

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Universidad Estatal a Distancia**

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

**UNA**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
COSTA RICA

  
**UNED**  
UNIVERSIDAD ESTADAL A DISTANCIA  
Institución Benemérita de la Educación y la Cultura

**Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo**

 **DOCINADE**  
Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

## **Modelo para la Identificación y Reducción de la Huella de Carbono de una Cadena de Suministros Industrial**

**Trabajo de graduación sometido a consideración del tribunal  
evaluador como requisito para optar por el grado de Doctor en  
Ciencias Naturales para el Desarrollo, con énfasis en Gestión y  
Cultura Ambiental**

**Estudiante:**

**Natalia Robles Obando**

**Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica**

**Marzo 2018**

**Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Universidad Nacional de Costa Rica  
Universidad Estatal a Distancia**

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

**UNA**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
COSTA RICA

**UNED**  
UNIVERSIDAD ESTADAL A DISTANCIA  
Institución Benemérita de la Educación y la Cultura

**Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo**

 **DOCINADE**  
Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

## **Modelo para la Identificación y Reducción de la Huella de Carbono de una Cadena de Suministros Industrial**

**Trabajo de graduación sometido a consideración del tribunal  
evaluador como requisito para optar por el grado de Doctor en  
Ciencias Naturales para el Desarrollo, con énfasis en Gestión y  
Cultura Ambiental**

**Estudiante:**

**Natalia Robles Obando**

**Tutor:**

**Ph.D. Marcos Moya Navarro**

**Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica**

**Marzo 2018**

### Acta de Defensa de Trabajo de Tesis

#### Énfasis en Gestión y Cultura Ambiental

**Estudiante:** Natalia Robles Obando

**Nº de Carnet:** 0109250125

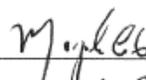
**Nº de Cédula:** 1-0925-0125

**Estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo**

A las 9:00 a. m. del 19 de marzo del 2018, se presenta en la sala de reuniones del Decanato de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, de la Universidad Nacional, la aspirante de referencia, ante un tribunal del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, para realizar su disertación y defensa de Tesis.

#### Tribunal evaluador:

1. Dra. Mayela Cotto Choto, quien preside  
Representante del SEPUNA
2. Dr. Freddy Araya Rodríguez,  
Coordinador del DOCINADE
3. Dr. Marco Moya Navarro,  
Director de tesis
4. Dra. Floría Roa Gutierrez,  
Asesora de tesis
5. Dr. Henry Quesada Pineda,  
Asesor de tesis [por medio de videoconferencia]

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_

#### El título de la Tesis es:

"Modelo para la identificación y reducción de la huella de carbono de una cadena de suministros industrial"

La disertación y defensa concluyen a las 10:20 horas.

Luego de realizada la evaluación del trabajo de tesis, la defensa y las respuestas a las preguntas realizadas a la aspirante por parte del tribunal evaluador, se le otorga la nota final de: 95.6

Comité Gestión Académica

Tel: (506) 2475-5310 / (506) 2277-3276 / (506) 2202-1810

TEC | Tecnológico  
de Costa Rica

UNA  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL



## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por permitirme culminar con éxito esta investigación.

Un agradecimiento muy especial al doctor Marcos Moya Navarro, por asesorarme en esta tesis, por su generosa disponibilidad para atender mis consultas y por todos sus consejos, sin su ayuda, no hubiera sido posible cumplir esta meta.

También agradezco a la asesora doctora Floria Roa Gutiérrez, por atender durante estos años mis dudas y por todas sus valiosas sugerencias.

Al asesor doctor Henry Quesada Pineda, por su amable colaboración durante el desarrollo de esta tesis y por todas sus acertadas indicaciones.

A todos los profesores del DOCINADE, quienes durante los cursos y seminarios procuraron guiarme acertadamente para la culminación de este proceso.

Asimismo, deseo extender mi agradecimiento a las coordinadoras del énfasis de Gestión y Cultura Ambiental del DOCINADE, por su atención y guía en los estudios.

Finalmente, agradezco profundamente al Instituto Tecnológico de Costa Rica, por apoyarme y permitirme desarrollar los estudios doctorales, y a los miembros del Consejo de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, por la confianza que me brindaron a lo largo de estos años.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en el desarrollo de esta tesis.



## Tabla de contenido

ÍNDICE DE CUADROS .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE APÉNDICES .....	vii
RESUMEN .....	viii
ABSTRACT .....	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento y definición del problema .....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Justificación.....	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Gestión ambiental.....	9
2.2 Cadenas de suministros .....	14
2.3 Cadenas de suministros sostenibles .....	18
2.4 Responsabilidad social.....	22
2.5 Modelado de cadenas de suministros sostenibles .....	25
2.5.1 Modelado para la determinación de la huella de carbono en cadena de suministros.....	27
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	42
3.1 Modelado a nivel macro: estructuración del problema .....	45
3.2.1 Variables de entrada.....	48
3.2.2 Variables de salida .....	52
3.2.2.1 Flujos de bienes.....	52
3.2.2.2 Configuración de la cadena de suministros .....	53
3.3 Perfil del modelo: objetivos del modelo y restricciones del modelo .....	56

3.3.1	Objetivos del modelo.....	56
3.3.2	Restricciones del modelo.....	57
3.4	Recolección de datos: los valores de los parámetros de entrada.....	58
3.5	Solución del modelo .....	59
3.6	Prueba del modelo .....	60
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		61
4.1	Formulación matemática del modelo.....	62
4.2	Aplicación del modelo a la cadena de suministros de un producto .....	70
4.2.1	Definición de la cadena de suministros del caso de estudio.....	70
4.2.2	Valores de los parámetros de entrada de la cadena de suministros del caso de estudio.....	73
4.3.	Solución: obtención de la configuración óptima de la cadena de suministros .....	84
4.3.1	Configuración de la cadena de suministros para la optimización de los costos.....	85
4.3.2	Configuración de la cadena de suministros para la optimización de las emisiones de carbono.....	86
4.3.3	Comparación de la optimización de los costos contra la optimización de las emisiones de la cadena de suministros.....	88
4.3.4	Configuración de la cadena de suministros para la optimización de los costos totales combinando los costos de las emisiones de carbono con los costos operativos .....	91
4.3.6	Configuración de la cadena de suministros para la optimización por metas de los costos y de las emisiones de la cadena de suministros .....	95
4.3.7	Comparación de los resultados de las opciones de optimización del modelo .....	101
4.3.8	Configuración de la cadena de suministros al considerar fuentes alternas de energía.....	104

4.3.9 Configuración de la cadena de suministros al considerar la colaboración de las fábricas para la distribución.....	107
4.3.10 Análisis de variación en los valores de parámetros de entrada del caso de estudio mediante la simulación.....	108
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	116
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES.....	121
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	124
APÉNDICES.....	139

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2. 1 Factores de emisión de carbono encontrados en los modelos.....	40
Cuadro 2. 2 Tipos de modelos matemáticos formulados y paquetes de software	41
Cuadro 3. 1 Parámetros de los proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas.....	49
Cuadro 3. 2. Parámetros de la distribución entre los actores de la cadena. ....	51
Cuadro 4. 1. Actores de la cadena de suministros y sus ubicaciones.....	71
Cuadro 4. 2. Valores de los parámetros de entrada para los proveedores. ....	74
Cuadro 4. 3. Valores de los parámetros de entrada de las fábricas.....	75
Cuadro 4. 4. Valores de los parámetros de entrada para los centros de distribución. .....	76
Cuadro 4. 5. Valores de los parámetros de entrada para los detallistas. ....	77
Cuadro 4. 6. Valores de los parámetros de entrada para distribución de proveedores a fábricas. ....	78
Cuadro 4. 7. Valores de los parámetros distancias, rendimientos y costos para la distribución de insumos de proveedores a fábricas. ....	79
Cuadro 4. 8. Valores de los parámetros de entrada para distribución de las fábricas hacia los centros de distribución. ....	80
Cuadro 4. 9. Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución de las fábricas hacia los centros de distribución. ....	80
Cuadro 4. 10. Valores de los parámetros de entrada para distribución desde los centros de distribución hacia los detallistas. ....	81
Cuadro 4. 11. Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución desde los centros de distribución hacia los detallistas.....	82
Cuadro 4. 12. Valores de los parámetros de entrada para distribución de fábricas hacia los detallistas.....	83
Cuadro 4. 13. Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución desde las fábricas hacia los detallistas. ....	84
Cuadro 4. 14. Solución para la optimización de los costos de la cadena de suministros.....	85

Cuadro 4. 15. Solución para la optimización de las emisiones de carbono de la cadena de suministros. ....	87
Cuadro 4. 16. Comparación de la optimización de las emisiones de carbono y de los costos de la cadena de suministros. ....	88
Cuadro 4. 17. Solución para la optimización de los costos de cadena de suministros con distintos límites de emisiones de carbono. ....	95
Cuadro 4. 18. Análisis de sensibilidad de la optimización de metas ambiental y económica para la cadena de suministros. ....	100
Cuadro 4. 19. Resultados para cada opción de optimización del modelo para la cadena de suministros. ....	102
Cuadro 4. 20. Solución para la optimización de las emisiones de carbono cuando la fábrica F1 tuvo mayor eficiencia energética. ....	105
Cuadro 4. 21. Solución para la optimización de las emisiones de carbono cuando la fábrica F2 tuvo mayor eficiencia energética. ....	106
Cuadro 4. 22. Parámetros de costos y variación considerada. ....	109
Cuadro 4. 23. Valores de la distribución triangular para cada parámetro. ....	109
Cuadro 4. 24. Resultados de la optimización con las variaciones en los parámetros de costos de transporte y costos fijos de operación de fábricas y centros de distribución. ....	110
Cuadro 4. 25. Valores de la distribución triangular para cada demanda. ....	112
Cuadro 4. 26. Resultados de la optimización multiobjetivo por metas con demandas de clientes variables. ....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Insumos para establecer las condiciones y variables. ....	43
Figura 3. 2. Etapas seguidas para la elaboración de un modelo matemático para la cadena de suministros para reducir la huella de carbono. ....	44
Figura 3. 3. Actores de la cadena de suministros considerados en el modelo matemático.....	45
Figura 3. 4. Fuentes de emisión de carbono de la cadena de suministros. ....	47
Figura 3. 5. Variables de entrada y salida del modelo matemático. ....	48
Figura 3. 6. Opciones de optimización del modelo matemático. ....	57
Figura 4. 1. Ubicación de los actores de la cadena de suministros en Costa Rica y Nicaragua.....	72
Figura 4. 2. Comparación entre las emisiones de carbono, de los procesos productivos y de los traslados, al optimizar los costos y las emisiones de carbono. ....	89
Figura 4. 3. Comparación entre los costos, de los procesos productivos y de los traslados, al optimizar los costos y las emisiones de carbono. ....	90
Figura 4. 4. Emisiones totales para distintos valores de costo de las emisiones de carbono. ....	91
Figura 4. 5. Costo total para distintos valores de costo de las emisiones de carbono. ....	92
Figura 4. 6. Costo total para distintos valores límite de las emisiones de carbono. ....	94
Figura 4. 7. Probabilidad de cada actor en la configuración de la cadena de suministros acuerdo con la simulación.....	111
Figura 4. 8. Configuración de la cadena de suministros para la simulación de variaciones en las demandas de los clientes .....	114
Figura 4. 9. Comportamiento de las emisiones de carbono de la simulación de variaciones en la demanda de los clientes.....	115

## ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE 1.....	140
APÉNDICE 2.....	145
APÉNDICE 3.....	148
APÉNDICE 4.....	151
APÉNDICE 5.....	154
APÉNDICE 6.....	157
APÉNDICE 7.....	160
APÉNDICE 8.....	166
APÉNDICE 9.....	170
APÉNDICE 10.....	177
APÉNDICE 11.....	181
APÉNDICE 12.....	184
APÉNDICE 13.....	187
APÉNDICE 14.....	191
APÉNDICE 15.....	202

## RESUMEN

El incremento en la emisión de gases de efecto invernadero es el principal causante del cambio climático. Si bien Costa Rica no es un emisor significativo se ha propuesto la meta, al igual que otros países, de reducir sus emisiones e incluso llegar a ser carbono neutral en un futuro cercano. La gestión de la cadena de suministros y las decisiones sobre su configuración inciden en la magnitud de la huella de carbono. Por estos motivos se realizó esta investigación cuyo objetivo general fue desarrollar un modelo matemático para la identificación y reducción de la huella de carbono de la cadena de suministros.

La configuración de la cadena de suministros que se investiga en este trabajo la conforma una red de proveedores, fábricas, centros de distribución y clientes. Mediante factores de emisión de carbono, se establecen las emisiones de las actividades de producción y transporte involucradas, que luego aplicando los factores de calentamiento global se transforman en emisiones de carbono equivalente. El modelo desarrollado optimiza la configuración de la cadena de suministros para minimizar el impacto de la huella de carbono. También está en capacidad de optimizar el costo total de operación de la cadena. Más allá, determina la configuración de la cadena de suministros para optimizar los costos y limitar la cantidad de emisiones de carbono. Adicionalmente, el modelo propuesto permite valorar económicamente las emisiones de carbono y determinar así la configuración óptima de la cadena de suministros para un costo conjunto de las emisiones y de la operación. Finalmente, el modelo optimiza simultáneamente el objetivo económico y el ambiental, y establece la configuración de la cadena de suministros que se acerque lo más posible a valores definidos de emisiones de carbono y de costos, cuando no sea posible alcanzar ambos.

