



Medición de la fluidez en corredores de transporte de carga intermodal

Miguel Gastón Cedillo Campos
Giovanni Lizarraga Lizarraga
Carlos Daniel Martner Peyrelongue

Publicación Técnica No. 544
Sanfandila, Qro, 2019

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Medición de la fluidez en corredores de
transporte de carga intermodal**

Publicación Técnica No. 544
Sanfandila, Qro, 2019

Esta investigación fue realizada por el Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos, Investigador Titular y Responsable Técnico del Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística (SiT-LOG), por el Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue titular de la Coordinación de Integración del Transporte y Logística, así como por el Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga, Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Se agradece la colaboración colaboración tanto del Ing. Juan Carlos Villa, como de la Dra. Sharada Vadali del Texas A&M Transportation Institute, por sus valiosas contribuciones. Del mismo modo, se agradece al M. en C. Jared Piña Barcenas, investigador de este instituto y al Ing, Enoch Luis Carlos Suriano de León estudiante de Maestría en Logística y Cadena de Suministro de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por su colaboración durante el desarrollo del proyecto. Finalmente, se hace un especial agradecimiento a la Lic. Flora Hammer por su invaluable apoyo en la identificación de áreas de oportunidad y sugerencias para la mejor implementación del modelo.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna titulado: “Análisis del desempeño en redes de transporte intermodal bajo consideraciones de costo y confiabilidad”, con número **TI 07/14**.

Contenido

Índice de figuras	v
Índice de tablas	vi
Sinopsis.....	viii
Abstract	ix
Resumen ejecutivo	xi
Introducción.....	1
Capítulo 1 Antecedentes	5
Capítulo 2 Enfoque de análisis.....	7
Capítulo 3 Ejemplo numérico	21
Conclusiones.....	27
Bibliografía	31

Índice de figuras

Figura I.1	Regiones con potencial para volverse <i>UVA Logística</i>	2
Figura 2.1	Corredor intermodal de Transporte de Carga	7
Figura 2.2	Costos dentro de la plataforma logística	10
Figura 2.3	Relación entre el costo de transporte y la distancia	13
Figura 2.4	Sistema esquematizado del proceso de transporte intermodal dentro de un Corredor de Transporte Intermodal	15
Figura 2.5	Proceso simplificado de transporte intermodal	15
Figura 3.1	Corredores intermodales analizados	21
Figura 3.2	Análisis comparativo de rutas	26

Índice de tablas

Tabla 3.1	Costos operativos	22
Tabla 3.2	Costos de uso de la plataforma logística	23
Tabla 3.3	Inventario de seguridad	23
Tabla 3.4	Variabilidad en los tiempos de tránsito	24

Sinopsis

Para mantenerse competitivos, los miembros de los sistemas de producción industrial han desarrollado avanzadas redes de suministro que están evolucionando de entregas justo a tiempo, a entregas justo en secuencia. El transporte intermodal está llamado a jugar un rol mayor. Sin embargo, ello requiere mejorar la fluidez en el movimiento de la carga. Actualmente en México no se tiene claro el nivel de confiabilidad por tramo involucrado a lo largo de los corredores de transporte intermodal. Desde una perspectiva sistémica, el presente trabajo propone un modelo matemático integrado. Su objetivo es servir de marco de referencia para modelar y pronosticar la fluidez de cadenas de suministro cuando utilizan el transporte intermodal de mercancías. Además, permite evaluar el impacto de las mejoras específicas en el desempeño logístico (tiempo, costo y confiabilidad de los tiempos de entrega) en el inventario de seguridad de las empresas. Se tuvo especial cuidado en poner el modelo propuesto al alcance de las pequeñas y medianas empresas (PyME). Para ello se diseñó una herramienta informática que facilita la implementación del modelo. El presente trabajo contribuye a demostrar la conexión clave entre un mejor desempeño de la cadena de suministro y su impacto positivo en el desarrollo económico.

Palabras clave: Fluidez de carga; variabilidad; confiabilidad; transporte intermodal; cadena de suministro.

Abstract

To remain competitive, members of industrial production systems have developed advanced supply networks that are evolving from just-in-time to just-in-sequence deliveries. Intermodal transport is called to play a greater role. However, this requires improving freight fluidity. Currently in Mexico the level of reliability by section involved along the intermodal freight transport corridors is not clear. From a systemic standpoint, this work proposes an integrated mathematical model. Its objective is to serve as a framework of reference for modeling and forecasting the flow of supply chains when using intermodal freight transport corridors. In addition, it allows evaluating the impact of specific improvements on logistics performance (time, cost and reliability of delivery times) to safety stocks of companies. A special care was taken to put the proposed model within the reach of small and medium-sized enterprises (SMEs). To this end, a computer tool was designed to facilitate the implementation of the model. The present work contributes to demonstrate the key connection between a better performance of the supply chain and its positive impact on economic development.

Key words: Freight fluidity; variability; reliability; intermodal transport; supply chain.

Resumen ejecutivo

Para mantenerse competitivos, los miembros de los sistemas de producción industrial han desarrollado avanzadas redes de suministro que están evolucionando de entregas justo a tiempo, a entregas justo en secuencia. En esta transformación, el transporte intermodal está llamado a jugar un rol mayor. Sin embargo, ello requiere mejorar la confiabilidad operativa y con ello, garantizar la fluidez en el movimiento de la carga. Actualmente en México no se tiene claro el nivel de confiabilidad por tramo y/o proceso involucrado a lo largo de los corredores de transporte intermodal.

Es importante considerar que la industria ha incrementado la variedad de productos y por lo tanto, el número de actores que intervienen en las cadenas de suministro. Este incremento en la complejidad logística, está exponiendo a los sistemas industriales a la vulnerabilidad generada por la variabilidad en el desempeño de los sistemas interactuando en un corredor de transporte intermodal. La variabilidad no solo afecta a los niveles de disponibilidad de los productos, sino también al costo logístico total. Por lo tanto, desde el punto de vista privado, la información sobre qué tan fluida es una solución de transporte de carga intermodal y por ende, que tanto contribuye la efectividad logística de una determinada cadena de suministro, es crítica. Pero también, desde el punto de vista público, contar con información estandarizada y confiable sobre el desempeño de los corredores de transporte intermodal, facilitaría las tareas de atracción de inversión, de diseño de planes de crecimiento, mantenimiento y desarrollo de la infraestructura. Mejorar la fluidez en el movimiento de la carga no sólo es de importancia estratégica para alcanzar la excelencia logística, sino también es importante cuando se busca incrementar la competitividad económica.

Es en este contexto y desde una perspectiva sistémica, el presente trabajo propone un modelo matemático integrado. Su objetivo es servir de marco de referencia integral para modelar y pronosticar la fluidez de cadenas de suministro cuando utilizan el transporte intermodal de mercancías. Además, permite evaluar el impacto de las mejoras específicas en el desempeño logístico (tiempo, costo y confiabilidad de los tiempos de entrega) en el inventario de seguridad de las empresas. Se tuvo especial cuidado en poner el modelo propuesto al alcance de las pequeñas y medianas empresas (PyME). Para ello se diseñó una herramienta informática que facilita la implementación del modelo. El presente trabajo contribuye a demostrar la conexión clave entre un mejor desempeño de la cadena de suministro y su impacto positivo en el desarrollo económico.

Introducción

Las cadenas de suministro son consideradas como un elemento crítico para el desarrollo económico. Como resultado del intercambio en el comercio mundial y las mejoras en el desempeño de los sistemas industriales, las cadenas de suministro hacen posible la transferencia de capitales privados hacia el sistema económico. A través de un mejor desempeño logístico de los sistemas industriales, las cadenas de suministro transfieren los incrementos de la productividad privada al sistema económico de las regiones. Pero al mismo tiempo, cuando un clúster de cadenas de suministro (*supply chain clustering*) de una región logra un desempeño sobresaliente, no solo mantiene negocios en la región, sino que también crea nuevas oportunidades de desarrollo. En ese sentido, un clúster de cadenas de suministro debe ser entendido como un sistema productivo que incorpora tanto los beneficios competitivos de los clúster industrial, como los derivados del enfoque integrado de cadena de suministro (*supply chain*).

La tendencia actual de los mercados maduros hacia restringir el libre flujo del comercio, están llevando al mundo hacia una nueva era económica global. Las regiones serán fundamentales y crecerán no solo por su capacidad para desarrollar su propia productividad económica, sino también por su capacidad para integrarse en red y formar parte de la nueva arquitectura económica. En este trabajo coincidimos en que "*los sistemas productivos no están desconectados de los territorios*" (Guerrero, Proulhac y Nierat, 2014), pero además, identificamos a las cadenas de suministro como los enlaces clave de la configuración dinámica de la competitividad industria-territorio (Cedillo-Campos et al., 2006).

De este modo, se está pasando de constituir Clústeres Logísticos (Sheffi, 2012), al de diseñar y desarrollar clústeres de cadenas de suministro (Cedillo-Campos, 2012; Huang y Xue, 2012). En estos últimos, se busca compartir la infraestructura de transporte y logística con múltiples empresas para incrementar la efectividad logística, reducir la huella de carbono e mejorar la resiliencia, entre otros. Un ejemplo operativo son los innovadores desarrollos logísticos diseñados e implementados por Ballot et al. (2014) en lo que ellos han llamado "*Internet Físico*". Una innovación que facilitará que las empresas pasen de llevar a cabo entregas justo a tiempo a entregas justo en secuencia con mayor efectividad.

