, se muestra como en el peor de los casos tras coordinar los arribos y suavizar la demanda de la infraestructura necesaria para efectuar los procesos de carga y descarga se disminuye hasta un 90%; lo cual implica para el caso en particular (tienda 2) pasar de 40 a 36 vehículos atendidos en las 10 horas de tiempo de simulación.

El número de vehículos promedio en cola para las tres simulaciones varía considerablemente. Se observa como en los escenarios uno y dos los valores de vehículos en colas son inferiores que los de la línea base producto de la caracterización de los sistemas reales, como puede verse en la Figura 10.

De anotar que para simular la línea base se caracterizaron los comportamientos ajustando distribuciones estadísticas que representaran tanto el arribo de los vehículos como los tiempos de la operación de carga y descarga. Por ejemplo, para el caso de la Tienda 1 se redujo hasta 20% y 25% para los escenarios uno y dos respectivamente. Las características de cada escenario varían con respecto a la distribución estadística del arribo de camiones.

En el Cuadro 5, se puede observar los diferentes elementos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del análisis económico de la línea de espera. Los elementos del análisis económico de las líneas de espera son:  $C_w$  (costo de esperar por período para cada unidad);  $L$  (cantidad promedio de unidades en el sistema),  $CS$  (costo de servicio por período para cada canal),  $K$  (cantidad de canales); se muestran para cada uno de los casos de estudio.

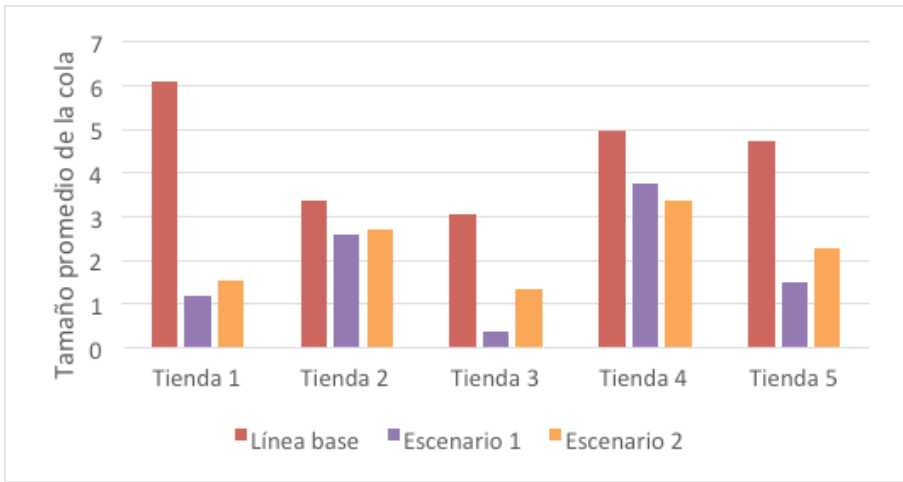


Figura 10. Tamaño promedio de la cola. Fuente: Realizada por los autores.

Cuadro 5. Análisis económico del estudio de simulación. Fuente: Realizada por los autores.

	Tienda 1	Tienda 2	Tienda 3	Tienda 4	Tienda 5
<b>Base line</b>					
Vehículos atendidos	25	40	6	32	53
Cw	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
L	6,12	3,36	3,06	4,99	4,74
CS	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
K	1	1	1	1	1
Costo total	316.951	194.088	180.733	266.648	255.519
<b>Escenario 1</b>					
Vehículos atendidos	25	36	6	31	51
Cw	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
L	1,21	2,59	0,38	3,77	1,5
CS	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
K	1	1	1	1	1
Costo total	98.379	159.811	61.431	212.339	111.289
<b>Escenario 2</b>					
Vehículos atendidos	25	37	6	31	53
Cw	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
L	1,55	2,7	1,35	3,38	2,29
CS	44.516	44.516	44.516	44.516	44.516
K	1	1	1	1	1
Costo total	113.515	164.707	104.611	194.978	146.456

El análisis realizado demuestra que los transportadores pueden obtener beneficios con la implementación de los esquemas propuestos, debido al ahorro de tiempo generado por la disminución de los tiempos en cola. Como ejemplo del estudio: en el peor de los casos para la línea base el tiempo medio en cola observado en la simulación es de 2 horas y 22 minutos, y se redujo a un tiempo de 32 y 90 minutos en los escenarios uno y dos respectivamente (datos de la tienda número 3).

Si bien se podría inferir que el esquema de coordinación es susceptible de fallar, cabe mencionar que la simulación de la línea base de información emula el

comportamiento de los sistemas reales. No obstante, las simulaciones uno y dos no corresponden a óptimos globales. Por la complejidad de los procesos logísticos en la ciudad, y el proceso de abstracción del modelo no se puede asegurar que el tiempo de arribo de un camión coincida a la perfección con el tiempo de salida del sistema del camión que desarrolla los procesos de carga y descarga. Por ende, la selección de los escenarios tiene en cuenta una varianza que represente los diferentes eventos que se dan en la realidad en la ciudad de Bogotá, como por ejemplo los retrasos por embotellamiento de las vías.

