

Sostenibilidad de la Cadena de Suministros mediante el Control de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Natalia Robles, M.Sc.

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, nrobles@itcr.ac.cr

Resumen— En esta investigación se desarrolla un modelo matemático de programación lineal entera mixta para la optimización de la configuración de la cadena de suministros mediante el control de las emisiones de gases de efecto invernadero. Al controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero se busca mitigar el cambio climático. El modelo está dirigido, por ende, a apoyar la gestión de la cadena de suministros en búsqueda de su sostenibilidad económica y ambiental. Asimismo, apoya la comprensión del problema en la enseñanza a los estudiantes de ingeniería, resaltando el impacto que tiene la configuración de la cadena de suministros sobre su huella de carbono. El modelo permite optimizar la cadena de suministros para lograr varios objetivos, centrándose en la optimización de los costos bajo un límite de emisión de carbono para toda la cadena de suministro.

La aplicación del modelo propuesto a un caso de estudio de la configuración de una cadena de suministros, demostró su utilidad práctica y cómo las decisiones de la configuración impactan tanto los costos como el ambiente. Los principales resultados demuestran que es posible reducir las emisiones de la cadena de suministro admitiendo un aumento razonable en los costos.

Palabras clave-- Emisiones de carbono, Huella de carbono, Cadenas de suministros sostenibles, programación lineal entera mixta

Abstract— A mixed integer linear programming model for supply chain network optimization is developed in this research designed to control its greenhouse gas emissions. Controlling and reducing them it is possible to mitigate climate change. The model is therefore oriented to aid supply chain management to achieve economic and environmental sustainability. It also aids in teaching engineering students, comprehension of the problem, stressing the impact of the configuration of the supply chain on its carbon footprint. The model can optimize the supply chain network to achieve several objectives, focusing on limiting the carbon emissions of the entire supply chain. The proposed model was applied to the supply chain network of a product in a case study, demonstrating its practical usefulness and denoting how network decisions affect both costs and environment. Among the most relevant results, it is worth to mention that it is possible to reduce the greenhouse gas emissions of a supply chain network allowing a reasonable increase in cost.

Key words-- Carbon emissions, carbon footprint, sustainable supply chains, mixed integer linear programming

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.304>
ISBN: 978-0-9993443-0-9
ISSN: 2414-6390

15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Global Partnerships for Development and Engineering Education”, 19-21 July 2017, Boca Raton FL, United States.

I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de la cadena de suministros es una preocupación que se ha acentuado en los últimos años. A las consideraciones económicas que solían prevalecer se han incorporado aspectos de índole ambiental, y más recientemente de impacto social. Además, la sostenibilidad en la cadena de suministros se relaciona directamente con la sostenibilidad en los negocios, una meta que persiguen las empresas en la actualidad.

Por su parte el cambio climático, con sus efectos presentes y potenciales ha despertado la preocupación de los científicos en todo el mundo al punto que a fines del año 2014 el Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC resalta como urgente el limitar el crecimiento en las emisiones de carbono para el año 2050 [1]. Por este motivo estudiar la configuración de la cadena de suministros buscando limitar las emisiones de carbono es de gran necesidad.

La huella de carbono de un producto obliga a estudiar dentro de ciertos límites, denominados “cuna a tumba” o “cuna a cuna”, las emisiones de carbono que el producto genere. La huella de la cadena de suministros constituye en sí misma gran parte del total de la huella de carbono de un producto. Por consiguiente, el control de las emisiones de carbono a lo largo de la cadena de suministros favorece en gran medida el control de las emisiones del producto.

Las decisiones que se toman sobre la configuración de la cadena de suministros, selección de proveedores, ubicación de facilidades y otras más impactan no solo de forma económica sino también de forma ambiental y social. Por este motivo, el modelo que se propone en esta investigación persigue comprender mejor los impactos de las decisiones y que tal comprensión favorezca optar por acciones de menor emisión de carbono.