Para cumplir estos objetivos, se desarrolló un modelo de optimización de redes que se resolvió con programación matemática lineal entera mixta. La aplicación de este a la cadena de suministros de un producto del sector alimentario demuestra su utilidad para investigar diferencias entre las configuraciones de dicha cadena cuando se optimiza un objetivo económico y uno ambiental. El modelo encontró una configuración que favorece un acuerdo razonable entre ambos. Su aplicación evidenció que, en tanto prevalezcan los objetivos económicos sobre los ambientales, es difícil reducir las emisiones de carbono por el aumento que ello provoca en los costos de operación de la cadena. Por el contrario, conforme se valora más el impacto de estas, la búsqueda de su reducción es más asequible.

En este aspecto, el modelo propuesto contribuye significativamente a comprender la importancia que tiene la huella de carbono de la cadena de suministros tanto para las empresas como para los responsables del establecimiento de políticas para el desarrollo sostenible. El modelo es versátil y puede aplicarse a las cadenas de suministros de diversos productos, en tanto cumplan con su configuración, y estos últimos se puedan transportar y almacenar.

Los escenarios del cambio climático que se prevén a futuro conllevan perjuicios a nivel económico y social. Además, a pesar de la búsqueda de fuentes alternativas de energía, la dependencia de los combustibles fósiles continuará siendo una realidad en el corto y mediano plazo. Por ello, es necesario reducir las emisiones de carbono en favor de todos los habitantes del planeta. En consecuencia, el modelo apoya la responsabilidad social empresarial al aportar información relevante, relacionada con el efecto económico y con la huella de carbono, de las decisiones de la gestión de la cadena de suministros, y, aún más, al establecer una configuración que reduce las emisiones de carbono. Es así como el modelo propuesto conlleva beneficios sociales, ambientales y económicos.

## ABSTRACT

The increment of greenhouse gases is the main cause of climate change. Worldwide regulatory pressure regarding their emission has been increasing in late years. Though Costa Rica is not a significant emitter, it is seeking, as other countries, to reduce them, and in fact, is committed to become a carbon-neutral country in the near future. This research was conducted to develop a mathematical model aimed to identify and reduce carbon emissions in supply chain management.

The structure of the supply chain network in this research included suppliers, plants, warehouses and retailers. The carbon emissions related to each of the activities involved were calculated by means of carbon emission factors and through global warming factors they were converted into carbon equivalent emissions. The model determines a supply chain network that minimizes the impact of the carbon footprint and its total cost. In addition, the designed model achieves a supply chain network that minimizes total costs under a carbon limit. Moreover, the proposed model can determine the supply chain network that minimizes a combined function of emissions and operational costs. Furthermore, it finds a network model that comes closer to reach certain desired environmental and economical target values. A network optimization mathematical model solved by mix integer linear programming was developed to meet these requirements.

The application of the model to the supply chain case of a manufactured product, showed this proposed model could be used to obtain an insight of the differences and similarities between supply chain networks when costs and carbon emissions are optimized in parallel. Most importantly, the model determines the network that accomplishes a reasonable agreement between the emissions and cost objectives, that is, a network with fewer carbon emissions at a low-cost increment. This research

also found that when economic objectives prevail over environmental objectives, carbon emission reduction becomes difficult. Hence, the model makes a significant contribution to the body of research in understanding the importance of the carbon footprint in the supply chain network. Therefore, the model hereby designed, is useful for both manufacturing enterprises and sustainable development policy makers. In addition, the model is versatile, and it can be applied to several product supply chains, as long as they have an analogous network.

Climate change projections and future scenarios reveal it will severely harm society and economy. Despite the search for alternative energy sources, clean and renewable, fossil fuel dependency will prevail in the short and midterm future. Therefore, tackling the problem of reducing greenhouse gases emissions is necessary on behalf of the entire world population. The proposed model encourages corporate social responsibility, due to the economic and environmental impact information it provides for decision making in supply chain network management. Even more, the potential carbon reduction emissions from this model have important environmental, social and economic benefits.



# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

## 1.1 Antecedentes

El aumento de los gases de efecto invernadero en el planeta es el principal causante del cambio climático, el cual ha ocasionado perjuicios a nivel ambiental, social y económico. Moreno y Urbina (2008) afirman que el incremento en las emisiones de carbono incide directamente en la productividad agrícola y en la salud de las personas. Ten Have (2010) señala que el calentamiento global es el problema más grave que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Algunas empresas industriales se han adelantado a la medición de su huella de carbono, sin embargo, no suelen considerar su cadena de suministros en esta tarea. Chase y Jacobs (2014) presentan un estudio que muestra que solo en un 17% las gerencias de compañías manufactureras dieron actualizaciones sobre el cambio climático y solo un 11% de los gerentes asumieron papeles de liderazgo a este respecto, lo cual denota una baja responsabilidad ambiental.

Los medios para enfrentar el cambio climático contemplan la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la rehabilitación de los bosques y un cambio profundo en el sistema energético. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2014) ha solicitado llevar las emisiones netas de gases de efecto invernadero a cero para el año 2100 y ha instado, principalmente a los países desarrollados, a comprometerse con este objetivo. Por su parte, Costa Rica en el 2007, se comprometió a alcanzar la carbono neutralidad en el año 2021, pero en el 2015 anunció la extensión del plazo para alcanzarla en el 2050.

La cadena de suministros está compuesta por la configuración proveedores, fábricas y almacenes, así como por los procesos de logística que se requieren para hacer llegar los materiales a las fábricas y los productos de estas a los clientes. La selección de la configuración de la cadena de suministros se ha regido principalmente por el costo y, de manera reciente, por factores como la flexibilidad y el tiempo, en aquellos casos donde el suministro oportuno es decisivo. Sin

embargo, en la manufactura de productos, las emisiones de gases de efecto invernadero se dan con distinta intensidad a lo largo de sus cadenas de suministros; por ello, Cervantes, Sosa, Rodríguez y Robles (2009) señalan que el enfoque de la ecología industrial con miras a lograr el desarrollo sostenible debe incluir las cadenas de suministros de las empresas industriales.

## **1.2 Planteamiento y definición del problema**

La configuración óptima de una cadena de suministros contempla estudiar sus actores. La configuración que se estudia en esta investigación está compuesta por proveedores, fábricas, almacenes o centros de distribución, clientes o detallistas, así como por las operaciones de la logística requeridas para el traslado de los bienes. La configuración de la cadena de suministros se conoce como una decisión estratégica y de largo plazo, por lo que, sus impactos en el tiempo son de gran relevancia. Además, define en gran medida aspectos menos estratégicos y más operativos, como los medios de transporte, sus características y capacidades. Al mismo tiempo, la cadena debe satisfacer las demandas de producto de los clientes tomando en cuenta limitantes como las capacidades de entrega de proveedores y de producción de las fábricas, así como las de almacenamiento en las fábricas y en los centros de distribución.

Por lo tanto, el estudio de la cadena de suministros involucra un procesamiento complejo de una gran cantidad de variables, con el fin de poder llegar a resultados óptimos. Esto hace que la vía de la modelación matemática resulte indispensable para lograrlo. Por ello, esta investigación se concreta en el desarrollo de un modelo matemático que apoye la toma de decisiones referentes a la configuración de una cadena de suministros de una empresa de manufactura de bienes tangibles, almacenables y transportables. El estudio de la configuración de esta cadena parte de que las decisiones tomadas en ella resultan tanto en un costo operativo como en una huella de carbono. En consecuencia, se analiza el uso de combustibles fósiles

de manera directa e indirecta por la energía eléctrica. Asimismo, se incluye el consumo de combustible en las operaciones de los procesos productivos y en los transportes tanto de las materias primas como de los bienes producidos. Igualmente, comprende las descargas de refrigerantes en los procesos productivos y en los transportes.

La pregunta de la investigación es ¿Cómo lograr una carbono neutralidad en una cadena de suministros industrial? El objetivo del modelo matemático es apoyar decisiones para un desarrollo sostenible, por lo que no solo contiene indicadores económicos, sino también de corte ambiental. En esta investigación, las emisiones de carbono equivalente asociadas a la configuración de la cadena de suministros son el indicador ambiental utilizado, con el fin de afrontar el cambio climático. Por lo tanto, el modelo contribuye con las acciones para mitigar el cambio climático, específicamente, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la cadena de suministros.

Si bien pareciera conveniente buscar minimizar las emisiones de carbono de la cadena de suministros, esto puede no ser atractivo desde el punto de vista económico. La configuración de la cadena de suministros que conlleva las menores emisiones de carbono no implica que sea la del menor costo económico, incluso su costo puede ser más alto del deseado. De esto, surge uno de los principales motivos de la investigación, la cual busca determinar las decisiones sobre la configuración, que resulten en una mayor concordancia en el cumplimiento de ambos objetivos. Además, se pueden plantear distintas opciones de gestión ambiental con miras a la reducción de la huella de carbono; estas pueden ir desde el establecimiento de límites a la emisión hasta la valoración económica de las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la concientización sobre sus externalidades negativas. El valor económico de mercado otorgado a las emisiones de carbono es útil para definir la configuración de la cadena de suministros óptima ante un

esquema de impuesto al carbono o de compensación en busca de la carbono neutralidad. Primordialmente, el modelo se orienta a contribuir en la toma de decisiones, con miras a la reducción de la huella de carbono para una gestión de la cadena de suministros más sostenible.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo general**

Diseñar la configuración de la cadena de suministros mediante un modelo matemático cuyos resultados reduzcan su huella de carbono.

#### **Objetivos específicos**

Identificar las variables que influyen en la configuración de la cadena de suministros y las condiciones que debe cumplir esta para ser una cadena de suministros sostenible.

Elaborar un modelo matemático para la optimización de la configuración de la cadena de suministros bajo criterios económicos y del indicador huella de carbono.

### **1.4 Justificación**

Al revisar la literatura relativa al problema, se han encontrado estudios sobre cadenas de suministros e incluso referentes a la modelación matemática de configuraciones de estas para la optimización de los costos empresariales involucrados. Sin embargo, fueron pocas las investigaciones de cadenas de suministros que apuntaran a su sostenibilidad mediante el diseño de la configuración con modelos matemáticos. Hong, Kwon y Roh (2009) señalan que la carencia de modelos no permite responder los frecuentes cuestionamientos sobre los beneficios de implementar una administración verde en los negocios. Por su

parte, la cantidad de estudios que incorporaban indicadores ambientales como la huella de carbono fue aún menor. Además, se encontró una gran variedad de planteamientos como modelos que se enfocaron solo en la distribución o en el aprovisionamiento de materiales. Otros no contemplaron la posibilidad de centralizar mediante almacenes o centros de distribución y otros que asumieron la distribución hacia los clientes únicamente desde ellos. También, hubo modelos cuyo interés era solamente la infraestructura para la logística inversa en la cadena de suministros.

Debido a lo anterior, el estudio y la modelación matemática de la huella de carbono en la cadena de suministros de una empresa de manufactura planteados en esta investigación toman relevancia. Con el modelo, será posible analizar integralmente la configuración de la cadena de suministros, pues este contempla las emisiones de gases de efecto invernadero generadas desde los proveedores de los materiales hasta los clientes, incluyendo las de los transportes entre ellos. Adicionalmente, el modelo valorará el beneficio de operar centros de distribución, con el fin de reducir las emisiones. El modelo que se propone es novedoso ya que el conjunto de estas variables no había sido contemplado en los modelos encontrados en la literatura.

El modelo busca determinar la configuración de la cadena de suministros que cumpla tanto los objetivos económicos como los ambientales, además, con otras opciones de gestión de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el establecimiento de límites de emisión o su valoración económica. Los resultados del modelo mejoran el conocimiento sobre el efecto de las decisiones referentes a la configuración de la cadena de suministros en la huella de carbono y en los costos operativos. Se espera que tal saber desencadene tanto el interés como la preocupación para favorecer acciones que promuevan reducir tales emisiones y fomentar así un desarrollo industrial más sostenible. Por ende, el modelo es de

utilidad en el ámbito industrial y en el establecimiento de políticas gubernamentales para la reducción de emisiones.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

## **2.1 Gestión ambiental**

Los sistemas de gestión ambiental se basan en la metodología del mejoramiento continuo, su fin último es prevenir los efectos ambientales adversos y promover acciones para preservar o mejorar la calidad ambiental (Van Hoof, Monroy y Saer 2008).

El mejoramiento del ambiente es un indicador del desempeño de una organización y es parte de su eficiencia. Los indicadores de mejoramiento del ambiente consideran la eficiencia en el consumo de recursos como el agua, la energía y las materias primas (Evans y Lindsay, 2005).

En referencia a la gestión ambiental de una organización, el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO, 2004), en el INTE-ISO 14001, destaca que no existe un enfoque único para la identificación de los aspectos ambientales. La norma indica que pueden considerarse tanto las emisiones a la atmósfera, como los vertidos al agua, las descargas al suelo, el uso de las materias primas y de los recursos naturales. Además, el uso de la energía y la generación de residuos y de subproductos.

El Departamento de Alimentos, Ambiente y Asuntos Rurales (DEFRA, 2006) enlista 22 indicadores clave del desempeño ambiental, clasificados en: emisiones al aire, al agua, a la tierra y el uso de los recursos. Entre las primeras, se incluyen las de los gases de efecto invernadero.