Lo anterior da unos rangos de tiempo coincidentes al comparar la no utilización de ningún mecanismo de coordinación; con la implementación de un mecanismo que permita coordinar los camiones en rangos de tiempo adecuados, que además genere como resultado la suavización de la demanda de los procesos de carga y descarga en almacenes de grandes superficies en la ciudad de Bogotá, esto enmarcado en la viabilidad de la alternativa planteada.

## Conclusiones

Se concluye que existen una serie de impactos por tener vehículos en cola entre ellos un impacto económico, por otro lado, los costos calculados corresponden a tener un número determinado de camiones en cola, y se muestra como reduciendo el número de camiones, estos costos por hora disminuyen; influyendo directamente en la eficiencia del sistema.

Si bien los resultados se muestran de forma matemática y por medio de análisis, no se puede desconocer que el resultado global en relación a la logística urbana, radica en la disminución de externalidades generadas por los procesos de carga y descarga. Por otro lado, la aplicación del esquema de coordinación puede contribuir positivamente en aspectos relacionados con el desarrollo y la competitividad de la ciudad. Al usar menos recursos asociados a la gestión logística se aumenta la productividad dado que el uso eficiente de factores de producción y operaciones enmarcados en la satisfacción de la demanda de bienes y servicios contribuye al desarrollo económico.

Por otro lado, el estudio realizado permite confirmar que el uso de esquemas de coordinación de agentes, tiene efectos positivos en el desempeño del sistema logístico estudiado. Adicionalmente se demuestra que el uso de alternativas de gestión para coordinar es una buena opción sin requerir inversión en infraestructura. El esquema de coordinación propuesto permite ahorros en el sistema en términos de reducir el tiempo de espera de los conductores para ser atendidos por el almacén. Del mismo modo como resultado emergente se logra la reducción de los tamaños de las colas y el consecuente uso del espacio público, teniendo efectos en aspectos ambientales, de movilidad, seguridad entre otros.

Otro elemento a considerar es que en la práctica la coordinación de agentes en la cadena de suministro puede atenuar problemáticas generadas por la gran carga que tiene la infraestructura existente para satisfacer la demanda de bienes y servicios. Si se reduce el tamaño de colas en vía pública en grandes almacenes, como consecuencia la movilidad mejora, a razón del mejor uso de infraestructura pública, que bien puede ser usada para prestar un mejor servicio en los sistemas de transporte de pasajeros y de otros usos aplicables a la infraestructura compartida.

El sistema objeto de estudio es susceptible de mejoras adicionales puesto que en la simulación realizada no se afectaron los tiempos de operación propios de los

establecimientos. Sin embargo, el uso de mejores herramientas al momento de realizar las operaciones de cargue y descargue reduciría el tiempo de operación, y agilizaría los tiempos de ciclo.

En este ejercicio el mecanismo de coordinación se representa en la programación de los vehículos que realizan los procesos de carga y descarga lo que impacta en la disminución de la varianza entre arribos, la implementación a nivel de software se realizó ajustando las distribuciones del comportamiento real a otras propuestas por los autores. Por otro lado, la aplicación en la práctica requerirá de una programación y una adecuada gestión por parte de los actores en la cadena de suministro, con el objetivo de mejorar los tiempos en los procesos de carga y descarga que afectan la gestión logística tanto aguas arriba como aguas abajo de la cadena de suministro.

Al demostrar la reducción del encolamiento y por ende el uso del espacio público para el aparcamiento de los vehículos, el esquema de coordinación propuesto también sirve para formular alternativas o bien políticas públicas que restrinjan, coordinen u ordenen el uso de la vía pública para procesos de carga y descarga, disminuyendo los impactos de la logística urbana. Y por último contribuyendo a disminuir el impacto del transporte de carga en la ciudad de Bogotá.

Por último, los resultados de las simulaciones realizadas son impactantes cuando se tiene en cuenta la gran cantidad de bienes y servicios consumidos por los habitantes de Bogotá. La importancia de mejorar los procesos relacionados con la logística urbana radica en el posible beneficio tanto para los ciudadanos, transportadores, y otras partes interesadas. Generando la disminución o eliminación de externalidades negativas causadas por el transporte de carga en las mega-ciudades.