Por las razones expuestas, la enseñanza de la ingeniería, debe complementarse con medios que permitan plantear y valorar el impacto ambiental de las decisiones que se toman. El modelo propuesto aborda esta exigencia. En el caso de estudio se muestra como permite analizar decisiones comunes de la configuración de una cadena de suministros, y que por consiguiente es de utilidad tanto para la enseñanza como para el aprendizaje de la ingeniería.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Con respecto a la sostenibilidad en la cadena de suministros es importante indicar que el concepto ha evolucionado a través del tiempo. Los temas han evolucionado desde administración sostenible de la red de suministros, suministros y demanda sostenible en redes de responsabilidad social corporativa, compras verdes, proveeduría verde, proveeduría ambiental, logística verde y logística ambiental como se indica en [2]. La mayor parte de los esfuerzos respecto a operaciones y sostenibilidad se han concentrado más en reciclado o reutilización y en análisis del ciclo de vida, y no tanto en las cadenas de suministros sostenibles [3]. El abordaje en particular de las emisiones de carbono de la cadena de suministros se ha presentado más recientemente ante la preocupación que ha surgido sobre el cambio climático.

La modelación matemática se ha utilizado para estudiar la cadena de suministros, y recientemente se le han incorporado indicadores ambientales para encontrar cadenas de suministros más sostenibles. Muestra de ello es el modelo de la referencia [4] que incluye un criterio verde en el marco de la selección de proveedores. El modelo contempló cuatro objetivos conflictivos: minimizar el costo y tiempo de producción y transporte, mientras que se quería maximizar la calidad del producto y obtener un alto puntaje de una “evaluación verde”. El problema formulado fue un multi-producto, de múltiples etapas de configuración de una red de cadena de suministros. Las variables de decisión del modelo fueron el establecimiento de los proveedores y almacenes a fin de satisfacer la demanda total del mercado. El modelo resultó en uno de programación no lineal entera mixta multi-objetivo. Las restricciones consideraron la limitada capacidad de producción y las demandas de los clientes y de los almacenes, así como las tasas de producto reciclado en cada eslabón de la cadena. Para la solución desarrollaron dos algoritmos genéticos multi-objetivo. Cabe remarcar que a pesar de que el modelo aborda una evaluación verde, no contiene un indicador de emisiones de gases de efecto invernadero para analizar su impacto en el cambio climático.

La referencia [5] presenta un modelo matemático para diseñar la configuración de una cadena de suministros dentro de un esquema de legislación sobre las emisiones de carbono. Los autores se basaron en una metodología del análisis de ciclo de vida. Enfatizan que el cumplimiento de una regulación ambiental para las emisiones de carbono a un costo reducido es un desafío. Consideraron una cadena de suministros global con centros de recolección para procesar producto retornado. Las variables de decisión fueron las relacionadas con la configuración desde proveedores hasta centros de reciclado. Como variables de decisión consideraron el modo de transporte y la administración del carbono basada en un esquema de mercado de carbono con créditos disponibles para comprar y vender. El modelo formulado fue uno de programación lineal multi-objetivo, con un objetivo económico y otro ambiental. Para la función del objetivo ambiental se buscó la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero de los procesos

de manufactura, reciclado y de transporte. Las emisiones de carbono correspondientes a los procesos productivos de los proveedores de las materias primas no fueron consideradas. Encontraron que una regulación ambiental que imponga límites a las emisiones de carbono puede hacer que las actividades de reciclado decrezcan si no se optimizan sus costos. Usaron el software LINGO para resolver el problema.

La referencia [6] muestra un modelo para la configuración de la cadena de suministros que toma en consideración las emisiones de carbono. El modelo consideró una cadena de suministros compuesta por instalaciones de fabricación, almacenes y detallistas. Cabe destacar que los autores no incluyeron a los proveedores de las materias primas como parte de la configuración. La función objetivo fue la minimización de la suma de costos de la distribución. El problema resultó ser uno de programación entera mixta. Las emisiones de carbono de la manufactura se consideraron debidas solo al consumo energético en kWh. Los autores contemplaron una restricción que limitaba las emisiones de carbono de la cadena de suministros, asumiendo un límite estipulado por las regulaciones ambientales. Con el modelo los autores encontraron que, a mayores límites de las emisiones, menores son los costos fijos y los totales mientras que los costos de distribución se mantuvieron bastante estables. Para la solución del modelo utilizaron ILOG CPLEX 11.0 en el lenguaje GAMS.