Con respecto al indicador ambiental de huella de carbono, Ercin y Hoesktra (2012) indican que el término se desarrolló en los años 90 derivado del concepto de huella ecológica, pero dirigido a la medición del impacto en el cambio climático. Se refiere al efecto de las actividades humanas en el medioambiente, en especial, en las

condiciones del clima relativas a las emisiones de gases de efecto invernadero. Corresponde a la masa de emanaciones de dióxido de carbono equivalentes por unidad de producto o de tiempo. Abreviadamente, se denominan emisiones de carbono.

Asimismo, la huella de carbono involucra seis gases de efecto invernadero: el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los hidrofluorocarbonos ( $\text{C}_n\text{H}_x\text{F}_{(n+2-x)}$ ), los perfluorocarbonos ( $\text{C}_n\text{F}_{n+2}$ ) y los hexafluoruros de azufre ( $\text{SF}_6$ ). La huella de carbono se denota en unidades de carbono equivalentes, porque las emisiones corresponden a varios gases, no solamente a este elemento, que precisamente se convierten a una sola unidad, emisiones de carbono (Carbon Trust, 2012).

Las fuentes de gases de efecto invernadero pueden ser unidades o procesos físicos que liberan el gas a la atmósfera, mientras que los sumideros más bien lo remueven del ambiente. Las organizaciones interesadas en realizar estudios de emisiones y remoción de estos gases deben establecer los límites operativos. El origen de los factores de emisión o remoción tiene que ser reconocido y se sugiere usar los factores de emisión del IPCC. Los inventarios de gases de efecto invernadero generalmente se presentan en toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente (INTECO, 2006a).

En referencia al análisis de ciclo de vida, el INTECO (2007) lo define, en INTECO 14040, como el tratamiento de aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida del producto o servicio. Este análisis, denominado de la cuna a la tumba, comprende desde la adquisición de materia prima, hasta la producción, utilización, tratamiento final, reciclado y disposición final. También, indica que el análisis de ciclo de vida (ACV) consta de cuatro fases.

La primera fase es definir el objetivo y el alcance. Este último incluye los límites para el sistema y el nivel de detalle que depende del tema y tipo de estudio. La segunda consiste en el análisis del inventario, consta de un registro de datos de entrada y salida del sistema. Los primeros son energía, materia prima, entradas auxiliares y otras físicas. Las salidas corresponden a flujos de producto, materia (incluyendo emisiones y vertidos) y energía. La tercera fase es la evaluación del impacto ambiental. Finalmente, está la de interpretación. Se destaca que, al estructurar los resultados en torno a una unidad funcional, los análisis posteriores son relativos a esa unidad.

La huella de carbono del producto es una aplicación visible de comunicación relacionada con el perfil ambiental de un artículo, solo mediante datos referentes a las emisiones de gases de efecto invernadero. La diferencia entre el análisis de ciclo de vida y la huella de carbono de dicho producto está en los parámetros significativos. Estos son más amplios en el primero, pues la huella de carbono se enfoca solo en el impacto sobre el calentamiento global. El ciclo de vida requiere definir un alcance y metas, mientras que la huella de carbono del producto, una modelación de este. Para modelar la huella de carbono es de suma importancia definir la unidad funcional y luego los límites del sistema del producto (Lee, 2013).

En referencia a la medición de la huella de carbono, Pandey, Agrawal y Pandey (2011) indican que se han establecido diversas iniciativas metodológicas. Las más relevantes han sido las metodologías PAS 2050, en Gran Bretaña, BPX30-323, en Francia, la norma ISO 14040/44, y el protocolo GHG del World Resource Institute (WRI) y World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Además, mencionan los estándares del DEFRA en Gran Bretaña y de la Agencia Ambiental (EPA) de Estados Unidos. Pandey *et al.* (2011), Mc Kinnon (2010) y Radu, Scricciu y Caracota (2013) coinciden en que el protocolo GHG del WRI y del WBCSD es la

metodología más sólida para el estudio de la huella de carbono, tanto para el caso corporativo como para el de un producto.

La European Comission (2013) presenta una propuesta metodológica para Europa dada la gran cantidad de distintas metodologías existentes. Respecto al uso de fuentes secundarias, sugieren, en primer lugar, emplear las bases de datos de organizaciones gubernamentales internacionales como la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA). De no ser posible, sugieren utilizar las de los gobiernos de cada país, sino las de proyectos nacionales, las de terceros y en último caso las de literatura revisada.

El WRI y WBCSD (2011) presentan, en el estándar para el reporte y contabilidad del ciclo de vida de un producto, la manera de determinar su huella de carbono. Este estándar se relaciona con el denominado de alcance 3 del mismo protocolo GHG, pues ambos consideran la cadena de valor o el enfoque del ciclo de vida. Dicho protocolo establece que para determinar la huella de carbono de un producto es necesario considerar su ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta la disposición final (posterior a su uso). Muestra que las compañías deben emplear los factores de potencial de calentamiento global del IPCC (2007). También, señala que es fundamental aplicar un factor de potencial de calentamiento global de 100 años para las emisiones y remociones de gases, a fin de pasar las primeras a unidades de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalentes. Además, sugiere utilizar los factores de emisión del IPCC para establecer las emisiones de carbono equivalente de las actividades que se realicen.

Con respecto a los límites del sistema para los análisis de ciclo de vida, el WRI y el WBCSD (2011) indican en el protocolo GHG que los estudios pueden ser del tipo de cuna a la puerta o de la cuna a la tumba. Sobre el impacto ambiental del producto

por el uso del cliente señalan que corresponde al análisis denominado de cuna a la tumba. También pertenece a este análisis el tratamiento final, reciclado y disposición final del producto.

El análisis de cuna a la tumba requiere de una gran cantidad de supuestos que debilitan la precisión de los resultados. Particularmente, introduce consideraciones muy específicas de la cadena de suministros que se estuviera analizando. Por ello, señalan que se ha considerado más robusto el análisis denominado de la cuna a la puerta (Chomkham Sri y Pelletier, 2011). Matthews, Hendrickson y Weber (2008) sugieren abordar la cadena de suministros bajo el enfoque cuna a la puerta (“cradle to gate”) y considerar las herramientas al calcular la huella de carbono dentro del análisis de ciclo de vida, para identificar las fuentes de verdadera reducción.

Sobre el uso de factores de emisión de gases de efecto invernadero para establecer las emisiones de carbono equivalente, el estándar de ciclo de vida de un producto del Protocolo GHG del WRI y del WBCSD (2011) sugiere emplear los (factores de emisión) que establece el IPCC. El estándar del protocolo GHG muestra dos formas de recolectar las emisiones de gases de efecto invernadero, una es midiéndolas de forma directa, y la otra, recolectando información sobre las actividades y estableciendo sus factores de emisión. Estos últimos son las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad, los cuales al multiplicarse por el dato de la actividad dan como resultado la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, el estándar del protocolo GHG señala como fuentes de factores de emisión las bases de datos de análisis de ciclo de vida, reportes de productos, agencias gubernamentales, asociaciones industriales, investigaciones ampliamente revisadas y también los reconocidos a nivel científico que han desarrollado algunas compañías o sectores industriales. Con respecto al uso de factores de emisión del

IPCC, Hao y Fu (2013) indican que para estimaciones se puede hacer uso de ellos. Radu *et al.* (2013), y Carballo-Panela y Doménech (2010) utilizaron los factores de emisión de carbono del IPCC en sus estudios de huella de carbono.

La norma C-Neutralidad de INTECO (2011) establece que una organización para conseguir ser carbono neutral primero debe medir su huella de carbono y determinar así acciones para reducirla al máximo. Puntualiza que las emisiones que la empresa no pueda reducir, pues afectaría sus operaciones y productividad, se podrán compensar. La norma señala los proyectos de cambios tecnológicos en los procesos, los mecanismos de producción más limpia, los proyectos forestales y los de producción agropecuaria sostenible como medios para disminuirla.

También, establece tres esquemas aceptados para la compensación, dos tienen como tercera parte verificadora un ente internacional que corresponde a los mecanismos de desarrollo limpios (CERs) y las reducciones voluntarias (VERS). El tercero, concerniente a las unidades costarricenses de compensación (UCC), tiene como verificador un ente nacional. Las UCC se definen como unidades de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_{2e}$ ) de emisiones evitadas, reducidas, removidas o almacenadas que cumplen con poder monitorearse, verificarse y reportarse.

## **2.2 Cadenas de suministros**

La cadena de suministros se refiere a los procesos que desplazan información y material con origen y destino en la manufactura o servicios de la empresa, entre ellos los de logística y almacenamiento. El suministro se refiere a proporcionar artículos y servicios tanto a las fábricas y almacenes, en un extremo de la cadena, como a los clientes en el otro (Chase y Jacobs, 2014).

Silver, Pyke y Peterson (1998) clasifican las decisiones de las cadenas de suministros en grandes dos tipos: las de estructura y las de coordinación. Las decisiones de estructura de la cadena de suministros corresponden a la ubicación de las fábricas, centros de distribución o almacenes, así como a la cantidad y capacidad de las facilidades. Además, al momento y disposición de capacidad para subcontratar o expandir los productos en cada centro de distribución y el medio de transporte que se utilizará. El resultado de las decisiones de la estructura se conoce como configuración de la cadena de suministros.

Hopp y Spearman (2001) indican que la configuración de la cadena de suministros es en sí una variable de decisión, puesto que la ubicación de los centros de distribución, las políticas de conexión entre ellos y los niveles de inventario son decisiones de suma importancia para los sistemas de logística y distribución de las empresas.

Las mejores prácticas de la cadena de suministros se clasifican en la optimización de la cadena de suministros (SCOR), administración del riesgo y administración de la responsabilidad ambiental (GreenSCOR), según el marco Supply Chain Operations Reference SCOR®. Este marco enlaza los procesos de negocio con métricas, mejores prácticas y tecnología. El GreenSCOR incluye como métricas ambientalmente estratégicas las emisiones de carbono y de contaminantes al aire, la basura líquida generada (vertidos), los residuos sólidos, y el porcentaje de residuos reciclados (SCC, 2010). Con respecto al desempeño de la cadena de suministros, Kainuma y Tawara (2006) enlistan métricas como el servicio al cliente, el costo y la calidad.

En la actualidad, ha incrementado el interés por la colaboración, así como por la coordinación en la cadena de suministros principalmente con el objetivo de reducir el tiempo de respuesta de esta para el cliente, pero también con el objetivo de

disminuir sus costos (Tiwari, Mahanty, Sarmah y Jenamani, 2013). El incremento en el nivel de los requisitos ambientales impacta la naturaleza de los esfuerzos que realizan suplidores y distribuidores por colaborar en la cadena de suministros (Hong *et al.*, 2009).

Sobre el transporte, Chopra y Meindl (2008) indican que el éxito de la cadena de suministros está vinculado al uso apropiado del transporte. Este factor es una decisión atribuible a las condiciones de la zona, a las características del producto y al cliente. Los medios de distribución son el terrestre, el aéreo, el ferroviario y el marítimo. A pesar de que existen seis en total (agregando a los anteriores el ducto y la entrega a mano), casi ningún producto se puede trasladar prescindiendo del transporte terrestre. Este se clasifica como intermedio, tanto en el volumen que puede movilizar, como en la flexibilidad que brinda (Chase y Jacobs, 2014).

Al estar la logística basada mayoritariamente en la quema de combustibles fósiles no renovables, el transporte y el manejo de bienes son actividades en las que de una forma inherente se da una alta generación de carbono (Gao y Ryan, 2014). El aspecto más visible de la cadena de suministros en referencia a su impacto ambiental es el transporte, pues es fuente de emisiones de carbono, aproximadamente un 14% del total a nivel mundial, y de contaminantes como óxido nitroso (Nox), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y de partículas PM (Dekker, Bloemhof y Mallidis, 2012). Las emisiones de carbono de este dependen de las distancias recorridas y de los cargamentos transportados a lo largo de ellas, así como del medio de transporte utilizado (Kannegiesser y Günther, 2014). Los principales factores de la logística que inciden en el desempeño medioambiental de la cadena comprenden la selección de medios de transporte y vehículos “con conciencia ambiental”, así como la eficiencia del combustible de las flotillas vehiculares (Altmann y Bogaschewsky, 2014).

Con respecto a la creación de instalaciones como centros de almacenamiento, Aly y Baker (2013) señalan que existen diversas razones que justifican el que se deba almacenar desde materias primas hasta productos. Entre estas se encuentran mantener un inventario suficiente para balancear y sostener la variación entre las demandas y la producción, consolidar el producto que viene de diversos puntos de manufactura o combinar entregas a clientes comunes. Además, los centros de distribución permiten dar respuesta rápida a la demanda de los consumidores.

Estos centros de distribución permiten economías a escala, pues los envíos directos desde las fábricas hacia los puntos de venta suelen ser de mucho menor tamaño que los que se hacen a los centros de distribución. Por otra parte, los embarques desde los centros de distribución son más pequeños y recorren distancias más cortas. Sin embargo, tienen desventajas, principalmente con los niveles de inventario y costos por almacenamiento que pueden ser mayores a otros sistemas más sencillos. A pesar de estas, los centros de distribución en general ofrecen beneficios que los hacen atractivos (Nahmias, 2014).