La reducción de la variabilidad en los sistemas logísticos es un elemento clave de la competitividad y uno de los elementos clave que está impulsado la innovación en el sector. Existe una cada vez mayor imbricación entre conectividad, accesibilidad y el desarrollo regional ITF (2019). Las cadenas de suministro son los elementos de conexión entre las políticas de desarrollo regional (entidades públicas) y los modernos sistemas de producción y logística (entidades privadas). Ambas partes

buscan mejorar la fluidez en el movimiento de las personas y las mercancías. Como resultado, se impulsan áreas denominadas *UVA Logística* (regiones de Utilidad y Valor Agregado en Logística). Es el caso de la reciente alianza entre varios Estados mexicanos de la región Bajío para: “Consolidar al Bajío como una plataforma logística de manufactura, innovación y tecnología del más alto nivel” (Página 24, 2018).

Una *UVA Logística* es entendida por Cedillo-Campos (2018), como:

“Un espacio geográfico definido por sus importantes activos en infraestructura de transporte y de logística, donde los flujos de productos y servicios dentro de la región y hacia fuera de ella, muestran alta intensidad como resultado de un eco-sistema de negocios que promueve la inteligencia colectiva a través de cadenas de suministro que se articulan tanto con clúster industriales locales, como globales”.

Dentro de estas regiones, la fluidez en el movimiento de carga dentro de las cadenas de suministro es fundamental. Es por ello que aquí proponemos entenderla como:

El nivel de capacidad para lograr de forma sostenida en el tiempo, un flujo confiable, seguro y preciso de recursos físicos, financieros, humanos y de información, apoyando de manera efectiva los objetivos de la cadena de suministro.

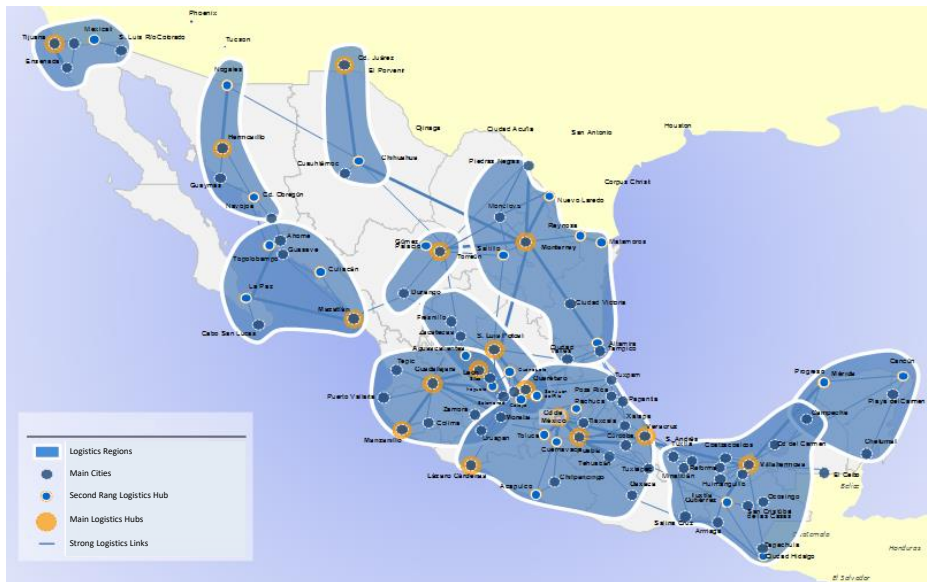


Figura I.1 Regiones con potencial para volverse *UVA Logística*
(Con base en: IDB, 2013)

El valor agregado logístico o “Valor Logístico” de medir la fluidez de una cadena de suministro, es fundamental si y sólo si vincula a los indicadores clave de desempeño de una organización específica, sector industrial o metas nacionales estratégicas. Así por ejemplo al momento de diseñar una cadena de suministro, el conocimiento de qué tan fluido es un Corredor de Transporte Intermodal de Mercancías (CoTIM), se vuelve crítico sólo hasta que se define la naturaleza de la carga, el par origen-destino y los objetivos de una determinada cadena de suministro. Es así que su nivel de importancia es diferente para cada tipo de cadena de suministro.

Dado que el modelo propuesto se utilizará para medir la fluidez en un CoTIM, el presente trabajo usa la definición propuesta por Cedillo-Campos et al. (2017b), quien la entiende como:

Franja geográfica dentro de la cual se transportan flujos de carga de forma mono o intermodal, tomando ventaja de la infraestructura, tecnología y los servicios logísticos de valor agregado entre dos o más nodos, que funcionan como orígenes, destinos o puntos de transferencia los cuales habitualmente se localizan dentro de una zona urbana.

Aunque la logística intermodal ofrece ventajas competitivas a la operación de las cadenas de suministro, existen retos que en su mayoría se derivan de la divergencia de perspectivas entre los actores del sector privado y aquellos, del sector público. Desde la perspectiva del sector privado, la necesidad competitiva de gestionar una mayor gama de productos con plazos de entrega cada vez más reducidos y con mayor seguridad, está llevando a los responsables de la toma de decisiones a centrarse únicamente en indicadores de desempeño con perspectiva de flexibilidad y rentabilidad de corto plazo. De ahí que se mantenga la amplia preferencia por el transporte carretero. Desde la perspectiva del sector público, las limitaciones jurisdiccionales de las fronteras estatales y nacionales mueven a los ingenieros y planificadores de diferentes agencias a diseñar y operar, desde un enfoque segmentado territorialmente, la infraestructura de transporte y logística (red de transporte, sistema de almacenamiento, plataformas logísticas, etc.), dejando de lado un enfoque “puerta a puerta” más efectivo (Bryan, 2015; Eisele y Villa, 2015; Pisarski, 2015).

En realidad, cada vez más se requiere de un enfoque de “*inteligencia colectiva en logística*”. Es decir, favorecer el incremento de la “*capacidad para co-crear soluciones a retos logísticos complicados mediante la sinergia del eco-sistema de personas y organizaciones involucrados, quienes a través de compartir constantemente información, conocimiento y mejores prácticas, consiguen un desempeño conjunto que individualmente les sería imposible alcanzar*” (Cedillo-Campos, 2018). De hecho, un elemento clave que hasta hoy se ha despreciado, es el aprovechamiento de la interconexión del conocimiento y prácticas entre los tomadores de decisión de alto nivel, así como entre el personal operativo y entre los dos niveles anteriores. Todos ellos cotidianamente desarrollan soluciones que rara

vez son capitalizados como “soluciones estándar” por las organizaciones (Pérez-Salazar et al., 2018).

Desde esta perspectiva, el presente documento propone un marco de análisis matemático para modelar y pronosticar la fluidez de la cadena de suministro cuando se utiliza cualquier combinación de transporte intermodal de mercancías. El presente enfoque permite la flexibilidad espacial y temporal para permitir el análisis de una amplia gama de rutas intermodales. Del mismo modo, el modelo aquí propuesto es capaz de evaluar la fluidez de la cadena de suministro integrada por diferentes miembros ubicados en diferentes regiones (diferentes escalas geográficas), utilizando diferentes combinaciones de modos de transporte de mercancías y sirviendo a diferentes sectores industriales, utilizando métricas comunes para todas las cadenas de suministro.

Operacionalmente, este trabajo tuvo en cuenta a las pequeñas y medianas empresas (PYME) como elementos clave de la moderna competitividad. Actualmente es reconocido que una densa red de pequeños fabricantes es fundamental para el proceso de llevar un producto desde el concepto al mercado final. Con la idea de proponer una herramienta útil para las PYME, se desarrolló una herramienta informática de medición de la fluidez de la cadena de suministro, amigable y de bajo costo. La misma, permite comparar diferentes soluciones de transporte intermodal de mercancías cuando las PYME están seleccionando la mejor ruta para entregar sus productos. En consecuencia, consideramos que los resultados de este caso podrían aplicarse con éxito a un amplio número de empresas para mejorar su desempeño logístico.

El resto del documento está organizado como sigue. La Sección 2 analiza brevemente los desafíos de diseñar soluciones de transporte intermodal considerando un enfoque “*puerta a puerta*”, en el marco de cadenas de suministro operando internacionalmente. La Sección 3 describe paso a paso el modelo matemático propuesto. En la Sección 4, se discuten los resultados obtenidos a través del análisis de desempeño de dos diferentes CoTIM. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones obtenidas y los análisis relacionados con la contribución del modelo, así como futuras líneas de investigación.

1 Antecedentes

Con el resurgimiento de los nacionalismos exacerbados, la “*Globalización Inversa*” se está convirtiendo en una tendencia ante la cual las empresas deben reorganizar sus cadenas de suministro para incrementar su “*contenido local*”. Pero al mismo tiempo, mitigar el “*Efecto Frontera*” que se propaga de forma dinámica a través de las cadenas de suministro (Cedillo-Campos et al., 2014).

Hoy en día es claro que desde que la manufactura se volvió una actividad con intereses e impactos tanto a nivel local (ciudad) y nacional (país), como regional (bloque económico) y global. La competencia no es entre empresas individuales y sus cadenas de suministro, sino entre regiones (ver concepto de *UVA Logística* en 1 Introducción). Estamos ante un fenómeno global en donde los países tienden hacia la fragmentación en regiones, pero que a su vez, dichas regiones buscan mantenerse agregadas para alcanzar una mayor viabilidad competitiva. Es el emblemático caso de Cataluña que busca su separación del Reino de España, pero que sin embargo, sigue interesada en mantenerse dentro del marco de la Unión Europea tratando de evitar el “*Efecto Frontera*”. Un ejemplo de consecuencias potenciales de dicho efecto en la fluidez de las cadenas de suministro, son los que se esperan como resultado del proceso conocido como BREXIT entre Gran Bretaña y la Unión Europea (The Guardian, 2019).