También se ha investigado el cierre del ciclo de la cadena de suministros, que implica la recolección del producto una vez utilizado por el cliente. La referencia [7] presenta el desarrollo de un modelo que incluye el flujo logístico, la capacidad de expansión e inversión en tecnología para facilidades existentes y potenciales en una cadena de suministros de ciclo cerrado. Los autores elaboraron un modelo de programación entera mixta multi objetivo para capturar las relaciones de trueque entre el costo total y las emisiones de dióxido de carbono, atacando el problema de la configuración desde la perspectiva ambiental y la económica. Consideraron como variables de decisión los flujos en la cadena de suministros normal y la reversa, las cantidades de producto reciclado en las potenciales instalaciones y las cantidades a disponer. También analizaron posibles ubicaciones para las facilidades en las que se realizara el reciclado. Sin embargo, no contemplaron centros de distribución como parte de la configuración. Posteriormente, adicionaron incertidumbre en el suministro, las demandas de los consumidores y las cantidades de producto retornado. Encontraron que la cantidad de productos reciclados inciden en la localización y tamaño de la facilidad para la logística inversa y también en el costo y emisión de carbono. Adicionalmente encontraron que operar más unidades de logística reversa incrementa las emisiones de carbono. Consideraron las emisiones de carbono generadas por las operaciones de manufactura, reciclado y transporte, más no las debidas a los proveedores.

A pesar de la importancia de los impactos ambientales de las operaciones productivas los esfuerzos son aún aislados e incipientes. Tan solo un 17% de las gerencias de compañías de manufactura dieron actualizaciones sobre el cambio climático,

y tan solo en un 11% los gerentes asumieron papeles de liderazgo a este respecto [8], lo que denota que aún se adolece de una baja responsabilidad ambiental.

III. DESARROLLO DEL MODELO

En esta investigación se presenta un modelo matemático para la configuración de una cadena de suministros de un producto manufacturado que permite valorar el impacto económico, pero también el ambiental, de la toma de decisiones. La configuración estudiada está conformada por proveedores, fábricas, almacenes o centros de distribución y clientes o detallistas, así como por los aspectos de la logística inmersa en el traslado de los materiales y productos entre ellos.

El modelo contempla un conjunto definido de proveedores ya que se considera que los fabricantes suelen adquirir materias primas solo de los proveedores aprobados por cumplir con las características de calidad y precio que requieren. Por el contrario, para las instalaciones de fabricación y para los centros de distribución, se contempló un conjunto definido, para que el modelo establezca cuáles operar y cuánto volumen de producción o almacenamiento asignarles.

Las fuentes de emisiones de carbono que considera el modelo en las instalaciones que abarca la cadena son las debidas al consumo energético. El consumo energético que considera el modelo es de tipo eléctrico, pero también térmico, para procesos de calentamiento. Para el primero se determina el consumo energético en kWh y se hace uso de factores de emisión de la producción de energía eléctrica según la región o país donde se encuentra el proceso productivo. Lo anterior debido a que los factores de emisión para la energía eléctrica son distintos en cada país. Esto porque las matrices energéticas, que abarcan las distintas fuentes que se utilizan para producir energía eléctrica, difieren entre los países. En esta investigación para Costa Rica se utilizan los factores de emisión por kWh avalados por el Instituto Meteorológico Nacional IMN [9], y calculados con base en las matrices energéticas reportadas para cada año. Para el consumo térmico se registra el tipo de combustible y los litros consumidos. Igualmente se hace uso del factor de emisión de carbono de cada combustible según la región o país donde se encuentre, ya que pueden importarse de distintas regiones y diferir así en sus características. También se registran los tipos de refrigerantes y se contabilizan las descargas que se realizan.

Para los traslados las fuentes de emisiones consideradas corresponden a los medios de transporte utilizados. En ellos se registra la cantidad y tipo de combustibles utilizados. Luego mediante factores de emisión esos consumos se convierten a emisiones de carbono que aplicando los potenciales de calentamiento global a 100 años se convierten a emisiones de carbono equivalente. Seguidamente se detalla el desarrollo del modelo, planteando en primera instancia las definiciones de los conjuntos que se establecieron:

Notación del modelo:

M representa al conjunto de materiales, indexados por r
P representa al conjunto de proveedores, indexados por i
F representa al conjunto de fábricas, indexadas por j
C representa al conjunto de centros de distribución, indexados por k
D representa al conjunto de detallistas, indexados por l