La optimización en la red de la cadena de suministros puede mejorarse por el uso de centros de almacenamiento entre sus etapas. Actualmente, es común que los centros sean administrados por terceros: proveedores de logística que administran los flujos de producto que entra y sale del centro, y se encargan de los trámites del cambio de mano de los bienes. La administración de la cadena de suministros implica mejoras en dos o más compañías (Vollmann, Berry, Whybark y Jacobs, 2005).

El almacenamiento conlleva costos. De acuerdo con Chase y Jacobs (2014), estos abarcan desde los costos de las instalaciones, los de manejo de los productos, de seguros, de daños y desperdicios hasta la obsolescencia del inventario, su

depreciación, impuestos y costos de oportunidad del capital. Estos son más bajos cuanto menor sea el inventario y cuanto más reducido sea el período de rotación.

Chopra y Meindl (2008) destacan que una red de distribución adecuada es necesaria para lograr diversos objetivos, desde un bajo precio hasta una alta capacidad de respuesta. Los costos de la logística comprenden los del inventario, transporte e instalaciones de la configuración de la cadena de suministros. Los autores afirman que los costos de la distribución pueden representar aproximadamente un 20% del costo de fabricación.

### **2.3 Cadenas de suministros sostenibles**

Hay diferentes definiciones de cadenas de suministros sostenibles y prácticas para ejecutarlas, entre estas se encuentra la de administración de la cadena de suministros verde. La temática ha estado en constante evolución en temas como gestión 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. A las anteriores, se ha incorporado el concepto multijugador en la cadena de suministros, el concepto del triple objetivo, de suministros sostenibles y la administración de la cadena de suministros sostenible (Taticchi, Tonelli y Pasqualino, 2013).

Sobre las compras públicas verdes o la adquisición verde, Zhu, Geng y Sarkis (2013) indican que son un medio para reducir el impacto ambiental en las compras de producto durante su ciclo de vida. Subrayan que motivan a los productores a implementar diseños y procesos productivos amigables con el medio ambiente, pues obligan a los proveedores a reducir su consumo de recursos, así como a usar un transporte y empaque favorable. Por ello, afirman que es una primera aproximación para una futura política ambiental. En Costa Rica, para guiar a las instituciones públicas hacia una mejor gestión en sus adquisiciones, se elaboró un

manual de seguimiento voluntario para compras verdes con participación del Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial CEGESTI (2008).

La estructura de la cadena de suministros se debe redefinir acomodando preocupaciones ambientales, como lo es minimizar el uso de los recursos y residuos. La estructura tradicional de la cadena de suministros se debe extender para recobrar el producto. Entre los problemas que pueden emerger ante esta extensión está la incertidumbre sobre la cantidad de productos y empaques que se puedan recuperar, el tiempo que transcurra y la calidad de su estado. Por otra parte, administrar el proceso de distribución inversa, con su recolección y transporte puede llegar a afectar la ubicación de las facilidades, las estrategias de compra y el mismo desempeño ambiental. Adicionalmente, la cadena de suministros extendida debe cuantificar su consumo de energía, tanto de materiales como de los residuos que produce (Beamon, 1999).

Los principios sobre la protección medioambiental y conservación de energía en las operaciones de manufactura se aplican en la producción verde acotada como *Green production* (GP) o *Green manufacturing*. Su finalidad es reducir los desechos industriales, conservar la energía y los recursos, así como minimizar la contaminación del ambiente, mientras se alcanza la economía de fabricación deseada (Zhou, Pan, Chen y Yang, 2013). Las mejoras en producción verde usualmente entran en conflicto con las metas económicas. Hong *et al.* (2009) señalan que la administración verde es considerada deseable, pero al mismo tiempo costosa de implementar.

Martínez-Jurado y Moyano-Fuentes (2013) indican que los conceptos de procesos esbeltos y verdes o ambientales son complementarios. Ambos se encuentran gobernados por principios como la reducción de los residuos, el enfoque centrado en el proceso, es decir, el preventivo, y por presentar altos niveles de

involucramiento y participación de las personas. También subrayan que se ha encontrado que las compañías esbeltas crean oportunidad para aplicar principios de manufactura verde, y que los principios y prácticas esbeltas facilitan el logro de mejoras ambientales. Se ha descubierto que las empresas que han adoptado estrategias de manufactura esbelta también han implementado prácticas sustentables (Hassini, Surti y Searcy, 2012).

Las cadenas de suministros esbeltas y verdes demuestran oportunidades de mejora, tanto económicas como ambientales. Para ello, se han desarrollado guías como la de la agencia ambiental de Estados Unidos EPA. Uno de los principales obstáculos en las empresas es que los administradores usualmente no asocian las preocupaciones ambientales con la estructura tradicional de los sistemas contables, por lo que estos costos quedan ocultos. El ámbito de la cadena de suministros se debe extender para incluir la reutilización y el reciclado a través del ciclo de vida de los productos y de los servicios. Se han propuesto tres nuevas métricas para la administración de cadenas de suministros esbeltas y verdes, estas son la rentabilidad económica, la satisfacción del cliente y la valoración del ciclo de vida (*life cycle assesment*) (Kainuma y Tawara, 2006).

Sobre la administración de la cadena de suministros verde, Hoejmosé, Brammer y Millington (2012) señalan que se ha asociado con compañías muy visibles y dentro de industrias orientadas al consumidor y dirigidas por la concientización ambiental de los usuarios. Indican que la cadena de suministros verde se ha definido como la integración del pensamiento ambiental en la cadena de suministros, incluyendo el diseño del producto, la selección y aprovisionamiento del material, los procesos de manufactura, la entrega al cliente y el manejo del fin de vida del producto luego de su uso.

La sostenibilidad demanda iniciativas de múltiples actores, por lo que un requisito para la implementación de una gestión sostenible es la capacidad de los distintos actores para colaborar con los otros. Van Hoof y Thiell (2013) encontraron que la capacidad de colaboración de los suplidores está influenciada por las características de la compañía y de sus administradores, como por ejemplo el sector industrial. Concluyen que la colaboración puede contribuir a una dinámica interorganizacional ya que fortalece la capacidad de absorción de conocimiento y la estructuración de soluciones. También que la producción más limpia como meta contribuye a una mayor motivación. Destacan que la colaboración es esencial para una implementación efectiva de una producción más limpia y ésta a su vez permite avanzar en torno a una gestión más sostenible de la cadena de suministro.

La administración de la cadena de suministros orientada al medio ambiente es resultado de una respuesta a presiones externas, y también de una visión estratégica que busca obtener mejores resultados ambientales y comerciales. Actualmente, las compañías van más allá de los límites de sus procesos industriales y de su organización, enfocándose en el ciclo de vida de sus productos y servicios, es decir, en su cadena de suministros. Un mejor desempeño competitivo suele referirse a buscar un liderazgo en reputación, que ocurre cuando el ciclo de vida del producto mejora. Un ejemplo es una logística “verde” con los proveedores para reducir las emisiones del transporte. También puede referirse a lograr eficiencia como resultado de la reducción en el uso de materia prima, por ejemplo, el grosor del empaque. La cadena de suministros verde se puede ver como consecuencia de una estrategia innovadora en productos y procesos (Testa e Iraldo, 2010).

Ahi y Searcy (2013) afirman que las cadenas de suministros verdes han analizado los aspectos ambientales, dejando por fuera los sociales y económicos, por lo que concluyen que las cadenas de suministros sostenibles son una extensión de las cadenas de suministros verdes. Señalan que la sostenibilidad en los negocios ha

llevado a las organizaciones a considerar la implicación del ciclo de vida en sus decisiones y con ello a incrementar el estudio de la administración de la cadena de suministros.

La protección del medio ambiente, así como el paso hacia una economía baja en carbono puede tener efecto en la creación de empleos verdes (OECD, 2017). Los empleos verdes se caracterizan por ser íntegros, porque pueden orientarse a preservar el medio ambiente, a reducir el consumo de agua o mejorar el sistema de reciclaje (OIT, 2016). Los empleos verdes son oportunidades laborales que emergen a partir de la búsqueda de un mejor desempeño ambiental (Yi, 2013).

## **2.4 Responsabilidad social**

La responsabilidad social corporativa incluye la producción y el consumo sostenible, el uso de los recursos, el abordaje del cambio climático, y la valoración de los servicios ecológicos y de los ecosistemas. La norma ISO 14001 puede considerarse un requisito para el desarrollo del aspecto medioambiental de la norma ISO 26000 sobre Responsabilidad Social (Jiménez, 2009).

La norma ISO 26000 entre sus principios contempla maximizar la contribución al desarrollo sostenible, por lo que cada organización debe proporcionar datos verídicos sobre sus actividades y su impacto en el medio ambiente y en la sociedad (Aldanueva, 2012). Así mismo, las características de la responsabilidad de los negocios se expresan en un enfoque económico, ambiental y social de largo término (Ahi y Searcy, 2013). Con respecto a indicadores relacionados con la responsabilidad social para el desempeño de una organización, Evans y Lindsay (2005) señalan fundamentalmente el cumplimiento de las regulaciones sobre el ambiente, el servicio a la comunidad, las auditorías financieras y la ética.

En referencia a la responsabilidad extendida del productor (ERP), Van Rossem, Tojo y Lindhqvist (2006) indican que es un paso necesario para que la industria pueda convertirse en un “ciudadano corporativo” más responsable. El término surgió para direccionar el dilema sobre el ciclo de vida de los productos, especialmente después de su uso. Al extender las responsabilidades de los productores más allá de las puertas de la fábrica y crear incentivos económicos para la recolección, reutilización y reciclado se pretende que los empresarios tomen conciencia sobre el problema que representa administrar el fin de vida de los productos. Los autores enfatizan que el punto central de la ERP es que los fabricantes tratarán de minimizar los costos asociados al fin de vida de sus productos cambiando sus diseños. Por lo tanto, consideran que los gobiernos deben asegurar que las leyes de responsabilidad extendida del productor obliguen a los fabricantes a tomar conciencia financiera sobre el fin de vida del producto que manufacturaron.

En relación con la ética del medioambiente, Dietz, Fitzgerald y Shwom (2005) indican que un problema importante es si este y las especies tienen una importancia intrínseca para los seres humanos. Lo anterior debido a que cuando su valor es sólo el del medio para obtener los fines, se constituyen en valores instrumentales.

Tseng y Hung (2014) señalan que la mayor parte de los productores de emisiones de carbono no dan atención a los costos sociales y son más bien las sociedades terminan pagando por estos. Enfatizan que en un régimen óptimo los impuestos al carbono deben igualar los costos sociales resultantes de estas emisiones. Además, indican que existen diversos estudios que han aplicado aproximaciones, como el análisis de costo-beneficio para estimar los costos sociales en que se incurre por las emisiones de carbono.

Zakeri, Dehghanian, Fahimnia y Sarkis (2015) explican que se han propuesto dos esquemas: los mercados de carbono y los impuestos al carbono para regular las

emisiones de gases de efecto invernadero globales. Los mercados de carbono se han implementado en la Unión Europea. Los impuestos al carbono se han aplicado en Australia desde el año 2012. Los impuestos al carbono pretenden desestimular la generación de emisiones de carbono y para solventar los estragos que causan por su efecto en el cambio climático.

Van der Bergh y Botzen (2015) señalan que un impuesto al carbono puede estimular el consumo de productos y energía eléctrica bajos en este elemento. El impuesto óptimo podría lograr que los precios en la economía internalizaran el costo social de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción y consumo de bienes. Destacan que definir un valor en el costo social de las emisiones de carbono es complejo, entre otros motivos, por las expectativas en el crecimiento económico a futuro, por puntos de vista éticos al ponderar los niveles de bienestar entre distintas generaciones y por la incertidumbre en los escenarios de los efectos del cambio climático en el futuro.

Sobre la conciencia y cultura ambiental, Ramírez y Tovar (2010) afirman que ambos son elementos de la responsabilidad social empresarial. Señalan que el fortalecimiento de una educación de este tipo comprende un reto grande y es necesario hacerlo desde la empresa. Más allá, consideran que se debe iniciar en la familia. Indican que la educación ambiental pretende generar una conciencia en la búsqueda del desarrollo sostenible. Plantean la necesidad de lograr un compromiso para que, hasta en las decisiones más simples, se considere el impacto ambiental.

El conocimiento es importante para la modificación del comportamiento en relación con el ambiente y poder así pasar a la acción. Concretamente, del conocimiento es posible pasar a la atención y preocupación y de éstos a la intención de actuar. (Jensen, 2002) Para alterar el comportamiento de una persona se necesita cambiar su corazón y su mente. Por ello, la educación ambiental se preocupa no solo por el

conocimiento medioambiental, sino también por la formación de valores y actitudes para lograr un comportamiento medioambientalmente responsable. (Myers, 2004)

## **2.5 Modelado de cadenas de suministros sostenibles**

Eskandarpour, Dejax, Miemczyk y Péton (2015) indican que los modelos matemáticos para cadenas de suministros sostenibles se clasifican en de un solo objetivo y multiobjetivo, en deterministas o estocásticos, y en lineales y no lineales. Destacan que la gran mayoría de los modelos han sido lineales y muy pocos estocásticos. Indican que quienes proponen los de un solo objetivo han recurrido a convertir diversos objetivos a una misma unidad de medición. Ellos señalan como ejemplo, el traslado de los efectos ambientales a un monto económico. Indican los siguientes métodos de solución para los modelos multiobjetivo:

- a. Suma ponderada de los objetivos (weighted sum), que consiste en aplicar pesos a los distintos objetivos, para así resolverlos con aproximaciones de un único objetivo. Sin embargo, puede no representar el interés de quien toma la decisión.
- b. Método  $\varepsilon$ -constraint, que prioriza un objetivo y mantiene los otros como restricciones. Este método se adapta bien a la extensión del abordaje de un solo objetivo, como primordial, generalmente el económico.
- c. Análisis de decisión multicriterio, que incluye los procesos de jerarquía analítica y la programación por metas.
- d. Métodos iterativos y metas heurísticas, los métodos iterativos se prefieren cuando se quiere involucrar a los tomadores de decisiones en el proceso. Las metas heurísticas incluyen el uso de algoritmos genéticos de alta complejidad y tiempo para su resolución.
- e. Análisis híbridos, consideran la combinación de algunos de los métodos descritos y otros más.