En todos los casos, sincronizar el flujo de mercancías para incrementar el desempeño económico sostenible, es la meta. La entrega sincronizada de componentes en tiempo, cantidad y forma correctos directamente en el punto de consumo, es uno de los más grandes retos logísticos. La dificultad estriba en sincronizar los flujos de todas las organizaciones involucradas en un proceso denominado justo en secuencia o JIS por sus siglas en inglés (Cedillo-Campos et al., 2017a). Se trata de la evolución de los sistemas justo a tiempo (JIT por sus siglas en inglés) donde el enfoque es hacer sólo lo que se necesita, cuando es preciso, y en la cantidad exacta (Toyota, 2014), pero además, en la secuencia de producción requerida.

Si bien los JIS demuestran mejoras sustanciales con respecto a la reactividad y la rentabilidad de la cadena de suministro operando bajo sistemas JIT, los primeros son más sensibles a las interrupciones o a la variabilidad de las entregas (Thun et al, 2007; Thun et al, 2011; Cedillo-Campos et al., 2017a). En consecuencia, frente a los crecientes retos para sincronizar los flujos de forma efectiva, es particularmente importante para los tomadores de decisiones evaluar de una forma dinámica y precisa, la variabilidad, las interrupciones, así como la propagación de ambas a través de las cadenas de suministro (Cedillo-Campos et al., 2014; Bueno y Cedillo-Campos, 2014). Es en este contexto, donde Hausman et al. (2013) dejan

claro que para mejorar el desempeño de la logística se "*requiere un análisis muy detallado de los procesos involucrados*". Desde esta perspectiva de análisis detallado, el presente trabajo analiza los procesos implicados en el diseño y operación de una solución de transporte intermodal.

2 Enfoque de análisis

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), Transporte Intermodal de Carga significa:

"El movimiento de mercancías (en una misma unidad de carga) mediante sucesivos modos de transporte sin la manipulación de los mismos cuando se cambia de modo. El vehículo puede ser un vehículo que circule por carretera o por ferrocarril o por agua. El movimiento de retorno de contenedores vacíos, vehículos de remolque de mercancías por carretera que de igual forma van vacíos, estos no son parte del transporte intermodal, ya que no son bienes los que se están moviendo. Estos movimientos están asociados con el transporte intermodal y es deseable que los datos sobre los movimientos vacíos se recojan junto con datos sobre el transporte intermodal" (OCDE, 2003).

En consecuencia, los diferentes modos de transporte comparten recursos e integran procesos con el fin de mejorar el desempeño de las cadenas de suministro que lo utilizan. Para el presente trabajo, con base en una extensa revisión de la literatura, así como de trabajo de campo, se identificaron las variables clave del proceso. Si bien el desempeño logístico puede ser medido con diferentes indicadores clave de desempeño (KPI, *key performance indicators*), como el costo, la frecuencia del servicio, tiempo de servicio, la fiabilidad tiempo de espera, la flexibilidad y la seguridad (Bauthe y Bouffieux, 2008), en esta investigación, se consideraron cinco componentes para evaluar la fluidez de la cadena de suministro: i) tiempo de tránsito; ii) confiabilidad en el tiempo de tránsito, iii) costo; iv) seguridad; y v) riesgo (Katsikides, 2014). Como primera etapa, se definió una red básica de transporte intermodal para analizar su desempeño (véase la figura 2).

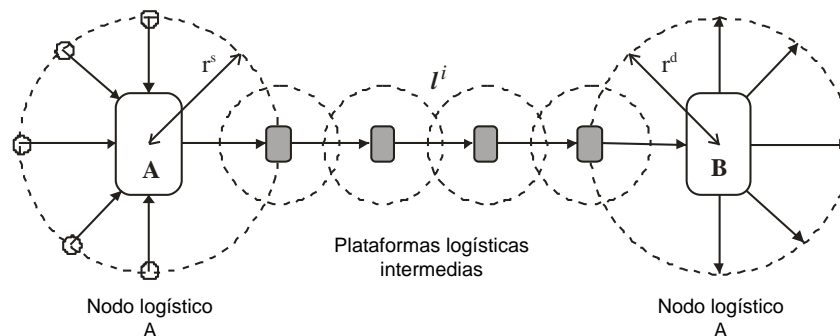


Figura 2.1 Corredor intermodal de Transporte de Carga
(Elaboración propia con base en: Cheng, 2012).

Debido al importante rol que en el modelo propuesto juegan las plataformas logísticas, es importante definir lo que se entiende por este tipo de infraestructura. De acuerdo con la Asociación Europea de Plataformas Logísticas (AEPL), una plataforma logística es:

"un área definida dentro de la cual todas las actividades relacionadas con el transporte, la logística y la distribución de mercancías, tanto para el tránsito nacional como internacional, son llevadas a cabo por diversos operadores con fines comerciales. Los operadores pueden ser propietarios o arrendatarios de edificios e instalaciones (almacenes, centros de distribución, áreas de almacenamiento, oficinas, servicios de camiones, etc.) que se han construido ahí."

2.1 Costo Total

Para este trabajo y con base en los trabajos de Janic (2007) y de Cheng (2012), el costo total se correlaciona con el volumen (valor y riesgo) de la carga transportada, la distancia y el tiempo (tiempo de tránsito, así como su confiabilidad). De este modo, por ejemplo, si se requiere analizar la factibilidad de utilizar un determinado CoTIM, se propone tomar en cuenta seis componentes generales: i) costo de diseño de la solución intermodal; ii) costo de administración de la solución; iii) costo de uso de la solución (costo de los trámites y permisos); iv) costo fijo de la solución; v) costo operacional de la solución; vi) costo aleatorio de riesgo de la solución.

El costo de diseño es el resultado del análisis de mercado y del desarrollo de un análisis técnico, teniendo en cuenta las diferentes opciones de recolección de la carga desde cada origen (regularmente en zona urbana), hasta la plataforma logística, centro logístico o Hub más cercano. También incluye la planificación del transporte, el costo y el tiempo de análisis, así como el trabajo de coordinación con las diferentes entidades involucradas para asegurar la calidad del servicio.

Los costos de administración implican la coordinación y seguimiento de los miembros durante el desarrollo del proceso de transporte. Como tal, los costos derivados de la utilización de servicios de consultoría a la medida o el uso de software especializado están aquí integrados. El costo de uso se refiere al costo directo de licencias y autorizaciones para el uso del Corredor de Transporte Intermodal de Mercancías o CoTIM (flujo de documentos). Los costos fijos son los costos considerados por la compañía para hacer uso del transporte intermodal de mercancías, entre los que podemos encontrar: i) recursos humanos; ii) recursos materiales; iii) recursos financieros; y iv) operaciones de mantenimiento. El costo operacional debe ser considerado como derivado del desarrollo de la solución de transporte intermodal de mercancías en el corredor analizado, estos pueden ser: peajes, tasas, cargos por servicios logísticos tercerizados, etc. Por último, y dados los múltiples elementos que pueden afectar las entregas de mercancía, el costo por riesgo aleatorio considera aquellos costos realizados con motivo de acontecimientos no planificados originados por la naturaleza o por el ser humano (Cedillo-Campos y Cedillo-Campos, 2015). Dichos acontecimientos pueden generar

disrupciones o perturbaciones en la fluidez del transporte y almacenes. Este tipo de costos incluye seguros, multas, gastos médicos entre otros. De esta forma, la ecuación general de costos queda como sigue (ver ecuación 1):

$$TC(Q, l, t) = C_{DC} + C_{MC} + C_{UC} + C_{FC} + C_{OC}(Q, l, t) + C_{RC} \dots \dots \dots (1)$$

Dónde:

TC	= costo total;
Q	= toneladas transportadas;
l	= distancia;
t	= tiempo;
C_{DC}	= costo del diseño del CoTIM;
C_{MC}	= costo de administración del CoTIM;
C_{UC}	= costo de uso del CoTIM;
C_{FC}	= costo fijo del CoTIM;
C_{OC}	= costo operacional del CoTIM;
C_{RC}	= costo aleatorio de riesgo del CoTIM.

2.2 Costo operacional

De manera específica nos enfocaremos en uno de los componentes de la ecuación general, el cálculo del costo operacional (C_{OC}). Muchos de los costos, retrasos y dificultades de un CoTIM se producen en el punto de ruptura de la carga, incluso si los equipos y procesos que agilizan la operación son razonablemente eficaces. Para el cálculo de los costos operacionales (C_{OC}), desarrollamos un conjunto de supuestos.

El modelo considera que las mercancías se recogen dentro del área de influencia o “*hinterland*” r^s de una plataforma logística **A**, para ser enviadas y distribuidas dentro del área de influencia o “*hinterland*” r^d de una plataforma **B**. Donde n es el número de veces que la carga se transfiere a un modo de transporte, los cuales pueden ser diferentes entre ellos o no (ejemplo: autotransporte-autotransporte o autotransporte-avión). La distancia entre cada sección i del corredor es l^i ($i = 1, 2, \dots, n$).