Las variables de decisión que corresponden al flujo a través de la configuración son:

x_{rij} material r de proveedor i a fábrica j
 $\forall r = 1 a t, i = 1 a n, j = 1 a m$
 x_{jk} producto de fábrica j a centro de distribución k
 $\forall j = 1 a m, k = 1 a z$
 x_{kl} producto de centro de distribución k a detallista l
 $\forall k = 1 a z, l = 1 a w$

Los parámetros de entrada son los siguientes:

α_{ri} Precio de venta de cada material r del proveedor i
 β_j Costo de producción de cada fábrica j (costo variable)
 λ_j Costo fijo de operar cada fábrica j
 δ_k Costo de almacenamiento en el centro de distribución k (costo variable)
 v_k Costo fijo de operar cada centro de distribución k
 Df_{rj} Demanda de material r de cada fábrica j
 Dd_l Demanda de producto de cada detallista l
 θf_j Capacidad producción de cada fábrica j
 θp_{ri} Capacidad de suministro de material r de proveedor i
 θc_k Capacidad de almacenamiento de cada centro de distribución k
 $EEpr_i$ Consumo energético eléctrico (kWh) de material en proveedor i
 EEf_j Consumo energético eléctrico (kWh) de producto en fábrica j
 EEc_k Consumo energético eléctrico (kWh) de producto en centro de distribución k
 $FEpr_i$ Litros de combustible por material en cada proveedor i
 FEf_j Litros de combustible por producto en cada fábrica j
 FEC_k Litros de combustible por producto en centro de distribución k
 $REpr_i$ Descarga de refrigerante (kg) por material en proveedor i
 REf_j Descarga de refrigerante (kg) por producto en fábrica j
 REC_k Descarga de refrigerante (kg) por producto en centro de distribución k
 $EFEEp_i$ Factor de emisión de energía eléctrica de cada proveedor i (kgCO₂/kWh)
 $EFEEf_j$ Factor de emisión de energía eléctrica de cada fábrica j (kgCO₂/kWh)
 $EFEEc_k$ Factor de emisión de energía eléctrica de cada centro de distribución k (kgCO₂/kWh)
 $EFFEp_i$ Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada proveedor i (kgCO₂/l)

$EFfE_f_j$ Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada fábrica j (kgCO₂/l)
 $EFfEc_k$ Factor de emisión de otras fuentes de energía en cada centro de distribución k (kgCO₂/l)
 ω_j Emisión fija de cada fábrica j (kgCO₂e)
 σ_k Emisión fija de cada centro de distribución k (kgCO₂e)
 d_{ij} Distancias proveedor i a fábrica j (km)
 d_{jk} Distancias fábrica j a centro distribución k (km)
 d_{kl} Distancias centro distribución k a detallista l (km)
 ρ_{ij} Costo por tonelada-kilómetro del proveedor i a la fábrica j
 τ_{jk} Costo por tonelada-kilómetro de fábrica j a centro de distribución k
 ϕ_{kl} Costo por tonelada-kilómetro de centro de distribución k a detallista l
 Tfp_i Factor de emisión de transporte en kgCO₂e/t-km de proveedor i a fábrica j
 Tff_j Factor de emisión de transporte en kgCO₂e/t-km de fábrica j a centro de distribución k
 Tfc_k Factor de emisión de transporte en kgCO₂e/t-km de centro distribución k a detallistas l
L Límite de carbono máximo para la cadena kgCO₂e

El costo operativo de la configuración de la cadena de suministros contempla los elementos de dos fuentes, una correspondiente a los costos operativos propiamente de las instalaciones y otra a los costos de los traslados. Los costos operativos ocurren a lo interno de cada nodo o actor de la cadena, en tanto que los costos de traslados son los correspondientes al traslado de los productos entre los actores (nodos) de la cadena. Los costos operativos por su parte tienen un componente fijo y otro variable. Así la función de costo económico de la configuración se compone de los sumandos que se indican a continuación:

Costo = precio de materiales de los proveedores (1) + costos operativos de las fábricas (2) + costos operativos de los centros de distribución (3) + costos del traslado de proveedores a fábricas (4) + costos del traslado de fábricas a centros de distribución (5) + costos de traslado de centros de distribución a detallistas (6) + costos fijos de las fábricas seleccionadas (7) + costos fijos de los centros de distribución seleccionados (8).