Brandenburg, Govindan, Sarkis y Seuring (2014), en la revisión de literatura de casi dos décadas sobre la aplicación de métodos para investigar operaciones y modelos a la administración de cadenas de suministros sostenibles, encontraron que se han enfocado hacia un ganar- ganar en sostenibilidad. Indican que el modelado formal ha sido dominado por un análisis tipo acuerdos o trueques. Señalan la necesidad de contar con modelos para el estudio de la perspectiva interorganizacional y que se extiendan al nivel de los sectores industriales, analizando aspectos como la coordinación vertical. También afirman que los modelos cuantitativos pueden ser una base para decisiones legales y administrativas en las industrias.

Seuring (2013) señala tres grandes aproximaciones para el modelado de cadenas de suministros sostenibles: los modelos de equilibrio, los de análisis multicriterio y los de procesos de jerarquía analítica. Los de equilibrio han buscado balancear el nivel de inversión en tecnologías ambientales y los retornos esperados. Una de las principales críticas a estos modelos es que evalúan el equilibrio general entre un número de actores del mercado, pero no los ayudan directamente en sus decisiones, de ahí que se tengan también otros abordajes de modelado. Los de análisis multicriterio, usan la programación multiobjetivo y están ligados a los anteriores, pues su enfoque es tratar con los acuerdos o trueques entre objetivos opuestos. Por ejemplo, valoran el equilibrio entre la cadena de manufactura tradicional y la reversa, incluyendo los costos de operación y reciclado. Los modelos de jerarquía analítica también son de decisión multiobjetivo, pero basados en una técnica de decisión semicuantitativa. El autor señala que los estudios aplicaron los modelos a ejemplos numéricos, para mostrar las consecuencias de las decisiones, tan solo un análisis presentó datos reales empíricos.

Con respecto a la incorporación del ámbito social en los modelos de cadenas de suministros, Seuring (2013) afirma que ha estado ausente en la mayoría de ellos. Eskandarpour *et al.* (2015) indica que las principales dimensiones sociales que han

incorporado los modelos de cadenas de suministros han sido las condiciones laborales, los compromisos con la sociedad y la preocupación de los clientes. Entre las condiciones laborales, el empleo es el indicador social que más se ha utilizado. Para el análisis del compromiso con la sociedad, los indicadores que más se han aplicado son la salud de la población y la equidad en el acceso a los servicios médicos. Para analizar la preocupación de los clientes, encontraron como indicadores la contaminación ambiental en hospitales y el riesgo al emplear material reciclado.

### **2.5.1 Modelado para la determinación de la huella de carbono en cadena de suministros**

Los distintos nodos de cadena de suministros son fuentes de emisión de carbono. Los proveedores, las operaciones de logística de suministro a las fábricas, las fábricas mismas y la logística de las fábricas hacia los clientes generan emisiones. También durante el uso de los productos y en su disposición final se emiten gases de efecto invernadero. Los proveedores y las fábricas generan emisiones según los procesos que llevan a cabo. Las operaciones de logística hacia o desde la empresa generan emisiones por sus almacenamientos y transportes (Sundarakani, Souza, Goh, Van Over, Manikandan y Koh, 2010). Por ello, las características de un producto y su particular cadena de suministros son los condicionantes para un estudio de huella de carbono (Edwards, Mc Kinnon y Cullinane, 2011).

Sundarakani, Souza, Goh, Warner y Manikandan (2010) elaboraron un modelo para medir las emisiones de carbono en la cadena de suministros. Los autores examinaron la huella de carbono en cadenas de suministros de ciclo cerrado mediante modelos de transporte de Euler y de Lagrange (utilizados para plantear y resolver el problema del flujo de calor). Asumieron como no estacionarias las emisiones de la logística y como estacionarias las de los proveedores, fábricas y almacenes. Determinaron las emisiones de cada etapa de la cadena (nodos) y

aplicaron un modelo de difusión móvil de emisiones para las actividades logísticas de entrada y salida. Con esto, pudieron determinar el flujo de carbono (correspondiente al flujo de calor en el modelo de transporte) de cada nodo de la cadena. Señalan que se requiere dar atención a las emisiones de carbono al diseñar una cadena de suministros. Para que estas cadenas reduzcan sus emisiones de carbono, concluyen que se deben controlar metas e infraestructura como el uso de vehículos energéticamente eficientes, la reducción de residuos mediante procesos de optimización y el reciclado.

O'Brien, Capper, Garnsworthy, Grainger y Shalloo (2014) presentan un estudio de la huella de carbono para una lechería abarcando desde los insumos y fertilizantes hasta la puesta del producto en la puerta, es decir, un estudio denominado de la cuna a la puerta. Las emisiones de carbono en la granja fueron las correspondientes a la quema de combustibles fósiles y a la aplicación de urea y cal. Determinaron su impacto por medio de los factores IPCC. Las emisiones de metano las obtuvieron de fuentes específicas para el país, mientras que las asociadas a la elaboración y suministro de productos no agrícolas, como pesticidas, se estimaron empleando la base de datos del programa Ecoinvent y de la literatura. Las emisiones por el procesamiento y transporte de los alimentos para el ganado se calcularon también con Ecoinvent. Ellos consideraron los animales, plantaciones y estiércol como respiraderos de carbono, aduciendo que el IPCC establece que el carbono absorbido por ellos se devuelve a la atmósfera rápidamente por su transpiración, quema y descomposición. Determinaron que tal suposición impactó significativamente sus resultados. En su estudio, hicieron comparaciones entre Irlanda, Estados Unidos y Gran Bretaña, y encontraron una menor huella en las granjas con un alto nivel tecnológico, lo cual se explica precisamente por su mayor eficiencia.

Egilmez, Kucukvar, Tatari y Bhutta (2014) estudiaron la huella ambiental de 33 sectores alimentarios, usando el modelo de análisis de ciclo de vida de entradas y salidas económicas (EIO-LCA). Posteriormente, usaron el análisis por envoltura de datos (DEA), desarrollado por Charnes, Cooper and Rhodes (1978), para hacer un benchmarking del desempeño ambiental de los sectores con los resultados obtenidos. Consideran la unión de estas dos herramientas como la base de la metodología aplicada. Además, presentan los índices de desempeño ambiental. Destacan que el estudio de sostenibilidad del sector manufacturero de alimentos debe incluir su cadena de suministros para tener el conocimiento fundamental y completo de los impactos ambientales asociados. Estos autores encontraron cadenas de suministros industriales que emanan 3000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por kilómetro de forma directa y hasta 9000 de forma indirecta. Además, mientras el recorrido para la entrega final del producto es de 1642 km, el promedio por la cadena de suministros es de 6760 km. Sugieren enfocar a futuro la configuración de la cadena de suministros hacia un desempeño sostenible.

### **2.5.2 Modelado matemático de cadenas de suministros sostenibles**

Pishvae, Rabban y Torabi (2011) proponen un modelo de programación lineal mixta para el diseño de una cadena de suministros de ciclo cerrado con recuperación y disposición de productos. Indican que el diseño de la configuración de una cadena de suministros inversa o reversa incluye determinar la cantidad de localizaciones, su capacidad de recolección y recuperación, así como centros de disposición, los inventarios para cada sitio y la cantidad que fluye entre cada par de facilidades. Asumieron un modelo multieslabón en el que los productos se almacenan en un punto donde se inspeccionan para luego trasladarlos a las instalaciones de recuperación o a los centros de disposición, propios o de terceras partes, cuando se clasifican para desechar. Estos autores no estudiaron la proveeduría, solo la recuperación del producto. Las variables de decisión fueron los flujos de producto retornado desde el cliente, desde el punto de recolección, desde

el centro de recuperación y desde el centro de redistribución. También la cantidad de producto para desecho. Además, el diseño de la configuración con los centros de recolección, de recuperación y de redistribución. El objetivo fue minimizar el costo total, cuya función incluyó tanto los operativos como los del transporte. El modelo resultó en un problema de programación lineal entera mixta. Para la solución, utilizaron el paquete de software ILOG CPLEX 10.1.

Sheu, Chou y Hu (2005) desarrollaron un modelo para problemas de logística de las cadenas de suministros verdes. El modelo se centró en estudiar los subsidios gubernamentales otorgados para la logística inversa. Consideraron una cadena de suministros compuesta desde los proveedores de materiales hasta las fábricas de desensamble del producto retornado. La función objetivo optimiza las ganancias netas de las operaciones tanto de la logística de la manufactura como las correspondientes a la tasa de producto retornado. Ellos aplicaron una tasa de producto retornado que, afirman, puede estar determinada por el sistema de gestión verde o bien para cumplir con las políticas existentes a nivel ambiental. Para el conjunto de miembros del canal de distribución de ambas cadenas (normal y reversa), el modelo persiguió los flujos óptimos a fin de maximizar la ganancia. El modelo fue de programación lineal multiobjetivo. Lo aplicaron a una cadena de suministros de una industria de computadoras portátiles en Taiwán. Así, determinaron que el valor de los subsidios gubernamentales es decisivo para la ganancia de la logística inversa, la cual es mayor cuanto más elevadas sean estas ayudas. Asimismo, encontraron relaciones de trueque entre los flujos de la logística del negocio y los correspondientes al producto retornado.

Yeh y Chuang (2011) elaboraron un modelo para incluir 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 multiproducto, 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 multiobjetivo. 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 y utilizaron el software Visual Basic. A pesar de abordar una evaluación verde, este modelo no contiene indicadores de emisiones de gases de efecto invernadero para analizar el impacto de la selección de proveedores en el cambio climático.

### **2.5.3 Modelado matemático de las emisiones de carbono en la cadena de suministros**

Le y Lee (2011) proponen un modelo para minimizar los impactos económicos y ambientales simultáneamente, el cual se concentra en las funciones de la cadena de suministros, estudiando así la localización, inventario, producción, distribución y transporte. Con el modelo, determinaron el flujo de bienes en distintos periodos del año y la emisión de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que analizaron bajo cuatro escenarios que fueron: los pedidos sin fecha de entrega, los pedidos con fecha de entrega, los almacenes distribuidores trabajando independientemente y trabajando conectados. El modelo resultó en uno de programación lineal entera que resolvieron usando el software Lingo 11. Estos investigadores aplicaron el modelo a la configuración de la cadena de suministros de una industria taiwanesa. Entre sus resultados, destacan que la conexión entre los almacenes de distribución resultó ser beneficiosa para el caso de pedidos con fecha límite de entrega. Los autores solo consideraron las emisiones debidas a los trasiegos, no tomaron en cuenta las de los procesos dentro de los proveedores, fábricas o almacenes. Valorizaron emisiones de acuerdo con un mercado de carbono. Las distancias entre proveedores y fábricas fueron despreciadas. Para el transporte, emplearon emisiones por unidad de distancia sin

analizar el efecto del peso de la carga trasegada. Usaron para la solución el método *weight sum method*, en éste establecieron una relación 3 a 1 entre costo y ambiente.

Diabat y Simchi-Levi (2010) presentaron un modelo para la configuración de la cadena de suministros tomando 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 estudiaron 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. Los autores añadieron una restricción que limitaba las emisiones de carbono de la cadena de suministros, asumiendo un límite estipulado por las regulaciones ambientales. El modelo permitió encontrar 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 utilizaron ILOG CPLEX 11.0 en el lenguaje GAMS.

Wang, Lai y Shi (2011) propusieron un modelo para el diseño de la configuración de una cadena de suministros incorporando consideraciones ambientales. En su modelo buscaron acuerdos entre el costo y la influencia sobre el medioambiente. La configuración consideró a los proveedores, fábricas y clientes. Estudiaron la influencia de los procesos de manejo de materiales y transporte en las emisiones de carbono y en el costo. Sin embargo, no consideraron el almacenamiento intermedio en centros de distribución. Tampoco incluyeron el desglose de los materiales que requieren las fábricas de los proveedores. Añadieron una variable que llamaron nivel de protección ambiental de la instalación. A mayor nivel de esa variable, consideraron que menor sería la cantidad de emisiones de carbono, es decir, la variable denotaba la inversión en tecnologías sofisticadas con menor emisión de carbono. El modelo resultó en uno de optimización multiobjetivo no lineal que transformaron en uno de programación lineal entera mixta. Aplicaron su modelo

a un caso basado en la cadena de suministros en una empresa China. Encontraron que al aumentar la capacidad y cantidad del suministro tanto las emisiones como el costo total pueden bajar. Para la solución utilizaron Solver del ILOG CPLEX 9.0.