## Bibliografía

- » ALBRECHT, Martin (2010) *Supply Chain Coordination Mechanisms*. Springer.
- » BEAMON, Benita and LEI XU (2006) "Supply Chain Coordination and Cooperation Mechanisms: An Attribute-Based Approach." *Journal of Supply Chain Management* 42 (1). Wiley Online Library: 4–12.
- » CHEN, Haoya, CHEN, Youhua Frank, CHIU, Chun-hung, CHOI, Tsan-Ming, SETHI, Suresh, FRANK, Youhua (2010) Coordination Mechanism for the Supply Chain with Leadtime Consideration and Price-Dependent Demand. *European Journal of Operational Research* 203 (1). Elsevier: 70–80. doi:10.1016/j.ejor.2009.07.002.
- » EHMKE, Jan Fabian (2012) Integration of Information and Optimization Models for Routing in City Logistics. *International Series in 177*: 182. doi:10.1007/978-1-4614-3628-7.
- » FUGATE, Brian, SAHIN, Funda and MENTZER, John (2006) Supply Chain Management Coordination Mechanisms. *Journal of Business Logistics* 27 (2). Wiley Online Library: 129–61.
- » GIANNOCARO, Ilaria and PONTRANDOLFO, Pierpaolo (2004) Supply Chain Coordination by Revenue Sharing Contracts. *International Journal of Production Economics* 89 (2). Elsevier: 131–39. doi:10.1016/S0925-5273(03)00047-1.
- » GONZALEZ-FELIU, Jesus, SEMET, Frédéric and ROUTHIER, Jean-Louis (2014) Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems. *EcoProduction*. doi:10.1007/978-3-642-31788-0.
- » GONZALEZ-FELIU, Jesus, MORANA, Joelle Salanova, GRAU, Josep-Maria and MA, Tai-Yu (2013) Design and Scenario Assessment for Collaborative Logistics and Freight Transport Systems. *International Journal of Transport Economics*, 207–40.
- » HARLAND, Christine (1996) *Supply Chain Management: Relationships, Chains and Networks*. *British Journal of Management* 7 (s1). Wiley Online Library: S63--S80.
- » INSTITUT CERDÁ (2010) *La Logística Urbana, Visión Teórica*. In: *Logística Urbana. Ciudad y Mercancías.*, 1sted., 13–56. Barcelona: Marge Books.
- » KHOSHNEVIS, Behrokh (1994) *Discrete Systems Simulation*. Edited by Inc. McGraw-Hill. McGraw-Hill, Inc.
- » LAMBERT, Douglas, COOPER, Martha and PAGH, Janus (1998) Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. *International Journal of Logistics Management*. 9 (2): 1-19.
- » LAW, Averill and KELTON, David (1991) *Simulation Modeling and Analysis*. Edited by McGraw-Hill. New York, NY: McGraw-Hill.
- » LEE, Hau and BILLINGTON, Corey (1995) The Evolution of Supply Chain Management Models and Practice at Hewlett Packard. *Interfaces*. Vol. 25, Issue 5, 42-63.
- » LI, Xiuhui and WANG, Qinan (2007) Coordination Mechanisms of Supply Chain Systems. *European Journal of Operational Research* (179). Elsevier: 1–16. doi:10.1016/j.ejor.2006.06.023.

- » MENTZER, John, DEWTT, William, KEEBLER, James, NIX, Nancy, MIN, Soonhon, SMITH, Carlo and ZACHARIA, Zach (2001) Defining Supply Chain Management, *Journal of Business and Logistics*, Vol.22, No. 2, 2001.
- » MONCZKA, Robert, PETERSEN, Kenneth, HANDFIELD, Robert and RAGATZ, Gary (1998) Success Factors in Strategic Supplier Alliances: The Buying Company Perspective *Decision Sciences* 29 (3). Wiley Online Library: 553–77.
- » O’CONNOR, Kevin (2010) Global City Regions and the Location of Logistics Activity. *Journal of Transport Geography* 18 (3): 354–62. doi:10.1016/j.jtrangeo.2009.06.015.
- » ROSS, David (1998) *Competing through Supply Chain Management*. Chapman & Hall.
- » RUSKE, W (1994) City-logistics-solutions for urban commercial transport by cooperative operations management. In: *OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies*. Proceedings. TT3.
- » STADTLER, Hartmut (2008) Supply Chain Management? An Overview. In: *Supply chain management and advanced planning*, edited by Hartmut Stadler and Christoph Kilger, 9–36. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-74512-9\_2.
- » TANIGUCHI, Eiichi and THOMPSON, Russell (2001) Introduction. In: *City Logistics*, 1–15. doi:10.1108/09780585473840-001

### **Mateo Pachón Rincón / mpachonr@poligran.edu.co**

Ingeniero industrial y MSc. En Ingeniería en la especialidad de Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, actualmente profesor asociado a la Institución Universitaria Politécnico Gran colombiano apoyando procesos de docencia, Investigación y Extensión en la facultad de ingeniería y ciencias básicas.

### **Juan David Suarez Moreno / jsuarez@logyca.org**

Ingeniero industrial y MSc. en Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, actualmente trabaja en el Centro Latinoamericano para la Innovación en Logística (CLI) como investigador en las líneas de Megaciudades, Política pública logística y Tecnología en redes de valor, ha trabajado en diferentes proyectos de logística urbana para la alcaldía de Bogotá.

### **Jorge Eduardo Ortiz Triviño / jeortizt@unal.edu.co**

Ingeniero de Sistemas. MSc. en Ciencias Estadísticas. Magister en Ingeniería de Telecomunicaciones. Magister en Filosofía (c). PhD (c) en Ingeniería de Sistemas y Computación. Profesor Asociado a la facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Industrial y Sistemas. Realizando investigaciones sobre: Sistemas de telecomunicaciones Ad Hoc, Simulación: Regresiones no lineales basadas en algoritmos genéticos. Inteligencia Artificial entre otros.