El interés es optimizar los costos de la cadena de suministros buscando su minimización. La función objetivo del costo es:

Minimizar Costo =

$$\sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ri} x_{rij} (1) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \beta_j x_{jk} (2) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \delta_k x_{kl} (3) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \rho_{ij} * x_{ij} * d_{ij} (4) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \tau_{jk} * x_{jk} * d_{jk} (5) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \phi_{kl} * x_{kl} * d_{kl} (6) + \sum_{j=1}^m \lambda_j Uf_j (7) + \sum_{k=1}^z \nu_k Uc_k (8)$$

(Los números entre paréntesis identifican los componentes del costo).

Las emisiones de carbono de la configuración de la cadena de suministros se contabilizaron tanto para las operaciones y procesos productivos internos de los proveedores, fábricas y centros de distribución, como para los traslados entre ellos. Los componentes de las emisiones de carbono de la cadena de suministros se indican a continuación
Emisiones de carbono equivalente (E) = emisiones operativas de los proveedores (1) + emisiones operativas de las fábricas (2) + emisiones operativas de los centros de distribución (3) + emisiones por traslado de proveedores a fábricas (4) + emisiones por traslado de fábricas a centros de distribución (5) + emisiones por traslado de centros de distribución a detallistas (6) + emisiones fijas de las fábricas seleccionadas (7) + emisiones fijas de los centros de distribución seleccionados (8)

La función de las emisiones es:

Minimizar Emisiones (E) =

$$\left[\sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} EEp_i EFfEep_i + \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} FEp_i EFfEep_i \right] (1)$$

$$+ \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} EEf_j EFfEef_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} FEf_j EFfEef_j \right] (2)$$

$$+ \left[\sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} EEc_k EFfEec_k + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} FEc_k EFfEec_k \right] (3)$$

$$+ \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} d_{ij} Tfp_{ij} (4) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} d_{jk} Tff_{jk} (5)$$

$$+ \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w d_{kl} x_{kl} Tfc_{kl} (6) + \sum_{j=1}^m \omega_j Uf_j (7) + \sum_{k=1}^z \sigma_k Uc_k (8)$$

(Los números entre paréntesis identifican los componentes de las emisiones de carbono).

Para limitar las emisiones de carbono de la cadena de suministros se debe incluir para ellas la siguiente limitante:

$$E \text{ (Emisiones de carbono equivalente)} \leq L$$

Además de esta restricción el modelo contiene las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} \leq \theta p_{ri} \text{ (Ecuación 1)}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} = Df_{rj} \text{ (Ecuación 2)}$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} \leq \theta f_j Uf \text{ (Ecuación 3)}$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} - \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} = 0 \text{ (Ecuación 4)}$$

$$\sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} - \theta c Uc \leq 0 \text{ (Ecuación 5)}$$

$$\sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} = Dd_l \text{ (Ecuación 6)}$$

$$Uf_j \in \{0,1\} \text{ para } j = 1 \text{ a } m \text{ (Ecuación 7)}$$

$$Uc_k \in \{0,1\} \text{ para } k = 1 \text{ a } z \text{ (Ecuación 8)}$$

$$x_{rij} \geq 0 \quad \forall r = 1 \text{ a } t, i = 1 \text{ a } n \text{ y } j = 1 \text{ a } m \text{ (Ecuación 9)}$$

$$x_{jk} \geq 0 \quad \forall j = 1 \text{ a } m \text{ y } k = 1 \text{ a } z \text{ (Ecuación 10)}$$

$$x_{kl} \geq 0 \quad \forall k = 1 \text{ a } z \text{ y } l = 1 \text{ a } w \text{ (Ecuación 11)}$$

La Ecuación 1 contempla las restricciones referentes a la limitada capacidad de los proveedores. Cada proveedor i debe suministrar material r a las fábricas sin exceder su capacidad. La Ecuación 2 considera las restricciones referentes a la demanda de las fábricas. Cada fábrica j deberá recibir de cada material r la cantidad que ha solicitado. La Ecuación 3 incluye las restricciones referentes a la capacidad de las fábricas. El producto que envía cada fábrica j no puede exceder la capacidad de la fábrica, esto cuando se ha escogido operar la fábrica. La Ecuación 4 concierne a los centros de distribución, esta restricción hace el balance entre la mercadería que ingresa y sale de cada almacén. La Ecuación 5 impide a cada centro de distribución sobrepasar su capacidad. La Ecuación 6 es la restricción sobre la demanda de cada detallista l que debe recibir la cantidad de producto que solicitó. La Ecuación 7 se refiere a que cada fábrica puede ser o no seleccionada como parte de la configuración, el valor Uf_j es 1 cuando la fábrica se selecciona y 0 cuando no se selecciona. La Ecuación 8 se refiere a que cada centro de distribución puede ser o no seleccionado como parte de la configuración, el valor Uc_k es 1 cuando se selecciona y 0 cuando no se selecciona. Las Ecuaciones 9, 10 y 11 establecen las restricciones de no negatividad para las variables de flujo a través de la cadena de suministros.