Chaabane, Ramudhin, y Paquet (2012) proponen un modelo matemático para diseñar la configuración de una cadena de suministros genérica 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 medio 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 multiobjetivo, con un objetivo económico y otro ambiental. Para la función del objetivo ambiental se consideró la minimización de las emisiones de gases efecto invernadero. Sin embargo, no calcularon las emisiones de carbono debidas a los proveedores. Utilizaron el modelo para analizar la cadena de suministros de una industria de aluminio. Encontraron que una regulación ambiental que imponga límites a las emisiones de carbono puede hacer que las actividades de reciclado decrezcan si sus los costos no se optimizan. Usaron el software LINGO para resolverlo.

Abdallah, Diabat y Simchi-Levi (2010) desarrollaron un modelo para una cadena de suministros con compras o adquisiciones verdes bajo un esquema de mercado de carbono en el que se puedan vender y comprar créditos de carbono. Su objetivo fue la minimización del costo total compuesto por los costos fijos de la localización de las instalaciones, los costos de los traslados, el costo de las compras y los costos

de la posible compra y venta de créditos en el mercado. Las variables de decisión fueron la configuración y el flujo. En su investigación utilizaron montos para el carbono desde los 0 hasta \$100 por tonelada de carbono. Encontraron que conforme el precio de los créditos de carbono aumenta, la cantidad de centros de distribución a operar también aumentan, aunque sus capacidades disminuyen. El modelo de programación entera mixta se resolvió con el software ILOG CPLEX 11.0 en el lenguaje GAMS.

Altmann y Bogaschewsky (2014) elaboraron un modelo robusto de optimización multi objetivo para el diseño de la configuración de una cadena de suministros de ciclo cerrado (closed-loop). La configuración considerada en el modelo abarca desde proveedores hasta centros de recolección de producto. Sin embargo, no consideraron el almacenamiento intermedio en centros de distribución hacia los clientes. En la función objetivo minimizaron conjuntamente los costos totales y las emisiones de carbono equivalente. Las variables de decisión fueron las ubicaciones de los actores, así como el trasiego tanto de materiales como de producto terminado y producto retornado para cerrar el ciclo. Aplicaron el modelo al caso de la cadena de una empresa del sector metalmecánico. Las demandas y tasas de producto retornado las estudiaron con incertidumbre por lo que examinaron escenarios discretos. Encontraron que el factor de peso utilizado para valorar cada uno de los dos objetivos, económico y ambiental, tiene un gran impacto en los resultados, por lo que sugieren estimar su valor con cautela. Para la solución utilizaron LINGO 13.0.

Gao y Ryan (2014) estudiaron el diseño de la configuración de una cadena de suministros de ciclo cerrado suponiendo incertidumbre en las demandas y tasas de producto retornado. Analizaron dos esquemas de regulación para las emisiones de carbono, los impuestos y el mercado de carbono. Definieron el problema como multiperíodo, para considerar que los flujos de transporte pueden variar en respuesta a cambios en las demandas o en las cantidades de producto retornado. Consideraron dos etapas: en la primera, incluyeron las decisiones de inversión en

infraestructura que se deben realizar antes de elaborar los escenarios de demandas y cantidades retornadas. Estudiaron una cadena de suministros compuesta por fábricas, almacenes y detallistas, pero no incluyeron a los proveedores. Las variables de decisión fueron las cantidades de producto transportado y los medios que se utilizaron, las instalaciones a operar, es decir la configuración, y la cantidad de créditos de carbono a vender o comprar dentro del mercado de carbono. Buscaron minimizar el valor presente total de la inversión y costos operativos esperados. Las restricciones fueron las debidas a las demandas de los detallistas y las cantidades de producto retornado. Encontraron que, a mayor costo del transporte, fue necesario poner en operación más instalaciones. Igual ocurrió al incrementar el costo del carbono ya que fue necesario reducir las distancias a recorrer. Para la solución usaron el software IBM ILOG CPLEX 11.0.

Elhedhli y Merrick (2012) proponen un modelo para el diseño de la configuración de una cadena de suministros considerando el costo de las emisiones de carbono. Su objetivo fue simultáneamente la minimización de los costos fijos de la configuración y los debidos a la logística y a las emisiones de carbono. Consideraron una cadena de suministros de tres eslabones: las fábricas, los centros de distribución y los detallistas. Los autores no incluyeron a los proveedores. Las variables de decisión fueron el flujo de unidades y las localizaciones de los centros de distribución. El modelo resultante fue de programación entera mixta. Los costos de las emisiones de carbono se consideraron en conjunto con los costos fijos y variables de localización y de producción. Modelaron la relación entre los costos de las emisiones y el peso de un vehículo a partir de datos empíricos. La relación resultó en un problema de minimización de una cóncava, por lo que usaron un procedimiento de relajación de Lagrange que luego se descompuso en dos partes, un problema de localización de una sola fuente y otra en un problema de la mochila (knapsack). Aplicaron su modelo a un caso de ubicación de fábricas encontrado en la literatura. Descubrieron que para minimizar las emisiones de carbono fue necesario reducir las distancias operando más centros de distribución, aunque estos se utilizaron a

capacidades inferiores a sus posibilidades. Para la solución, usaron el CPLEX 11.0 y el software Matlab 7.0.

Tsengy y Hung (2014) estudiaron los costos, tanto operativos como sociales, de las emisiones de carbono. La configuración de la cadena de suministros del modelo que propusieron contuvo proveedores, fábricas de manufactura y centros de distribución. Además, fue fija, es decir no contemplaron la selección de ninguno de los actores. La variable de decisión fue solamente el flujo de bienes en la configuración. La función objetivo fue el costo total operativo y social de las emisiones de carbono, el cual buscaron minimizar. Utilizaron valores de costo social por tonelada de dióxido de carbono emitida en el rango desde los 25\$/t hasta los 200\$/t. Aplicaron el modelo a la configuración de la cadena de suministros de una industria textil taiwanesa. Encontraron que a medida que el costo social de las emisiones se incrementa, estas se reducen, pero los costos totales se incrementan. Para la solución del modelo utilizaron LINGO.

Wang, Chen, Chen, Chen y Wang (2013) estudiaron el flujo logístico, la capacidad de expansión e inversión en tecnología para facilidades existentes y potenciales en una cadena de suministros de ciclo cerrado. Ellos elaboraron un modelo de programación entera mixta multiobjetivo 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 de producto a desechar. También analizaron posibles ubicaciones para las facilidades en las que se realizará el reciclado. Sin embargo, no contemplaron centros de distribución como parte de la configuración. Tampoco evaluaron las emisiones de carbono de las operaciones debidas a los proveedores. Posteriormente, adicionaron incertidumbre en el suministro, las demandas de los

consumidores y las cantidades de producto retornado. Encontraron que la cantidad de producto reciclado incide en la localización y tamaño de la facilidad para la logística inversa y también en el costo y emisión de carbono. Adicionalmente, descubrieron que operar más instalaciones de logística reversa incrementa las emisiones de carbono.

Krikke (2011) desarrolló un modelo para la configuración de una cadena de suministros de ciclo cerrado. Concretamente, su fin fue determinar las ubicaciones, tanto de la cadena tradicional como la de recuperación para el reciclado. También, consideraron las opciones de transporte. El modelo contó con una única función objetivo que fue la emisión de carbono producida por las operaciones, tanto de producción como de reciclado, por los transportes y por la ubicación de las instalaciones escogidas a operar. Este modelo no contempló los costos, o la dimensión económica, de la configuración de la cadena de suministros. El esquema formulado es una variante lineal de un modelo de programación entera mixta. Para la solución utilizaron Solver en Microsoft Excel. Lo aplicaron a un caso de estudio sobre la recuperación de máquinas fotocopiadoras de la cadena de suministros de una compañía global dedicada al manejo de documentación.

Nagurney, Yu y Floden (2013) desarrollaron un modelo para la configuración de una cadena de suministros considerando las actividades de producción, distribución y almacenaje. Los autores no incluyeron a los proveedores en el modelo. Su objetivo fue determinar los flujos óptimos de producto y las frecuencias de operación de estas actividades para maximizar las utilidades y minimizar las emisiones. Incluyeron las frecuencias de las actividades de distribución pues observaron que es posible realizar entregas con menor frecuencia, pero de mayor volumen. Unieron ambos objetivos en una sola función de utilidad mediante un peso para las emisiones de carbono. Este peso es lo que la compañía estaría dispuesta a pagar por unidad de emisión en cada enlace de la cadena y señalan que podría

corresponder a un impuesto. El costo total dependió de los flujos y de la frecuencia de las actividades, su función resultó ser convexa y continua. Estudiaron el transporte directo desde una planta de manufactura hasta el mercado de consumo. Analizaron múltiples posibilidades de almacenamiento, producción y transporte, y la teoría de juegos, con el fin de evaluar el impacto de la frecuencia de las actividades tanto en las ganancias como en las emisiones de carbono. El modelo permitió determinar la ruta óptima del producto y la frecuencia de operación de las actividades de la cadena de suministros. También, analizaron el impacto de las partículas en suspensión (PM) en la calidad del aire. El modelo fue resuelto mediante un algoritmo computacional.

Kannegiesser y Günther (2014) crearon un modelo para el diseño de configuración de una cadena de suministros sostenible de ciclo cerrado consistente en módulos de procesos, transporte y uso de producto; no consideraron a los proveedores. Ellos modelaron las capacidades de producción a escala regional, pues a ese nivel afirman que se puede trabajar sectores industriales para efectos regulatorios y no solo compañías particulares. Las variables de decisión fueron cantidades a producir, así como las capacidades de producción de cada proceso. Además, calcularon las emisiones de carbono directas e indirectas (como la electricidad). Para el transporte, evaluaron las cantidades que se trasegaron y el medio con su capacidad. También, modelaron el uso del producto, tomando en cuenta su ciclo de vida, pues alegaron que no siempre es óptimo reemplazar un producto por otro de nueva tecnología, dados los recursos necesarios para ponerla en marcha. Indican que la etapa de uso de un artículo depende de la industria y sus productos. Acoplaron su modelo, al ser genérico, para productos de ciclos de vida de años que posteriormente se revenden, reutilizan, desmantelan o desechan. En este análisis, otras variables de decisión fueron la cantidad de vehículos de diferente tipo en la flotilla y en cada localización. El modelo resultó en uno de programación lineal entera mixta. Para determinar las emisiones utilizaron los factores de emisión del IPCC 2007 y los criterios del Protocolo GHG. La función objetivo del costo total se valoró en tres escenarios: el

desempeño financiero, el trueque entre costo y ambiente, y el alcance de objetivos de sostenibilidad. Los autores no presentan una aplicación del modelo.

Ramudhin, Chaabane, Kharoune y Paquet (2008) elaboraron un modelo de optimización para el diseño de la configuración de una cadena de suministros que resolvieron con programación lineal entera mixta. La configuración modelada abarcó desde proveedores hasta clientes, sin embargo, solo se consideró la entrega directa de fábricas a consumidores, sin usar centros de distribución. En el modelo se analiza el efecto del medio de transporte y de la cantidad de vehículos. Las variables de decisión fueron el flujo productivo, las ubicaciones de los proveedores y fábricas, así como los medios de transporte. Como funciones objetivo se formularon dos: una de los costos totales y otra de las emisiones de carbono. Encontraron que cuando el interés ambiental es menor, se hacen más recorridos a distancias más lejanas. Al usar la programación por metas, alcanzaron una solución que reduce las emisiones de carbono sin aumentar en exceso los costos, es decir, una solución equilibrada para los costos y para el ambiente. Utilizaron CPLEX para resolver el modelo.

Zhao, Yiyun, Zhang y Huang (2017) afirman que el volumen, variedad y velocidad con que se genera la información actualmente dentro de las cadenas de suministros hacen que herramientas de analítica avanzada, como el “big data”, se requieran en su gestión. Consideran que los modelos de “big data”, que combinan la matemática con la computación y la estadística, se pueden aplicar al control de la contaminación y al manejo de los recursos naturales para alcanzar la sostenibilidad de la cadena. Proponen un modelo multiobjetivo para la gestión de la cadena de suministros que contempla una configuración que incluye proveedores, una fábrica, centros de distribución y centros de disposición final. Los autores no analizaron las ubicaciones de las empresas ni de los centros de distribución, tampoco el consumo del combustible. El factor de emisión que usaron para el transporte no consideró el peso de la carga trasegada por kilómetro. Para extraer los valores de los parámetros,

aplicaron el análisis *big data* para establecer límites de control y los valores promedio. El modelo investigó la minimización de tres objetivos: costos, emisiones de carbono y el riesgo asociado al uso de materiales peligrosos. Los autores consideraron un único factor de emisión de carbono para el transporte entre actores. Aplicaron el modelo a la cadena de suministros de una empresa dedicada a la industria de muebles acrílicos para sanitarios, como tinas de baño y otros más, en China. Para la solución utilizaron LINGO.

En general, los modelos matemáticos de cadenas de suministros revisados presentan distintos objetivos, variables, métodos, y herramientas de modelación y software para su resolución (*solvers*). En el Apéndice 9, se presenta un resumen y comparación de los modelos estudiados. El Cuadro 2.1 resume aspectos de los factores de emisión de carbono utilizados en los modelos.