El costo de transporte para cada vehículo se define por C_y^s, C_y^i, C_y^d . La capacidad de carga de cada vehículo en cada sección del CoTIM es respectivamente definida como q_0^s, q_0^i, q_0^d . El uso eficiente de la capacidad de carga disponible para cada vehículo en cada sección del CoTIM se define por $\alpha^s, \alpha^i, \alpha^d$. El periodo de espera o demora para cada transbordo es definido por t_w^s, t_w^i, t_w^d . El tiempo de tránsito (o tiempo de viaje) entendido como el tiempo total que transcurre entre la colecta de un envío en un punto de partida y el punto de entrega final, se define por TT_{Total} . La

tasa de uso del CoTIM se define por ψ^s, ψ^i, ψ^d , donde el valor del tiempo es definido por τ . De esta manera, los costos operacionales se calculan como sigue:

$$C_{oc}(Q, l, t) = \left[\frac{\psi^s}{q_0^s \alpha^s} + \sum_{i=1}^n \frac{\psi^i}{q_0^i \alpha^i} + \frac{\psi^d}{q_0^d \alpha^d} + r^s C_y^s + r^d C_y^d + \sum_{i=1}^n l^i C_y^i + TT_{Total} * \tau \right] Q + \sum_{i=1}^{n+1} L_z^i + SS \quad \dots (2)$$

El costo promedio de carga y descarga (costos relacionados con las operaciones en el interior de una plataforma logística) en tiempo y toneladas es L_z^i que considera las n veces que la carga se transfiere. Este costo se compone por los tipos de costos que están relacionados con el flujo de procesos dentro de la plataforma logística, los cuales son: i) costos de manejo de la carga; ii) costo de almacenamiento; iii) costo por daños a la carga; y iv) costo de transporte dentro de la plataforma; (véase la figura 3).

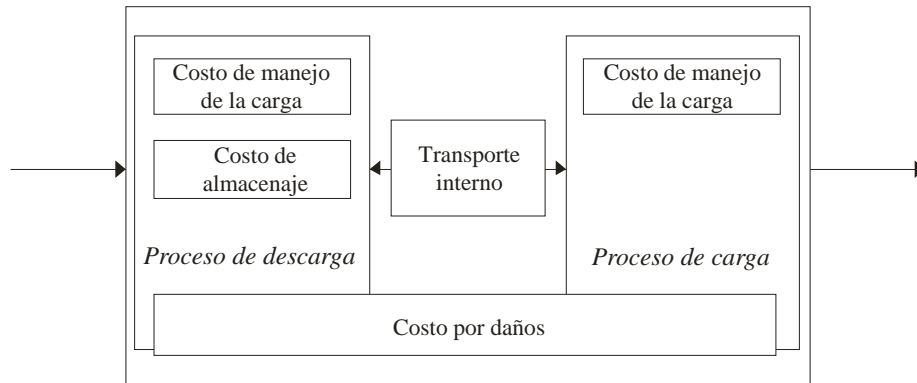


Figura 2.2 Costos dentro de la plataforma logística

2.2.1 Costos logísticos de la plataforma

Los costos de plataforma logística L_z^i , están relacionados con la utilización de la infraestructura durante el proceso de transbordo de la carga de un vehículo a otro (terminales marítimas, puertos, aeropuertos, puntos fronterizos, etc.). En este sentido es que se propone un marco analítico para la evaluación de los costos. Se puede argumentar que esta estructura simplificada no se aplica a todas las plataformas logísticas, especialmente las mas recientes que ofrecen mayor número de servicios de valor agregado (ensamblado, etiquetado, almacenaje, embalaje, administración de inventario, despacho en aduanas, y otras funciones relacionadas). Sin embargo, es importante recordar que nuestro objetivo es identificar y medir, (desde un punto de vista sistémico) sólo los procesos estándar

involucrados. Es así como los costos logísticos de la plataforma L_z^i se calculan de la siguiente manera:

$$L_z^i = C_{Hf} + C_{stg} + C_{tr} + C_c + C_d \dots\dots\dots (3)$$

Dónde:

- C_{Hf} = costo por manejo (dólares);
- C_{stg} = costo de almacenamiento;
- C_{tr} = costo del transporte interno;
- C_c = costo de consolidación;
- C_d = costo de los daños.

2.2.1.1 Costo de manejo

Con base en Richarson (2004), los costos de manipulación o de manejo se entienden como "el número total de toques de la mercancía". Por lo tanto, para este caso, el número de toques a la mercancía representa el esfuerzo necesario para descargar, clasificar, almacenar y cargar mercancía en diferentes vehículos. De este modo, el costo de manejo C_{Hf} se calcula de la siguiente manera:

$$C_{Hf} = \left[\varphi(q_0 * \alpha) * \frac{Q}{(q_0 * \alpha)} \right] \dots\dots\dots (4)$$

Dónde:

- φ = valor monetario equivalente al tiempo necesario para mover una tonelada (dólares);
- q_0 = capacidad de carga en cada vehículo y en cada sección del CoTIM (ton);
- α = uso de la capacidad de carga disponible de cada vehículo y en cada sección del CoTIM (%);
- Q = toneladas transportadas (ton).

2.2.1.2 Costo de almacenamiento

Por lo general la carga puede ser almacenada en la plataforma logística durante ciertos días sin costo. Después de este período de tiempo, un costo extra por día debe ser pagado. En cualquier caso, optamos por utilizar una variable de modo que el número de días (según la plataforma) pueda ser ajustado. El costo de almacenamiento en la plataforma C_{stg} se calcula de la siguiente manera:

$$C_{stg} = \begin{cases} \text{if } \varepsilon > 10: (\varepsilon - 10) * \theta * Q \\ \text{if } \varepsilon \leq 10: 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

Dónde:

- D = tiempo de almacenamiento en la plataforma logística (días);
- ε = tiempo de almacenamiento sin costo (días);
- θ = costo por día de almacenamiento sin costo después de los D días (dolar/dia/ton).

2.2.1.3 Costo del transporte interno

El costo del transporte interno está relacionado con el movimiento de las unidades de transporte dentro de las diferentes áreas de la plataforma logística. El costo del transporte interno C_{tr} se calcula de la siguiente forma:

$$C_{tr} = Q * a \dots\dots\dots (6)$$

Dónde:

- a = costo por tonelada movida dentro de la plataforma logística (dólar/ton);
- Q = toneladas transportadas (ton).

2.2.1.4 Costo de consolidación

El costo de consolidación representa el esfuerzo hecho para integrar las unidades a transportar (pallets, cajas, etc.) en otro vehículo. El costo de consolidación C_c se calcula como sigue:

$$C_c = (y * \tau) * \frac{Q}{q_0 * \alpha} \dots\dots\dots (7)$$

Dónde:

- y = porcentaje de ciclo de carga/descarga incurrido en la selección de las unidades (pallets, cajas, etc.) a cargar (horas)
- τ = valor monetario del tiempo (dólar/hora).

2.2.1.5 Costo por daños

El costo por daños está relacionado con el porcentaje de pérdidas derivadas de los daños causados a la carga a lo largo de los diferentes procesos como la descarga, almacenamiento, transporte interno, y la re-carga dentro de la plataforma logística. Los costos por daños C_d se calculan como sigue:

$$C_d = \phi_l * Q * p \dots\dots\dots (8)$$

Dónde:

- ϕ_{pl} = tasa de daños previos (%);
- ϕ_l = tasa de daños en la carga y descarga (%);
- p = valor declarado de la carga (dólares/ton).

Los costos derivados del uso de una o varias plataformas logísticas son un elemento crítico en la definición de una ruta de transporte intermodal. De hecho, influye en la pendiente de costos y consecuentemente, en el costo total de la trayectoria definida (véase la figura 4).

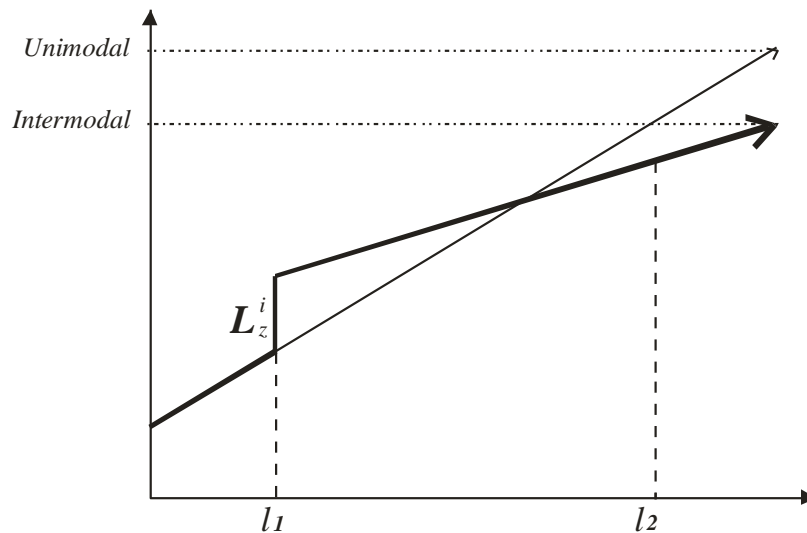


Figura 2.3 Relación entre el costo de transporte y la distancia
(Con base en: Janic, 2007).

2.3 Variabilidad

Es generalmente aceptado que la reducción de la variabilidad en los tiempos de entrega puede ofrecer beneficios significativos para mejorar la efectividad logística (Dullaert y Zamparini, 2013). Con base en Germain et al. (2008) y Dröge (2008), la variabilidad en la cadena de suministro puede ser definida como:

La variación en el flujo de mercancías de entrada y/o de salida de un proceso o como la irregularidad en los tiempos entrada, producción y salida de una entidad en un sistema.