IV. CASO DE ESTUDIO

El modelo propuesto en esta investigación se aplicó a la cadena de suministros de un producto del sector alimentario costarricense para mostrar su utilidad práctica. Se utilizaron tanto factores de emisión de carbono como factores de calentamiento global del Instituto Meteorológico Nacional IMN del año 2014 [9] por ubicarse los actores de la cadena de suministros del caso en Costa Rica.

El producto requiere de tres materias primas principales. Para cada una de ellas hay varios posibles proveedores. La cantidad de proveedores que se considera es de seis, dos para cada materia prima. Por su parte, los clientes demandantes del producto fueron siete. La demanda anual de producto fue de 315 toneladas.

Fue de interés analizar en este caso la presencia y ubicación de centros de distribución. Por tal motivo, se consideraron tres posibles ubicaciones, con iguales capacidades y características, permitiendo también la posibilidad de prescindir de ellos. Adicionalmente fue de interés identificar la conveniencia o no de operar más de una instalación de fabricación. Para ello se incluyeron dos posibles instalaciones de fabricación.

En la Figura 1 se muestra un esquema de la configuración de la cadena de suministros del caso de estudio:

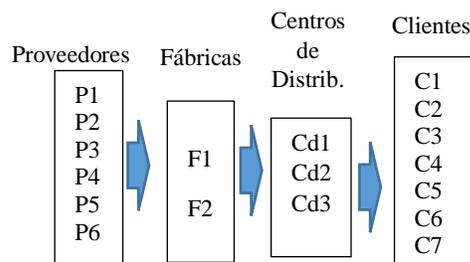


Figura 1. Configuración de la cadena de suministros del caso de estudio

En el Cuadro 1 se muestran las distancias entre proveedores y fábricas y en el Cuadro 2 las distancias hacia los clientes.

Cuadro 1.
Matriz de distancias de proveedores a fábricas (km)

Proveedor	F1	F2
P1	240	10
P2	30	215
P3	30	215
P4	482	338
P5	1408	1315
P6	16	270

Cuadro 2.
Matriz de distancias desde fábricas y centros de distribución a los clientes (km)

Cliente	F1	F2	Cd1	Cd2	Cd3
C1	9	242	25	23	69
C2	31	220	46	7	90
C3	167	385	144	184	95
C4	132	387	117	167	270
C5	20	270	5	49	146
C6	220	155	290	192	276
C7	210	272	141	97	115
F1	-	-	17	31	70
F2	-	-	265	220	280

Para la solución del modelo propuesto se utilizó el software Solver de Frontline Systems® que se ejecuta en Microsoft Excel®. Fue de interés resolver el modelo propuesto primero para obtener la optimización del costo y luego para comparar ese resultado con el que se obtiene para la optimización de las

emisiones. Posteriormente, fijando distintos límites a las emisiones de gases de efecto invernadero, se resolvió el modelo para optimizar costos y así poder investigar el comportamiento de la cadena en atención al postulado de esta investigación.

Al optimizar los costos de la configuración, sin limitar las emisiones de carbono se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3.

Resultados al optimizar los costos de la configuración de la cadena de suministros

Función Objetivo	Total Costo (\$)	Total Emisión (kgCO ₂ e)	Fábrica y Producción (t)	Opera un Cd
Minimizar el Costo Total (\$)	936022	110991	F1 todo (315 t)	No
Configuración y Patrón de Flujo: La fábrica F1 adquiere los materiales 2 y 3 al proveedor 1 y el material 1 al proveedor 2.				

Al optimizar solo las emisiones de carbono de la configuración de la cadena de suministros, sin establecer ningún límite para ellas, se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro 4. Cabe resaltar que los resultados de la optimización de las emisiones de carbono son distintos a los resultados de la optimización de los costos mostrada en el cuadro 3.