**Cuadro 2. 1. Factores de emisión de carbono encontrados en los modelos.**

Factores de emisión de carbono	Autores
Factor de emisión dado en toneladas de CO <sub>2</sub> por distancia (km) Factor de emisión dado en toneladas de CO <sub>2</sub> por kWh para la operación en las fábricas y para la operación de los proveedores Factor de emisión dado en toneladas de CO <sub>2</sub> por m <sup>3</sup> operación en los almacenes	Le y Lee (2011) Diabat y Simchi-Levi (2010) Abdallah <i>et al.</i> (2010)
Inventario de emisiones en los procesos de manufactura, reciclado, destrucción y transporte dados para las cantidades de producto	Chaabane <i>et al.</i> (2012)
Factores de emisión por unidad en proveedores, fábricas y almacenes, y para el medio de transporte usado	Altmann y Bogaschewsky (2014) Wang <i>et al.</i> (2013) Elhedhli y Merrick (2012) con factores de EPA.
Factor de emisión por unidad de peso en el transporte Factor de emisión por producir producto en instalación	Tsengy y Hung (2014)

En el Cuadro 2.2 se sintetizan los tipos de modelos matemáticos que se encontraron.

**Cuadro 2. 2. Tipos de modelos matemáticos formulados y paquetes de software**

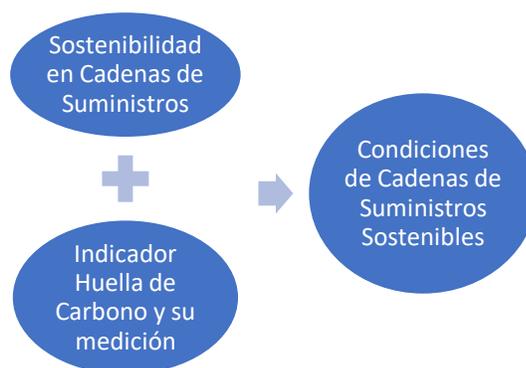
<b>Tipo de modelo</b>	<b>Autores y software utilizado</b>
Lineal entera mixta (programación lineal entera mixta)	Abdallah <i>et al.</i> (2010) con GAMS Le y Lee (2011) con LINGO 11 Diabat y Simchi-Levi (2010) con GAMS Krikke (2011) con Solver en Excel
No lineal entera mixta	Tsengy y Hung (2014) con LINGO
Lineal multiobjetivo (programación por metas)	Ramudhin <i>et al.</i> (2008)
Lineal multiobjetivo (programación entera mixta)	Wang <i>et al.</i> (2013) Chaabane <i>et al.</i> (2012) con LINGO
<b>Tipo de modelo</b>	<b>Autores y software utilizado</b>
Lineal multiobjetivo (con método de suma de pesos)	Altmann y Bogaschewsky (2014) con LINGO Sheu <i>et al.</i> (2005) Kannegiesser y Günther (2014) Wang, Lai y Shi (2011) Solver de ILOG CPLEX 9.0
Heurística primal (primal heuristic)	Elhedhli y Merrick (2012) con Matlab 7.0 y CPLEX 11.0
Teoría de juegos	Nagurney <i>et al.</i> (2013) algoritmo computacional
Transporte Euler y Lagrange	Sundarakani <i>et al.</i> (2010)
Modelos lineales estocásticos multiobjetivo y modelos con optimización robusta	Pishvae <i>et al.</i> (2011) con ILOG CPLEX 10.1 Gao y Ryan (2014) con IBM ILOG CPLEX 11.0 Altmann y Bogaschewsky (2014) con LINGO con varianzas (multiobjetivo con distintos pesos) Wang <i>et al.</i> (2013)

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

En esta investigación se desarrolla un modelo para la cadena de suministros de una empresa de manufactura. El interés se centra en desarrollar un modelo de la cadena de suministros que sea general, con el fin de que se pueda aplicar a una amplia variedad de productos que cumplan con ser tangibles, transportables y almacenables. Por lo tanto, esta investigación aplicada es de enfoque cuantitativo. Además, es explicativa y no experimental, en la que se elabora un modelo matemático de programación lineal entera mixta para evaluar la configuración de una cadena de suministros de manufactura y su efecto en el indicador de huella de carbono. La metodología seguida para cada objetivo es:

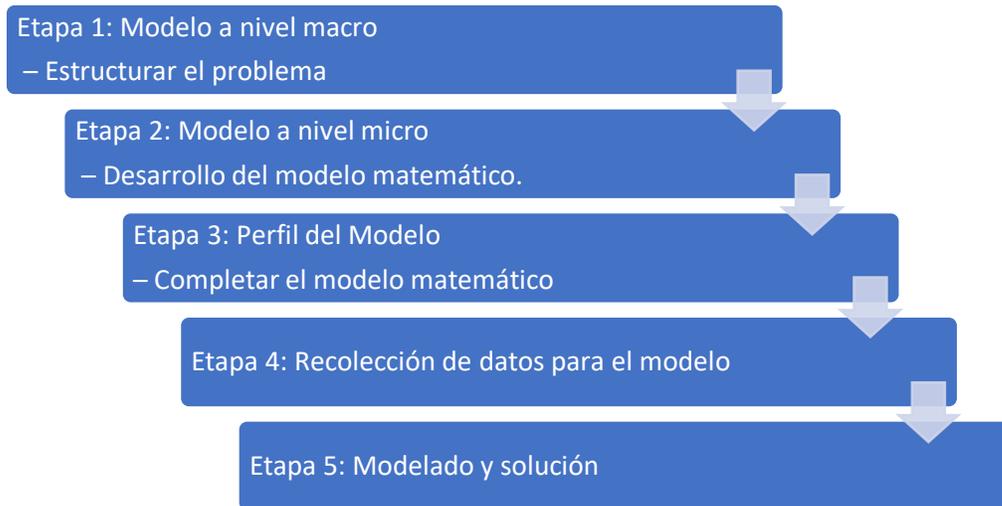
Objetivo específico 1: Identificar las variables que influyen en la configuración de la cadena de suministros y las condiciones que debe cumplir esta para ser sostenible.

Para este primer objetivo específico, se realiza una revisión de literatura sobre condiciones y variables para la configuración de una cadena de suministros sostenible de una industria de manufactura de productos. También, se revisa literatura sobre el indicador de huella de carbono y sobre las metodologías para su determinación, específicamente sobre la medición de la huella de carbono de cadenas de suministros. La Figura 3.1 resume la metodología seguida.



**Figura 3. 1.** Insumos para establecer las condiciones y variables.

Objetivo específico 2: Elaborar un modelo matemático para optimizar la configuración de la cadena de suministros bajo criterios económicos y del indicador de huella de carbono. La Figura 3.2. resume las etapas seguidas para este objetivo.



**Figura 3. 2.** Etapas seguidas para la elaboración de un modelo matemático para la cadena de suministros para reducir la huella de carbono.

A continuación, se explica brevemente cada una de las etapas.

Etapa 1: Modelo a nivel macro: estructuración del problema: en esta etapa se establecen aspectos importantes sobre el problema de la configuración de una cadena de suministros, actores, recursos y nexos.

Etapa 2: Modelo a nivel micro: desarrollo del modelo matemático: formulación: identificar los parámetros que se deben modelar por cada uno de los componentes identificados en la etapa 1. El modelo matemático requiere parámetros para sus componentes básicos que son la función objetivo y el conjunto de restricciones o limitantes del problema. Dichos parámetros son los coeficientes tecnológicos y lados derechos de las restricciones, así como los coeficientes de la función objetivo.

Etapa 3: Perfil del modelo: completar el modelo matemático: en esta etapa, se establecen los restantes parámetros del modelo como el horizonte de planeación y las metas del problema.

Etapa 4: Recolección de datos del modelo: parámetros de entrada: en esta etapa, se asignan valores numéricos a los parámetros de entrada del modelo.

Etapa 5: Modelado y solución: en esta etapa, se soluciona el modelo matemático, además, se generan informes para interpretar la solución y, de ser necesario, mejorar el modelo. También, se estudia la sensibilidad de parámetros críticos en los resultados y el comportamiento bajo escenarios de interés para los negocios de una cadena de suministros de una empresa manufacturera.

A continuación, se amplía la metodología para cada una de estas etapas.

### 3.1 Modelado a nivel macro: estructuración del problema

Para el modelo, se considera una configuración de cadena de suministros de cuatro eslabones. Estos son los actores de la cadena de suministros que se muestran en la Figura 3.3 Los detallistas representan tanto los clientes finales como los lugares donde los clientes llegan a recolectar sus productos.



**Figura 3. 3.** Actores de la cadena de suministros considerados en el modelo matemático.

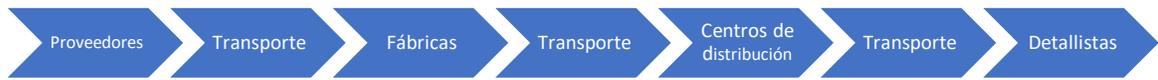
Los distintos actores, proveedores, fábricas, centros de distribución y clientes se pueden ver como nodos interconectados que detallan aspectos clave como: de qué proveedores se adquieren las materias primas para las fábricas, qué fábricas producen, qué centros de distribución deben operarse y cuáles fábricas los abastecen, así como qué centros de distribución envían a cuáles clientes. Para el desarrollo del modelo matemático, se contempla la existencia de los conjuntos finitos de ellos.

El problema que aborda el flujo de la configuración de la cadena de suministros de cuatro eslabones se puede representar como una red, que comprende a los actores y un flujo a través de esta, tanto de materiales hacia las fábricas como de productos de ellas hacia los clientes o detallistas. Por lo tanto, es posible conformar el problema como un modelo de optimización de redes.

Dadas las características del modelo, este se ajusta al problema denominado flujo de costo mínimo, que es un caso particular entre los modelos de optimización de redes, cuya gran ventaja es que se puede resolver por medio de programación lineal, de manera que tiene una solución muy eficiente (Hillier y Lieberman, 2010).

Las condiciones encontradas para una cadena de suministros sostenible y las variables que influyen en la configuración de la cadena de suministros, identificadas en el primer objetivo específico, son insumos para el desarrollo del modelo matemático.

Las emisiones de gases de efecto invernadero de la cadena de suministros provienen de los proveedores, las fábricas, los centros de distribución y de los traslados de los bienes mediante los medios de transporte utilizados para la distribución. Para la investigación, se contempla solamente el medio de transporte terrestre. La Figura 3.4. resume las fuentes de emisiones de carbono consideradas en el modelo.



**Figura 3. 4.** Fuentes de emisión de carbono de la cadena de suministros.

La extensión de las fuentes de emisiones, desde proveedores hasta detallistas (clientes), constituye los límites del sistema que contiene el modelo. Estos son análogos a los de un análisis de ciclo de vida de la “cuna a la puerta”. El modelo se dirige al control de las emisiones en la cadena de suministros a sabiendas de que son una parte importante, aunque no todas las ocasionadas en el ciclo de vida de un producto. El análisis de la “cuna a la puerta” abarca los aspectos que una empresa puede controlar y modificar.

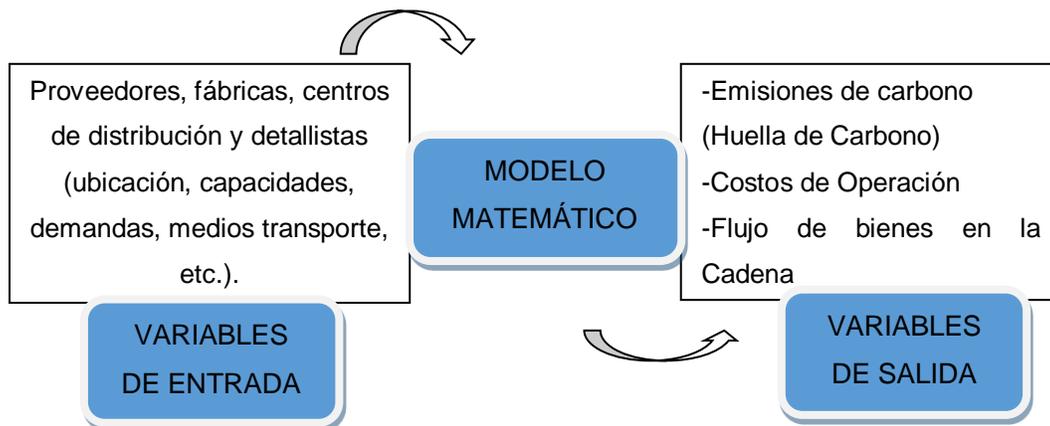
Los flujos de bienes, tanto de materiales como de productos, se consideran en una unidad agregada. Esta se utiliza como unidad funcional para el análisis. La unidad agregada para el estudio es el peso del producto, ya que es la característica que se utiliza para determina el transporte de la mayoría de los productos. Por ende, se trabajará con toneladas de producto.

### **3.2 El modelado a nivel micro: desarrollo del modelo matemático**

Con respecto a la demanda de producto de los detallistas, se establece que se debe satisfacer siempre, por ende, los detallistas serán todos aquellos que demanden producto. En cambio, se considera que tanto las fábricas como los centros de distribución, se pueden seleccionar de entre varios existentes, por lo que el modelo define cuáles fábricas y cuánta producción se asigna e igual lo hace con los centros. Para ello, el modelo analiza sus costos y emisiones de carbono al ser seleccionados. Para los proveedores el modelo también selecciona a cuál o cuáles

proveedores comprar y cuanto de cada material, permitiendo comprar un mismo material entre varios proveedores.