Claramente esta perspectiva puede ser usada para analizar un CoTIM si lo consideramos como un sistema en su conjunto.

Por ejemplo, un servicio de transportación intermodal que realiza envíos frecuentes entre un clúster industrial **A** y un clúster industrial **B**, tendrá (típicamente) tiempos de transporte diferentes en cada ocasión. Si bien puede ser un “trayecto regular”, en cada ocasión intervienen variables aleatorias que afectan el desempeño. Incluso si la empresa siempre utiliza el mismo CoTIM, los tiempos de tránsito pueden variar en mayor o menor medida. Un factor clave de variación es el número de veces que la mercancía debe cambiar o transbordar diferentes vehículos de transporte. Debido a que existen muchos otros factores induciendo variabilidad, los tiempos de tránsito deben ser analizados como una variable aleatoria. En consecuencia, la medición del coeficiente de variación o CV es importante. El CV de un CoTIM se calcula siguiendo la ecuación general definida por la ecuación 9:

$$CV = \frac{\text{Standard Deviation}}{\text{Mean}} \dots\dots\dots (9)$$

Al mismo tiempo el factor de variabilidad (V) se puede calcular como:

$$V = CV^2 = \frac{cv_a^2 + cv_c^2}{2} \dots\dots\dots (10)$$

Dónde:

- CV_a^2 = CV entre llegadas;
- CV_c^2 = CV relacionadas al tiempo para procesar cada lote en cada plataforma logística de la sección *i* del CoTIM.

El sistema puede ser esquematizado (véase la figura 5) y simplificado con base en la Ley de Little (véase la figura 6). Entonces, el tiempo necesario para que un envío haga un viaje completo desde el patio de una planta de fabricación localizada en un punto **A**, hasta el almacén de una planta de fabricación en el punto **B**, por ejemplo, involucra entre otros, el número de transbordos en cada plataforma logística.

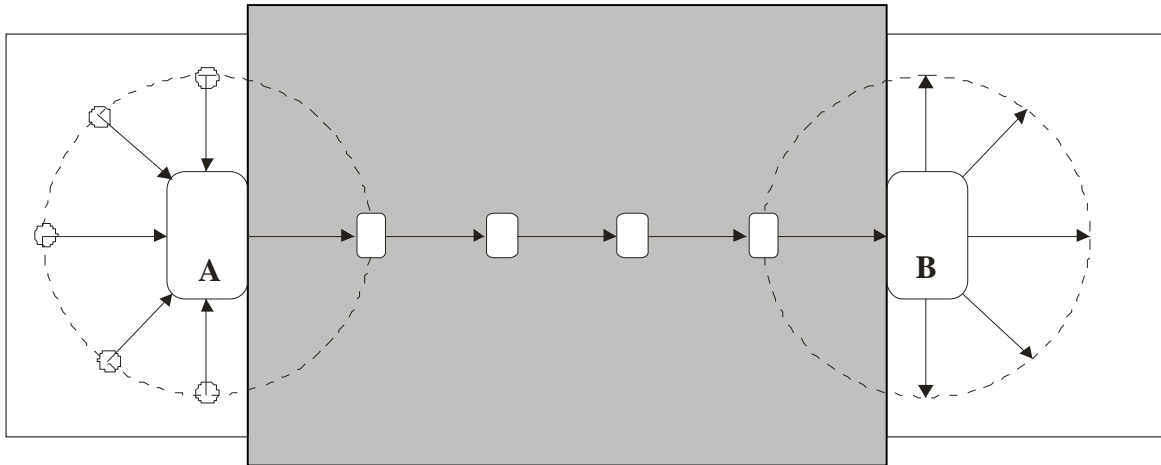


Figura 2.4 Sistema esquematizado del proceso de transporte intermodal dentro de un Corredor de Transporte Intermodal

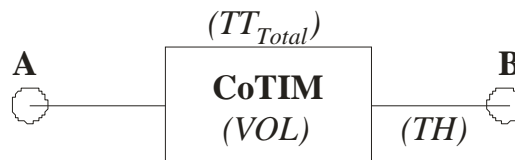


Figura 2.5 Proceso simplificado de transporte intermodal

La Ley de Little es un modelo analítico crucial que forma parte de la caja de herramientas para el análisis de la cadena de suministro (Hopp, 2003). Con base en este enfoque, fue posible expresar el tonelaje de la carga en tránsito dentro del sistema de la siguiente manera:

$$VOL = TH * TT_{Total} \dots \dots \dots (11)$$

Donde:

- VOL = tonelaje promedio de carga transportada en el tiempo de tránsito (Ton);
- TH = flujo de carga de salida promedio transportada por unidad de tiempo;
- TT_{Total} = promedio de tiempo de tránsito.

De este modo, el tiempo de tránsito total (TT_{Total}), tomando en cuenta las demoras, se calcula de la siguiente manera:

$$TT_{Total} = WT + T \dots\dots\dots (12)$$

Dónde:

- WT = retraso por cuestiones como transbordo, proceso de documentación en la plataforma entre otros (horas);
- T = tiempo promedio efectivo de transporte por unidad de carga en cada sección del CoTIM (horas).

Desde la perspectiva de la variabilidad, el retraso en una sección del CoTIM puede ser calculado como:

$$WT = V * U * T \dots\dots\dots (13)$$

Dónde:

- V = factor de variabilidad (véase la ecuación 10);
- U = factor de utilización;
- T = tiempo promedio efectivo de transporte por unidad de carga en cada sección del CoTIM (horas).

El factor de utilización (U) es una función de la utilización de una sección del CoTIM, y se calcula de la siguiente manera:

$$U = \left(\frac{a_r}{k}\right) * (k * y + s) \dots\dots\dots (14)$$

Dónde:

- a_r = tasa de llegada igual a: $\frac{Q}{q_0 * \alpha}$;
- k = tamaño del lote (capacidad de carga media de los vehículos utilizados);
- y = porcentaje de ciclo de carga/descarga incurrido en la selección de unidades de carga (horas);
- s = tiempo para realizar un transbordo (horas).

En consecuencia, a partir de un enfoque más amplio, la demora en cada sección del CoTIM se puede calcular de la siguiente manera:

$$WT = \left(\frac{CV_a^2 + CV_c^2}{2} \right) \left(\frac{a_r}{k} \right) (k * y + s) * T \dots\dots\dots (15)$$

De la ecuación 2, el tiempo promedio efectivo de transporte por unidad de carga en cada sección del CoTIM (T) se puede calcular de la siguiente manera:

$$T = \left(\frac{r}{v} \right) \dots\dots\dots (16)$$

Entonces, la velocidad promedio de cada vehículo cargado usado en cada sección del CoTIM es definida como v^s , v^i , v^d , donde v^s es la velocidad promedio en la sección r^s (ruta desde el origen hasta la primer plataforma logística o punto fronterizo o puerto marítimo donde la carga será descargada y embarcada en otro vehículo de transporte); v^i es la velocidad promedio en la sección i (véase la figura 2); y v^d es la velocidad promedio en la sección r^d (ruta desde la siguiente plataforma logística o punto fronterizo o puerto marítimo, hasta el punto final de entrega). Es así que el cálculo del tiempo de tránsito (TT) a partir de un enfoque de variabilidad, puede ser resuelto de la siguiente manera:

Para la sección r^s :

$$TT^s = \left[\left(\frac{CV_a^2 + CV_c^2}{2} \right) * \left(\frac{a_r^s}{k^s} \right) * (k^s * y^s + s^s) + 1 \right] * \left(\frac{r^s}{v^s} \right) \dots\dots\dots (17)$$

Para la sección r^d :

$$TT^d = \left[\left(\frac{CV_a^2 + CV_c^2}{2} \right) * \left(\frac{a_r^d}{k^d} \right) * (k^d * y^d + s^d) + 1 \right] * \left(\frac{r^d}{v^d} \right) \dots\dots\dots (18)$$

Para la sección i :

$$\sum_{i=0}^n TT^i \dots\dots\dots (19)$$

Dónde:

$$TT^i = \left[\left(\frac{CV_a^2 + CV_c^2}{2} \right) * \left(\frac{a_r^i}{k^i} \right) * (k^i * y^i + s^i) + 1 \right] * \left(\frac{l^i}{v^i} \right) \dots\dots\dots (20)$$

Como resultado, el tiempo de tránsito total (TT_{Total}) se calcula de la siguiente manera:

$$TT_{Total} = TT^s + TT^d + \sum_{i=1}^n TT^i + \sum_{i=1}^{n+1} \varepsilon^i \dots\dots\dots (21)$$

2.4 Inventario de seguridad

Con el fin de medir el impacto específico del desempeño de un CoTIM dado en el stock de seguridad, este trabajo consideró la propuesta analítica de Chopra y Meindl (2012). Dichos autores proponen que para calcular el stock de seguridad (SS) se debe tener en cuenta la desviación estándar de la demanda media diaria durante el tiempo de tránsito (σ_{DDTT}) de la siguiente manera:

$$SS = F_s^{-1}(CSL) * \sigma_{DDTT} \dots\dots\dots (22)$$

Dónde:

- F_s^{-1} = distribución de Gauss inversa;
- CSL = nivel de servicio al cliente;
- σ_{TT} = desviación estándar del tiempo de tránsito.