Cuadro 4.

Resultados al optimizar las emisiones de la configuración de la cadena de suministros

Función Objetivo	Total Costo (\$)	Total Emisión (kgCO ₂ e)	Fábrica y Producción (t)	Opera un Cd
Minimizar las Emisiones (kgCO ₂ e)	1041423	58605	F1 con 187t y F2 con 128t	Si (Cd3)
Configuración y Patrón de Flujo: La fábrica F2 selecciona para todos los materiales al primer proveedor. La fábrica F1 también escoge para los materiales 1 y 2 al proveedor 1, pero para el material 3 escoge adquirirlo del segundo proveedor. El centro de distribución que opera (CD3) recibe de la fábrica F2 y entrega al cliente C3.				

Posteriormente se optimizaron los costos de la cadena de suministros bajo un límite de emisiones de carbono. El límite de emisión lo puede fijar la empresa o algún organismo externo, por ejemplo, encargados de la regulación ambiental de un país. Los resultados anteriores de la optimización individual de costos y de emisiones pueden servir para analizar el impacto del límite a la emisión de carbono. Se puede pretender llegar a emisiones menores a las obtenidas al minimizar los costos, pero quizá sin llegar a las mínimas posibles, con el fin de no incrementar considerablemente los costos de operación. Como los resultados de la configuración dependerán del límite establecido se realizaron varios experimentos con distintos

límites de emisión partiendo de valores casi tan altos como los obtenidos para la optimización de los costos hasta límites cercanos al valor mínimo posible de emisiones. El cuadro 5 muestra la configuración óptima en costo para distintos límites de emisiones. También muestra la cantidad de producto que se asigna a cada fábrica F1 y F2.

Cuadro 5.

Resultados de la optimización de los costos de la cadena de suministros para distintos límites de emisión

Límite (kgCO ₂ e)	Costo (\$)	F1 (t)	F2 (t)	Opera un Cd
99891.9	938964	315	0	no
94342.35	940435	315	0	no
88792.8	941907	315	0	no
83243.25	943378	315	0	no
77693.7	944849	315	0	no
72144.15	946320	315	0	no
66594.6	947792	315	0	no
61045.05	948493	0	315	no
58605	1041423	187	128	si (Cd3)

Respecto a los proveedores cuando el límite de emisión fue alto (99892 kgCO₂e) el material 1 se adquirió en un 78% del proveedor 2 y 22% del proveedor 1. Cuando fue más restringido, (94342 kgCO₂e), la proporción de material que se adquirió del proveedor 2 fue 66%. Al restringirlo un poco más a 88793 kgCO₂e la proporción que se adquirió de material 1 del proveedor 2 bajó a un 44%. Cuando el límite fue 61045 kgCO₂e la decisión cambió totalmente hacia operar solo la fábrica 2. Finalmente, para la opción correspondiente a emisiones mínimas la solución óptima fue operar ambas fábricas.

En la Figura 2 se muestra gráficamente el comportamiento del costo para los distintos límites de emisión que se exploraron en el caso.

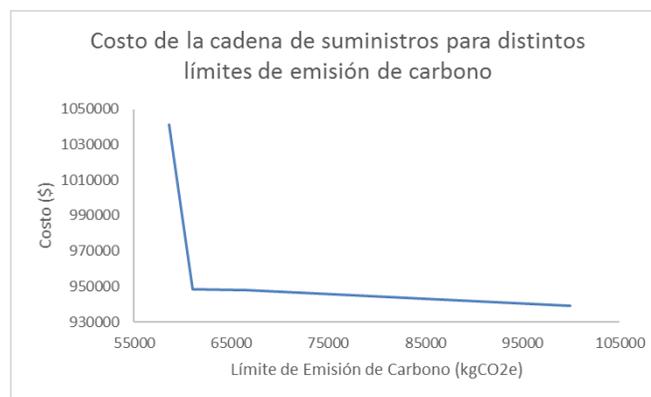


Figura 2. Comportamiento de la optimización de los costos de la cadena de suministros del caso de estudio para distintos límites de emisión

La Figura 2 denota que conforme se limitan las emisiones de carbono de la cadena de suministros del caso de estudio, los costos incrementan, haciendo poco atractiva la reducción de emisiones desde el punto de vista económico. Sin embargo, al ser menor la tasa de cambio en costos que la de cambio en

emisiones, demuestra cómo es posible mediante un aumento relativamente pequeño en costos lograr una disminución sustancial en emisiones. También muestra que cuando el límite de la cantidad de emisiones de carbono es muy estricto, cerca del mínimo posible, se presenta un incremento abrupto en los costos de la cadena de suministros, en comparación con límites de emisión menos restringidos, producto del cambio que se da en la configuración de la cadena.