Además, la σ_{DDTT} se puede calcular sobre la base de lo propuesto por Fetter y Dalleck (1961) de la siguiente manera:

$$\sigma_{DDTT} = \sqrt{TT_{Total} * \sigma_D^2 + D^2 * \sigma_{TT_{Total}}^2} \dots\dots\dots (23)$$

Dónde:

TT_{Total} = tiempo total de tránsito;
 D = demanda promedio;
 σ_D^2 = varianza de la demanda;
 $\sigma_{TT_{Total}}^2$ = varianza del tiempo total de tránsito.

3 Ejemplo numérico

Con el fin de demostrar la aplicabilidad y probar la robustez del modelo propuesto, se eligió un caso para ejemplificar nuestra propuesta analítica. Se consideró un OEM (Original Equipment Manufacturer o Fabricante de Equipo Original) de la industria automotriz, el cual provee una variedad de componentes bajo una política justo en secuencia. Para evaluar la mejor ruta, se definieron dos potenciales CoTIM.

La compañía ABC desea entregar 1,000 toneladas de componentes, para ello se asignó un valor por tonelada. Los costos operativos, los costos de las plataformas logísticas, comportamiento del inventario de seguridad de la variabilidad de los tiempos de tránsito se muestran en las tablas de la 1 a la 4 (véase las rutas A y B en figura 7).

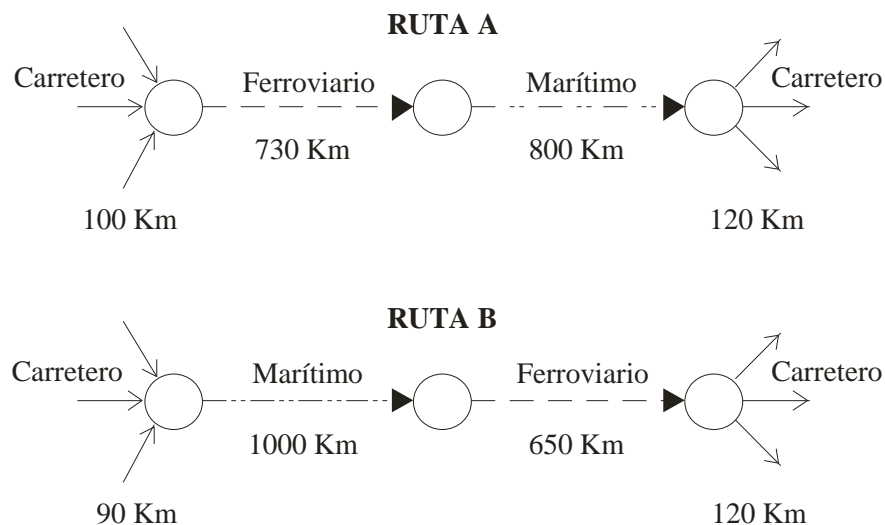


Figura 3.1 Corredores intermodales analizados

Tabla 3.1 Costos operativos

Variable	Descripción	Ruta A	Ruta B
r^s	Tamaño del área de influencia en la región de salida (Km)	80.00	90.00
r^d	Tamaño del área de influencia en la región de destino (Km)	110.00	120.00
l^i	Longitud de la sección i del corredor (Km)	730.00	1,000.00
l^j	Longitud de la sección j del corredor (Km)	800.00	650.00
β^A	Eficiencia de recorrido en la región A	1.00	1.00
β^B	Eficiencia de recorrido en la región B	1.00	1.00
C_y^s	Costo de transporte por vehículo usado en la región de salida A (Dólares/Ton-Km)	0.30	0.30
C_y^d	Costo de transporte por vehículo usado en la región de destino B (Dólares/Ton-Km)	0.30	0.30
C_y^1	Costo de transporte por vehículo usado en la sección 1 del corredor (Dólares/Ton-Km)	0.08	0.05
C_y^2	Costo de transporte por vehículo usado en la sección 2 del corredor (Dólares/Ton-Km)	0.06	0.08
v^s	Velocidad promedio de operación de cada vehículo en la región de salida A (Km/Hr)	50.00	35.00
v^d	Velocidad promedio de operación de cada vehículo en la región de destino B (Km/Hr)	50.00	40.00
v^1	Velocidad promedio de operación de cada vehículo en la sección 1 (Km/Hr)	80.00	45.00
v^2	Velocidad promedio de operación de cada vehículo en la sección 2 (Km/Hr)	50.00	95.00
q_0^s	Capacidad de carga de los vehículos usados en la región de salida A (Ton)	20.00	20.00
q_0^d	Capacidad de carga de los vehículos usados en la región de destino B (Ton)	20.00	20.00
q_0^1	Capacidad de carga de los vehículos usados en la sección 1 del corredor (Ton)	200.00	1,000.00
q_0^2	Capacidad de carga de los vehículos usados en la sección 2 del corredor (Ton)	1,000.00	200.00
α^s	Eficiencia en el uso de la capacidad de carga de los vehículos en la región de salida (%)	0.80	0.80
α^d	Eficiencia en el uso de la capacidad de carga de los vehículos en la región de destino (%)	0.70	0.75
α^1	Eficiencia en el uso de la capacidad de carga de los vehículos en la sección 1 (%)	0.85	0.80
α^2	Eficiencia en el uso de la capacidad de carga de los vehículos en la sección 2 (%)	0.80	0.85
ψ^s	Tasa de utilización del CoTIM en la región de salida (Dólares)	0.00	0.00
ψ^d	Tasa de utilización del CoTIM en la región de destino (Dólares)	0.00	0.00
ψ^1	Tasa de utilización del CoTIM en la sección 1 (Dólares)	100.00	150.00
ψ^2	Tasa de utilización del CoTIM en la sección 2 (Dólares)	240.00	100.00

Tabla 3.2 Costos de uso de la plataforma logística

Variable	Descripción	Ruta A	Ruta B
φ^1	Tiempo equivalente en unidades monetarias necesitadas debido a toques a la mercancía en el nodo 1 (Dólares/Ton)	10.00	10.00
ε^1	Tiempo de almacenaje en la plataforma logística (Días)	1.00	0.00
θ^1	Costo por día de almacenaje después de 10 días (Dólares/Día/Ton)	10.00	10.00
a^1	Costo por tonelada movida dentro de la plataforma logística (Dólares/Ton)	35.00	35.00
y^1	Tasa del ciclo de carga/descarga incurrido en la selección de las unidades (Horas)	1.00	1.00
ϕ_{pl}^1	Daños previos a la carga (%)	0.00	0.00
ϕ_l^1	Daños al momento de cargar (%)	0.01	0.01
p^1	Precio del transporte (Dólar/Ton)	4,000.00	4,000.00
D	Número de días de almacenaje	10.00	10.00

Tabla 3.3 Inventario de seguridad

Fecha	Opción 1	Opción 2	Demanda (Ton)
	Tiempo total (Días)	Tiempo total (Días)	
14/03/2014	3	2	90.00
28/05/2014	4	3	100.00
15/07/2014	3	3	110.00
22/09/2014	4	3	95.00
15/02/2015	4	2	90.00
CSL	0.90	0.90	

Tabla 3.4 Variabilidad en los tiempos de tránsito

Variable	Descripción	Ruta A	Ruta B
CV_{as}^2	Entre llegadas en la región de salida A	0.10	0.10
CV_{ad}^2	Entre llegadas en la región de destino B	0.10	0.10
CV_{a1}^2	Entre llegadas dentro de la sección 1 del CoTIM	0.20	0.40
CV_{a2}^2	Entre llegadas dentro de la sección 2 del CoTIM	0.30	0.50
CV_{cs}^2	Entre proceso de cada lote en la plataforma de salida A	0.10	0.10
CV_{cd}^2	Entre proceso de cada lote en la plataforma de llegada B	0.10	0.20
CV_{c1}^2	Entre proceso de la plataforma intermedia 1	0.10	0.10
CV_{c2}^2	Entre proceso de la plataforma intermedia 2	0.10	0.10
k^s	Tamaño del lote (capacidad de carga promedio de los vehículos) en la región de salida A	1.00	1.00
k^d	Tamaño del lote (capacidad de carga promedio de los vehículos) en la región de llegada B	1.00	1.00
k^1	Tamaño del lote (capacidad de carga promedio de los vehículos) en la sección 1	1.00	1.00
k^2	Tamaño del lote (capacidad de carga promedio de los vehículos) en la sección 2	1.00	1.00
S^s	Tiempo para transbordo en la región de salida A	0.01	0.02
S^d	Tiempo para transbordo en la región de llegada B	0.01	0.01
S^1	Tiempo para transbordo en la sección 1A	0.01	0.01
S^2	Tiempo para transbordo en la sección 1A	0.01	0.02

Como resultado, tanto la variabilidad de los tiempos de tránsito del transporte marítimo, así como los costos de uso de la plataforma logística se identificaron como los principales factores de costo.

Tanto la calidad de los servicios de logística (CSL), como los costos de uso de las plataformas logísticas, son un elemento clave de competitividad. Es ampliamente conocido que las empresas automotrices son muy sensibles las variaciones en la confiabilidad del transporte ferroviario y marítimo, situación que resultó determinante en el caso analizado (véase la figura 8).

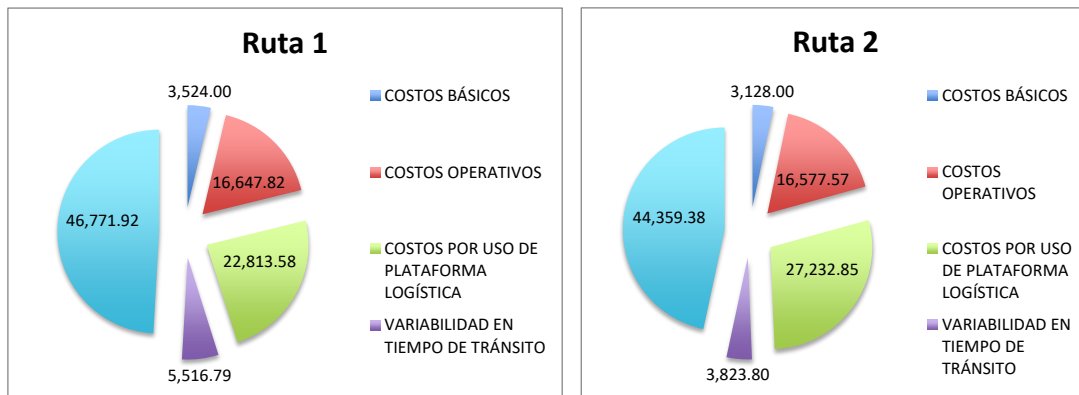


Figura 3.2 Análisis comparativo de rutas

Con base en la evidencia obtenida, resulta evidente que para reducir los costos totales en cadenas de suministro “puerta a puerta”, es necesaria una mejora sustancial en la calidad del servicio de transporte ferroviario y del marítimo. Del mismo modo, dadas las altas exigencias de los sistemas justo en secuencia implementadas por la industria automotriz entre México y EE.UU., actualmente el servicio de transporte intermodal no es considerado como una opción confiable para el abastecimiento de componentes. Es importante que alcance mejores estándares de confiabilidad en su operación.

Conclusiones

Al igual que las empresas están interesadas en mejorar la fluidez de la cadena de suministro como un medio para obtener una ventaja competitiva, las agencias públicas también están interesadas en mantener y atraer negocios para mejorar el desarrollo económico. Como afirma la I-95 Corridor Coalition:

"La información sobre cómo se desempeñan las cadenas de suministro desde las perspectivas de los generadores de carga, los transportistas y los receptores de la misma, es fundamental para saber si las cadenas de suministro están funcionando o no, y es información que a su vez, es fundamental para determinar si la inversión pública podría mejorar el desempeño del sistema de transporte y apoyar la competitividad y el crecimiento económico".

En ese sentido, este documento propone un marco de análisis integrado que podría utilizarse como enfoque "estándar" para medir y compartir información sobre el desempeño de las cadenas de suministro de forma periódica con actores públicos y privados. Este enfoque ha tomado como base el esfuerzo iniciado por otros autores (Bryan, 2015; Eisele & Villa, 2015; Eisele, Tardif, Villa, Schrank, & Lomax, 2011, 2016; Grenzeback, 2015; Katsikides, 2014; Pisarski, 2015) en el área de investigación en fluidez de la carga.

El modelo propuesto permite calibrar el impacto de potenciales mejoras específicas en la fluidez de las cadenas de suministro al utilizar diferentes CoTIM. Gracias a su enfoque de cadena de suministro "puerta a puerta", contribuye al cuerpo de conocimiento logístico al proporcionar información sobre el efecto causado por la variabilidad en el costo y el desempeño logístico cuando se operan sistemas de abastecimiento basados en redes intermodales. De hecho, los resultados obtenidos contribuyen a lo que Pisarski (2015) identifica como: "Mejores cadenas de suministro facilitan el desarrollo de enfoques de logística con tan bajos inventarios, que ahorran valiosos recursos para las empresas y sus clientes". Este trabajo confirma que las demoras en las entregas tienen un fuerte impacto en los costos de mantener inventario (Cedillo-Campos et al., 2014).

Dado que los CoTIM seleccionados como caso de estudio operan con procesos altamente estandarizados definidos por la industria automotriz (Guth y Naulleau, 2003; Holweg y Pil, 2004), el marco propuesto puede aplicarse a otros casos de uso que involucre empresas de ensamble. Asimismo, el método propuesto puede ser usado como una herramienta práctica que brinde respuestas desde tres perspectivas. Primero, desde el punto de vista del transporte, el método propuesto permite identificar cuellos de botella críticos en CoTIM y clarificar soluciones para

responder a las interrupciones. En segundo lugar, desde una perspectiva de pública, ofrece información útil para mejorar el proceso de atracción y mantenimiento de inversiones con base en la competitividad logística. Finalmente, desde un punto de vista económico, puede ser una herramienta para monitorear las tendencias en los costos de cadenas de suministro puerta a puerta.

El presente trabajo hace tres principales contribuciones al cuerpo de conocimiento. Primero, el marco propuesto permite evaluar dinámicamente los impactos cuantitativos de la variabilidad de los tiempos de tránsito en el desempeño de la cadena de suministro. Segundo, esta investigación confirma la evidencia presentada por otros autores (Cedillo-Campos et al., 2014; Bueno y Cedillo-Campos, 2014) que encontraron una notable correlación entre la fluidez de las cadenas de suministro y su desempeño económico al medir el impacto de propagación de la variabilidad a través del nivel de los inventarios de seguridad. En tercer lugar, este documento contribuye a cubrir la falta de "*métodos analíticos estandarizados y herramientas para medir de manera efectiva el desempeño de la cadena de suministro puerta a puerta*", identificada por ACSCC (2014) y la I-95 Corridor Coalition (2016).

Considerando los retos originados por el uso de sistemas de producción que exigen mayor precisión en las entregas y un mayor contenido local, se tuvo un especial cuidado para poner el modelo propuesto al alcance de las pequeñas y medianas empresas (PyME). Para ello se diseñó una herramienta informática que facilita la implementación del modelo aquí propuesto. Dicha herramienta está disponible bajo demanda directa.

Como investigación futura sugerimos tres vías de desarrollo. Primero, analizar si los efectos de variabilidad tienden a propagarse por igual cuando las cadenas de suministro de otras industrias (Por ejemplo: agrícola, mueblera, textil) utilizan un CoTIM. Es decir, si generan efectos similares a los observados en las industrias de ensamble. En segundo lugar, otra vía de investigación puede ser la identificación, estructuración y análisis del costo relacionado con el uso de plataformas logísticas a lo largo de CoTIM. De hecho, nuestro análisis de la literatura y prácticas, parece mostrar que en la actualidad no existe información bien estructurada y confiable sobre los costos de uso de las diferentes plataformas logísticas existentes en el país. Desde un enfoque de sistemas, como sostienen Hanssen, Mathisen y Jorgensen (2012): "*la distancia de largo recorrido requerida para hacer preferible el transporte intermodal aumenta cuando: (1) los costos de manejo en las terminales aumentan; (2) la distancia total de transporte aumenta; (3) los costos de los recorridos de inicio (primer milla) y final (última milla) aumentan; (4) los costos generalizados marginales dependientes de la distancia para los ferrocarriles se incrementan; (5) los costos generalizados marginales dependientes de la distancia para camiones se reducen; y (6) los costos derivados de los descansos para los conductores de camiones se reducen.*" Tercero, debido a que el objetivo final de una herramienta para calcular la fluidez de la cadena de suministro, es medir el desempeño en cadenas de suministro puerta a puerta, independientemente de las restricciones jurisdiccionales de los límites estatales y nacionales, es necesario un

esfuerzo colectivo público-privado adecuado para recopilar datos y mejores prácticas. En ese sentido, el innovador enfoque de “*inteligencia colectiva*” propuesto por Woolley, Aggarwal y Malone (2015), podría ser útil como nuevo esquema para lograr este desafío. Desde ese enfoque, la capacidad de colaborar en grupos es más importante para los objetivos (en este caso, para medir la fluidez de las cadenas de suministro puerta a puerta), que las capacidades o los recursos individuales de las organizaciones públicas o privadas.

Uno de los primeros pasos prácticos para desarrollar la “*inteligencia colectiva en logística*” podría ser la conformación de una plataforma basada en la web para compartir conocimientos y mejores prácticas logísticas. Del mismo modo, debido a que actualmente en la mayoría de los países emergentes en cada CoTIM interactúan diversas autoridades atendiendo diversas necesidades de los usuarios, la figura de un “*Gerente de Corredor*” podría ser un catalizador interesante que permitiera la coordinación entre agencias. Para ello sería necesario contar con una herramienta informática que al estilo de un ERP (Enterprise Resources Planning) dentro de las empresas, permitiera el Gerente de Corredor y su equipo, contar con una “*Torre de Control*” para monitorear la fluidez en el CoTIM a su cargo. De esta forma se podrían tomar no solo decisiones reactivas ante emergencias, sino predictivas que mejoren la competitividad logística de las empresas y países.

Bibliografía

ACSCC e U.S. Advisory Committee on Supply Chain Competitiveness. (2014). *Freight policy and movement subcommittee recommendation paper improving U.S. Supply chain competitiveness through freight policy*. U.S. Department of Commerce [En línea] <http://trade.gov/td/services/oscpb/supplychain/acsccl/documents/10-11Sep2014/2014-09-11%20ACSCC%20FP%20Rec%20-%20Approved.pdf>.

(Noviembre de 2018).

AEPL - Asociación Europea de Plataformas Logísticas (2018). Logistics Center Definition. [En línea]: http://www.europlatforms.eu/?page_id=150 (Noviembre de 2018).

Ballot, E., Montreuil, B., Meller, R. (2014). *The Physical Internet: The Network of Logistics Networks*. La Documentation Française, Paris.

Bauthe, M., Bouffioux, C. (2008). Analyzing qualitative attributes of freight transport from stated orders of preference experiment. *Journal of Transport Economics and Policy*, 42(1), 105e128.