VI. CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló un modelo matemático de optimización para una gestión más sostenible de la cadena de suministros en términos económicos y de su huella de carbono. El modelo propuesto es novedoso y distinto de los encontrados en la literatura entre otros aspectos porque considera el desglose de las distintas fuentes de energía que pueden requerirse en los procesos de manufactura, así como las descargas de refrigerantes. Otro aspecto es que considera la operación de posibles centros de distribución y la colaboración de fábricas para la distribución de los productos. Además, incluye la adquisición de las materias primas de los proveedores y las emisiones de carbono generadas por ellos, mientras que otros modelos encontrados en la literatura no los contemplaron.

La aplicación del modelo al caso de estudio demostró que decisiones importantes de la configuración de la cadena de suministros como la ubicación de las fábricas o la selección de proveedores pueden afectar su huella de carbono. Al aplicar límites a la emisión de carbono en el caso de estudio, la decisión ya no radicó exclusivamente en el costo. Con respecto a las fábricas se encontró que conforme el límite de emisión se hizo más restringido la decisión sobre las fábricas que deben operar cambió radicalmente.

Con respecto a la adquisición de materiales, conforme el límite de emisiones se fue restringiendo, el suministro de algunos materiales pasó de unos proveedores a otros. Inclusive para un material se cambió por completo de proveedor cuando el límite se aproximó a las mínimas emisiones posibles para la cadena de suministros.

Los resultados del modelo al optimizar la función de costo bajo un límite de emisiones muestran que conforme se reduce el límite permitido el costo de la cadena de suministros aumenta.

Los resultados de la aplicación del modelo muestran pueden encontrarse configuraciones que, aunque no presenten las mínimas emisiones de gases de efecto invernadero si las reduzcan sustancialmente, sin un aumento significativo en los costos de la cadena de suministros.

La relación inversa entre el costo de la cadena y sus emisiones confirma que la reducción de emisiones es una decisión que atañe a la cultura de las organizaciones y a su

escala de valores por lo que en tanto se valore como fin último el aspecto económico es muy difícil que se logre reducir de forma significativa el impacto ambiental.

El modelo propuesto es de utilidad para explorar y apoyar la toma de decisiones sobre la configuración de la cadena de suministros en procura de reducir su huella de carbono. Además, es de utilidad tanto para quienes estén involucrados en la toma de decisiones, como para la enseñanza y aprendizaje de futuros ingenieros.

REFERENCIAS

- [1] Intergovernmental Panel for Climate Change IPCC, “*Climate Change 2014: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*” [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
- [2] P. Taticchi, F. Tonelli, y R. Pasqualino, “Performance measurement of sustainable supply chains”, *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), 782-804, 2013.
- [3] S. Benjaafar, Y. Li, y M. Daskin, “*Carbon footprint and the management of supply chains: insights from simple models*”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.10, no.1, pp.99-116, January 2013.
- [4] W.C. Yeh y M.C. Chuang, “Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems”, *Expert Systems with Applications*, 38, 4244-4253, 2011.
- [5] A. Chaabane, A. Ramudhin, y M. Paquet, “Design of sustainable supply chains under emission trading scheme”, *International Journal of Production Economics*, 135, 37 – 49, 2012.
- [6] A. Diabat y D. Simchi-Levi, “*A carbon-capped supply chain network problem*”, *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 523-527, 2010.
- [7] L.C. Wang, T.L. Chen, Y.Y. Chen, Y.W. Chen, y A. Wang, “Closed-Loop Sustainable Supply Chain Design Under Uncertainties”, En Azevedo, A. (ed.), *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*, 799-812, New York, Springer, 2013.
- [8] R.B. Chase, y F.R. Jacobs, “*Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*”, 13 ed., México: McGraw-Hill, 2014.
- [9] Instituto Meteorológico Nacional IMN, “*Factores de Emisión GEI*”, Cuarta edición, 2014.