Bryan, J. (2015). *Data options and analytic issues*. Advancing freight fluidity performance measures workshop. December 9-10, 2015, Washington, D.C.

Bueno, A., Cedillo-Campos, M. (2014). Dynamic impact on global supply chains performance of disruptions propagation produced by terrorist acts. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation*, 61, 1e12.

Cedillo-Campos, M. (2018). *El "valor Logístico" de la infraestructura*. NOTAS IMT, No. 174, septiembre-octubre, [En línea]: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=469&IdBoletin=174> (Noviembre de 2018).

Cedillo-Campos, M., Morones-Ruelas, D., Lizarraga-Lizarraga, G., Gonzalez-Feliu, J., Garza-Reyes, J. (2017a). Decision Policy Scenarios for Just-in-Sequence Deliveries. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, Vol. 10 No. 4, pp. 581-603.

Cedillo-Campos, M., Lizarraga-Lizarraga, G., Martner-Peyrelongue, C. (2017b). MiF3 method: Modeling intermodal fluidity freight flows. *Research in Transportation Economics*, Volume 61, pp. 15-24.

Cedillo-Campos, M., Cedillo-Campos, H. (2015). *w@reRISK method: Security risk level classification of stock keeping units in a warehouse*. *Safety Science*, 79, pp. 358-368.

Cedillo-Campos, M., Sanchez, C., Vadali, S., Villa, J., Menezes, M. (2014). Supply chain dynamics and the "cross-border effect": The U.S.-Mexican border's case. *Computers and Industrial Engineering*, 72, pp. 261-273.

Cedillo-Campos, M., Sanchez, C. (2013). Dynamic self-assessment of supply chains performance: An emerging market approach. *Journal of Applied Research and Technology*, 11(3), pp. 338-347.

Cedillo-Campos, M. (2012). *Supply chain clustering: The next step of industrial competitiveness*. In Council of supply chain management professionals conference. Mexico: CSCMP-Roundtable Mexico City.

Cedillo-Campos, M., Sánchez, J., Sánchez, C. (2006). The new relational schemas of inter-firms cooperation: the case of the Coahuila automobile cluster in Mexico. *International Journal of Automotive Technology and Management (IJATM)*, Vol. 6, No. 4, pp. 406-418.

Cheng, Y. (2012). The method to select the transport path based on the multimodal cost. *Transport*, 27(2), pp. 143-148.

Chopra, S., Meindl, P. (2012). *Supply chain management* (5th ed.). Prentice Hall.

Dullaert, W., Zamparini, L. (2013). The impact of lead-time reliability in freight transport: A logistics assessment of transport economics findings. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation*, 49, pp. 190-200.

Eisele, W., Juster, R., Sadabadi, K.-F., Jacobs, T., Mahapatra, S. (2016). *Implementing freight fluidity in the state of Maryland*. Transportation research Board's 95th Annual Meeting, Washington, U.S.A.

Eisele, W., Tardif, L.-P., Villa, J., Schrank, D., and Lomax, T. (2011). *Developing and applying fluidity performance indicators in Canada to evaluate international and multimodal freight system efficiency*. Transportation research Board's 90th Annual Meeting, Washington, U.S.A.

Eisele, W., Villa, J. (2015). *Freight fluidity scale of analysis*. Advancing freight fluidity performance measures workshop. December 9-10, 2015, Washington, D.C.

Fetter, R. B., Dalleck, W. C. (1961). *Decision models for inventory management*. Homewood, Illinois: Irwin.

Germain, R., Claycomb, C., Dr€oge, C. (2008). Supply chain variability, organizational structure, and performance: The moderating effect of demand unpredictability. *Journal of Operations Management*, 26(5), pp. 557-570.

Gonzalez-Feliu, J. (2013). *Multi-stage LTL transport systems in supply chain management*. In Jinghua Cheung, & Huan Song (Eds.), *Logistics: Perspectives, approaches and challenges*, series management science, theory and applications. Nova Science Publishers.

Grenzeback, L. (2015). *Freight fluidity measurement program: Implementation options*. Advancing freight fluidity performance measures workshop. December 9-10, 2015, Washington, D.C.

Guerrero, D., Proulhac, L., Nierat, P. (2014). *Supplying cities from abroad: The Geography of InterUrban freight flows*. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 15(4), pp. 6-14.

Guth, J.-P., Naulleau, G. (2003). *La voiture qui a changé l'entreprise*. Paris: Editions d'Organisation.

Hanssen, T.-E., Mathisen, T.-A., Jorgensen, F. (2012). Generalized transport cost in intermodal freight transport. Energy efficient transportation networks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, pp. 189-200.

Hausman, W., Lee, H., Subramanian, U. (2013). Impact of logistics performance on trade. *Production and Operations Management*, 22(2), pp. 236-252. March-April.

Holweg, M., Pil, F. (2004). *The second century, reconnecting customer and value chain through built-to-order*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Hopp, W. (2008). *Supply chain science*. New York: McGraw-Hill.

Huang, B., Xue, X. (2012). *An application analysis of cluster supply chain: A case study of JCH*. *Kybernetes*, 41(1), pp. 254-280.

I-95 Corridor Coalition. (2016). Freight performance measurement: Measuring the performance of supply chains across multistate jurisdictions. White Paper, [En línea] http://i95coalition.org/wp-content/uploads/2016/03/FR1_I95CC_Freight_Performance_Measurement_White_Paper_Final-20160314.pdf?dd650d (Agosto de 2016).

IDB e Inter American Development Bank. (2013). *National system of logistic platforms in Mexico*. Mexico: Secretariat of Transportation and Communications and Secretariat of Economy.

ITF (2019). Improving Transport Planning and Investment Through the Use of Accessibility Indicators, *International Transport Forum Policy Papers*, No. 66, OECD Publishing, Paris.

Janic, M. (2007). Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12, pp. 22-44.

Katsikides, N. (2014). *FHWA's freight fluidity program*. Power point presentation. Federal highway administration. Washington, D.C: Office of Freight Management and Operations.

Little, J. (2011). Little's law as viewed on its 50th Anniversary. *Operations Research*, 59(3), pp. 536-549. May-June 2011.

Martner, C. (2008). Transporte multimodal y globalización en México. Editorial Trillas, México.

Muro, M., Rothwell, J., Andes, S., Fikri, K., Kulkarni, S. (2015). America's advanced industries. The Brookings Institution [En línea] https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2015/02/AdvancedIndustry_FinalFeb2lores.pdf (Noviembre 2018).

NIST - National Institute of Standards and Technology. (2015). *U.S. Supply Chains: Insights into the challenges and a foundational roadmap toward global competitiveness*. U.S. Department of Commerce [En línea] http://mepsupplychain.org/wp-content/uploads/2013/08/SupplyChain_Whitepaper.pdf (Noviembre 2018).

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. (2003). Glossary and statistical terms [En línea] <http://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID¼4303> (March 2015).

Página 24 (2018). Firman Gobernadores Acuerdo de Planeación y Desarrollo Regional [En línea]: <https://pagina24.com.mx/2018/11/24/local/firman-gobernadores-acuerdo-de-planeacion-y-desarrollo-regional/> (Noviembre de 2018).

Parilla, J., Berube, A. (2014). Metro North America. U.S.A: The Brookings Institution.

Pérez-Salazar, M., Aguilar-Lasserre, A., Cedillo-Campos, M., Juárez-Martínez, U., Posada-Gómez, R. (2018). Processes and measurement of knowledge management in supply chains: a systematic literature review. *International Journal of Production Research (IJPR)*, <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1521530> pp. 1-24.

Pfohl, H., Köhler, H., Thomas, D. (2010). State of the art in supply chain risk management research: Empirical and conceptual findings and a roadmap for the implementation in practice. *Logistics Research*, 1(2), pp. 33-44.

Pisarski, A. (2015). Applications of freight fluidity. Advancing freight fluidity performance measures workshop. December 9-10, 2015, Washington, D.C.
Richardson, H. (2004). *Execution at the dock. Outsourced Logistics*. April.

Sheffi, Y. (2012). *Logistics Clusters: Delivering Value and Driving Growth*. The MIT Press, 368 paginas.

The White House (2015). Supply chain innovation: Strengthening America's small manufacturers. Washington, D.C: The Executive Office of the President and the U.S. Department of Commerce. March.

The Guardian (2019). Brexit stockpiling and the bullwhip effect [En Línea]: <https://www.theguardian.com/politics/2019/jan/04/brexit-stockpiling-and-the-bullwhip-effect> (Marzo 2019).

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

Thun, J. H., Marble, R. P., Silveira-Camargos, V. (2007). A conceptual framework and empirical results of the risk and potential of just-in-sequence e a study of the German automotive industry. *Journal of Operations and Logistics*, 1(2), pp. 1-13.

Toyota. (2014). Just-in-Time: Philosophy of complete elimination of waste [En línea] http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/just-in-time.html (Noviembre de 2018).

Vilko, J. P. P., Hallikas, J. M. (2012). Risk assessment in multimodal supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(2), pp. 586-595.

Wagner, S., Silveira-Camargos, V. (2011). Decision model for the application of just-in-sequence. *International Journal of Production Research*, 49(19), pp. 5713-5736.

Woolley, A., Aggarwal, I., Malone, T. (2015). *Collective intelligence in teams and organizations*. In: Malone, & Bernstein (Eds.), Handbook of collective intelligence Cambridge, Massachusetts, U.S.A: The MIT Press.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015