Las variables tienen una relación causal de forma. Una determinada configuración de la cadena de suministros produce una cierta huella de carbono y tiene un determinado costo de operación. La Figura 3.5. resume las variables tanto de entrada como de salida del modelo.



**Figura 3. 5.** Variables de entrada y salida del modelo matemático.

### 3.2.1 Variables de entrada

Para el desarrollo del modelo matemático se contempla la existencia de los conjuntos finitos de proveedores, materiales, fábricas, centros de distribución y detallistas. Estos se describen a continuación:

Un conjunto de una cantidad  $n$  de proveedores

Un conjunto de una cantidad  $r$  de materiales

Un conjunto de una cantidad  $j$  de fábricas

Un conjunto de una cantidad  $z$  de centros de distribución

Un conjunto de una cantidad  $w$  de detallistas

Los parámetros de entrada del modelo matemático se muestran en el Cuadro 3.1

**Cuadro 3. 1. Parámetros de los proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas.**

<b>Parámetros de los Proveedores</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Precio del material de cada proveedor	Precio de venta de materia prima (\$/t)
Capacidad de suministro del material	Capacidad para el periodo (toneladas)
Consumo energético del proveedor	kWh por tonelada de producto
Consumo de otras fuentes de energía	Lista de combustibles y consumo por tonelada de materia prima (l/t)
Descarga de refrigerantes del proveedor	Descarga de refrigerantes (kg/t)
Factor de emisión energía eléctrica del proveedor	Factor en kgCO <sub>2</sub> /kWh
Factor de emisión otras fuentes de energía del proveedor	Factor en kgCO <sub>2</sub> /l
<b>Parámetros de las fábricas</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Capacidad de cada fábrica	Capacidad (t) de producto
Costo de producción (variable) de la fábrica	Costo por tonelada de producto (costo variable \$/t)
Costo fijo de la fábrica	Costo fijo (\$)
Consumo energético de la fábrica	kWh por tonelada de producto
Fuentes de energía del proceso de la fábrica	Lista de combustibles y consumos por tonelada de producto
Demanda de las fábricas	Toneladas de cada material para el periodo
Descarga de refrigerantes de las fábricas	Cantidad descargada (kg/t)
Factor de emisión energía eléctrica de cada fábrica	Factor en kgCO <sub>2</sub> /kWh
Factor de emisión otras fuentes de energía de cada fábrica	Factor en kgCO <sub>2</sub> / l
Emisiones fijas de cada fábrica	Cantidad de kgCO <sub>2</sub>
<b>Parámetros de los Centros Distribución</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Capacidad de almacenaje del centro de distribución	Capacidad (t) en el centro de distribución.
Costo operativo del centro de distribución	Costo por tonelada de producto (variable \$/t)
Costo fijo del centro de distribución	Costo fijo (\$)
Consumo energético del centro de distribución	kWh por tonelada de producto
Otras fuentes de energía en el centro de distribución	Listado de combustibles y consumos por tonelada de producto
Descarga de refrigerantes del centro de distribución	Cantidad descargada (kg/t)
Factor de emisión energía eléctrica del centro de distribución	Factor en kgCO <sub>2</sub> /kWh
Factor de emisión otras fuentes de energía del centro	Factor en kgCO <sub>2</sub> /l
Emisiones fijas en el centro	Cantidad de kgCO <sub>2</sub>
<b>Parámetros de los Detallistas</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Demanda de cada detallista	Toneladas de producto

El Cuadro 3.1 muestra los parámetros de cada actor de la cadena de suministros, proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas con sus unidades de medida. Entre los parámetros de entrada, se encuentran los factores de emisión de carbono para la energía eléctrica y para otras fuentes energéticas. Mediante los potenciales de calentamiento global del carbono y de los otros gases de efecto invernadero involucrados, como metano y óxido nitroso, se convertirán todos a la unidad denominada carbono equivalente, como se muestra más adelante en la sección 3.2.2.3 Indicadores de la configuración.

De acuerdo con el Estándar de Ciclo de Vida del Producto del Protocolo GHG del WRI y WBCSD (2011), para determinar las emisiones debidas al consumo de electricidad es necesario definir el país en el que se ubican las instalaciones. Lo anterior porque las matrices energéticas difieren entre naciones (incluso en algunos casos entre ciudades). Además, se elaboran hasta el final de cada año, por lo que solo se pueden usar las existentes, o bien, se deberán realizar proyecciones a partir de los datos históricos. Así que, para seleccionar los factores de emisión de energía eléctrica, se requiere conocer la ubicación de la planta.

Por este motivo, al estimar las emisiones de carbono generadas por el consumo eléctrico en las fábricas, proveedores y centros de distribución se requerirá establecer sus ubicaciones. Para determinar las emisiones de carbono debidas a la generación energética mediante combustibles, así como las de descargas refrigerantes, también es necesario definir el país donde se encuentran las instalaciones para seleccionar los factores de emisión. Para el caso de las que están ubicadas en Costa Rica, se aplican los factores de emisión de carbono para la energía eléctrica reportados por el Instituto Meteorológico Nacional IMN (2014). Un extracto de este informe con dichos factores de emisión de carbono se encuentra en el Apéndice 10.

En el Cuadro 3.2., se muestran los parámetros de entrada referentes a las operaciones de la logística de distribución entre los actores de la cadena de suministros analizada en el modelo matemático.

**Cuadro 3. 2. Parámetros de la distribución entre los actores de la cadena.**

<b>Parámetro de la distribución de proveedores a fábricas</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Distancias de proveedores a fábricas	Distancias en km
Costo traslados de cada ruta del proveedor a fábrica	Costo de cada ruta (\$ / t-km)
Factor de emisión para cada ruta	Factor de emisión (kgCO <sub>2e</sub> / t-km)
<b>Parámetro de la distribución de fábricas a centros de distribución</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Distancias de las fábricas a los centros de distribución	Distancias (km)
Costo de traslados de la fábrica al centro de distribución	Costo de cada ruta (\$ / t-km)
Factor de emisión para cada ruta	Factor de emisión (kgCO <sub>2e</sub> / t-km)
<b>Parámetro de la distribución de centros de distribución a detallistas</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Distancias de los centros de distribución a clientes (detallistas)	Distancias (km)
Costo de traslados del CD al detallista	Costo de cada ruta (\$ / t-km )
Factor de emisión para cada ruta	Factor de emisión (kgCO <sub>2e</sub> / t-km)
<b>Parámetro de la distribución de fábricas a detallistas</b>	<b>Descripción y unidad de medida</b>
Distancias de las fábricas a clientes (detallistas)	Distancias (km)
Costo de traslados de fábricas a detallistas	Costo de cada ruta (\$ / t-km)
Factor de emisión para cada ruta	Factor de emisión (kgCO <sub>2e</sub> / t-km)

El Estándar de Ciclo de Vida del Producto del Protocolo GHG del WRI y WBCSD (2011) sugiere definir una unidad física para establecer las emisiones de carbono debidas al transporte, generalmente peso o volumen. El modelo, al pretender ser más genérico que específico, utiliza el peso del producto, pues el transporte de gran cantidad de los productos se ajusta a ese criterio. La Compilación de Factores de Emisión del Protocolo GHG del WRI y WBCSD (2012) presenta factores de emisión para el transporte de carga en vehículos de distintas características, por peso, en términos de (kgCO<sub>2</sub> / t-km), pero se basan en rendimientos de combustible altos.

Por ende, no se utilizaron esos factores, sino que se calcularon factores de emisión de carbono para el transporte.

Para establecerlos, se requirió de las características de sus flotillas: peso bruto y capacidad neta, así como el tipo y rendimiento del combustible (km/l) utilizado en cada ruta de conexión entre actores. A partir del rendimiento del combustible (km/l) de cada ruta de conexión entre actores de la cadena de suministros, se estima el consumo total de combustible de la ruta. Considerando el factor de emisión de carbono del combustible utilizado para la combustión móvil, que es un factor de emisión dado en  $\text{kgCO}_2 / \text{l}$  (IMN, 2014), así como las distancias y la carga transportada, y los factores de emisión de los otros gases de efecto invernadero involucrados, como el metano y el óxido nitroso, se estableció un factor de emisión para cada ruta en términos de  $\text{kgCO}_2\text{e} / \text{t-km}$ .

### **3.2.2 Variables de salida**

#### **3.2.2.1 Flujos de bienes**

Las variables de decisión contemplan los flujos de materiales y de productos en el periodo, esto es las cantidades de producto que fluyen de los proveedores a las fábricas, de estas a los centros de distribución y de estos últimos a los detallistas. Cada uno de estos flujos se representa como:

Material adquirido de los proveedores para las fábricas

Producto de las fábricas hacia los centros de distribución

Producto de los centros de distribución a los detallistas

### 3.2.2.2 Configuración de la cadena de suministros

Las otras variables de decisión son las que corresponden a la escogencia de las fábricas y centros de distribución a operar en la configuración de la cadena de suministros. También, se determinan los proveedores de los materiales.

#### a) Fábricas seleccionadas

Variable binaria en la que se determina, para un conjunto finito de instalaciones de fábricas, cuáles serán parte de la configuración.

#### b) Centros de distribución seleccionados

Variable binaria en la que se determina, para un conjunto finito de centros de distribución, cuáles serán parte de la configuración.

### 3.2.2.3 Indicadores de la configuración

Finalmente, se encuentran las variables que resultan de la configuración óptima que determina el modelo matemático, estas son:

#### a) Emisiones de carbono:

Estas se reportan en una cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>), para ello, se realiza el siguiente cálculo, indicado en el Estándar de Ciclo de Vida del Producto del Protocolo GHG del WRI y WBCSD (2011)

$$\text{kgCO}_{2e} = \text{datos de la actividad (unidades)} * \text{factor kg GEI / unidad} \\ * \text{potencial de calentamiento global (kgCO}_{2e}\text{/kgGEI)}$$

La expresión anterior implica cuantificar las actividades que generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), multiplicar esas cantidades por el factor de emisión del gas de efecto invernadero (GEI) en cuestión y luego multiplicar por su potencial de calentamiento global. Esto último para trasladar todas las emisiones de gases de efecto invernadero a emisiones de carbono equivalente. A continuación, se muestran los cálculos de las emisiones de actividades que implican consumo energético y su traslado a emisiones de carbono equivalente.

La cantidad de emisiones de carbono por consumo energético eléctrico se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\text{kg CO}_2 = \text{kWh requeridos para la producción} * \text{factor de emisión (kgCO}_2/\text{kWh)}$$

Las emisiones de carbono, producto del consumo de combustibles, se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\text{kg CO}_2 = \text{litros del combustible requeridos para la producción} * \text{factor de emisión} \\ (\text{kgCO}_2 / \text{litro del combustible})$$

Las emisiones de carbono, producto de la descarga de refrigerantes, se calculan con la siguiente expresión:

$$\text{kg CO}_2 = \text{kg del refrigerante descargados en la producción} * \text{factor de emisión} \\ (\text{kgCO}_2 / \text{kg de refrigerante})$$

Las emisiones de carbono que resultan de los transportes entre los actores de la cadena de suministros se determinan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{kgCO}_2 = \text{carga por distancia (t-km)} * (\text{factor de emisión kgCO}_2 / \text{t-km})$$

Para convertir las emisiones de los distintos gases de efecto invernadero a emisiones de carbono, se requieren los potenciales de calentamiento global de cada tipo de gas. Para ello, se utilizan los potenciales de calentamiento global a 100 años definidos por el IMN (2014) (ver Apéndice 10). Seguidamente, se muestra el traslado de emisiones de los gases de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, generados por los procesos de combustión, a emisiones de carbono equivalente. Como se muestra, para ello se calcula el producto de sus cantidades netas por los potenciales de calentamiento global de cada uno:

$$\text{kg CO}_2 \text{ e} = \text{kg CO}_2 * (1 \text{ kg CO}_2 \text{ e/ kg CO}_2) + \text{kg N}_2\text{O} * (310 \text{ kg CO}_2 \text{ e / kg N}_2\text{O}) \\ + \text{kg CH}_4*(21 \text{ kg CO}_2 \text{ e/ kg CH}_4)$$

b) Costos de la configuración

Los costos de la configuración seleccionada para la cadena de suministros se reportan en una cantidad económica, monetaria (dólares).

c) Huella de carbono

Con los resultados del modelo matemático se establece un indicador de emisión de carbono para la producción del periodo analizado. Este indicador se elabora con la cantidad de emisiones de la producción del periodo. Dicho indicador se puede trasladar a otros niveles, como cajas de producto y presentación individual.

$$\text{Huella de carbono de la producción del periodo=} \\ \text{Total emisiones CO}_{2\text{e}} \text{ (E) / Total producción del periodo}$$

### **3.3 Perfil del modelo: objetivos del modelo y restricciones del modelo**

#### **3.3.1 Objetivos del modelo**

El diseño de la configuración de la cadena de suministros suele responder a criterios económicos. En esta investigación el objetivo es diseñar una configuración para la cadena de suministros que responda también a criterios ambientales y más aún, que incorpore tanto criterios económicos como ambientales. Por este motivo, se establecen varias opciones para el diseño de la configuración de la cadena de suministros. Una opción es optimizar los costos de la cadena de suministros, este objetivo se denomina en la investigación como objetivo económico. El modelo también está en la capacidad de determinar la configuración de la cadena de suministros para optimizar las emisiones de carbono de la cadena de suministros. Este objetivo se denomina en la investigación objetivo ambiental.

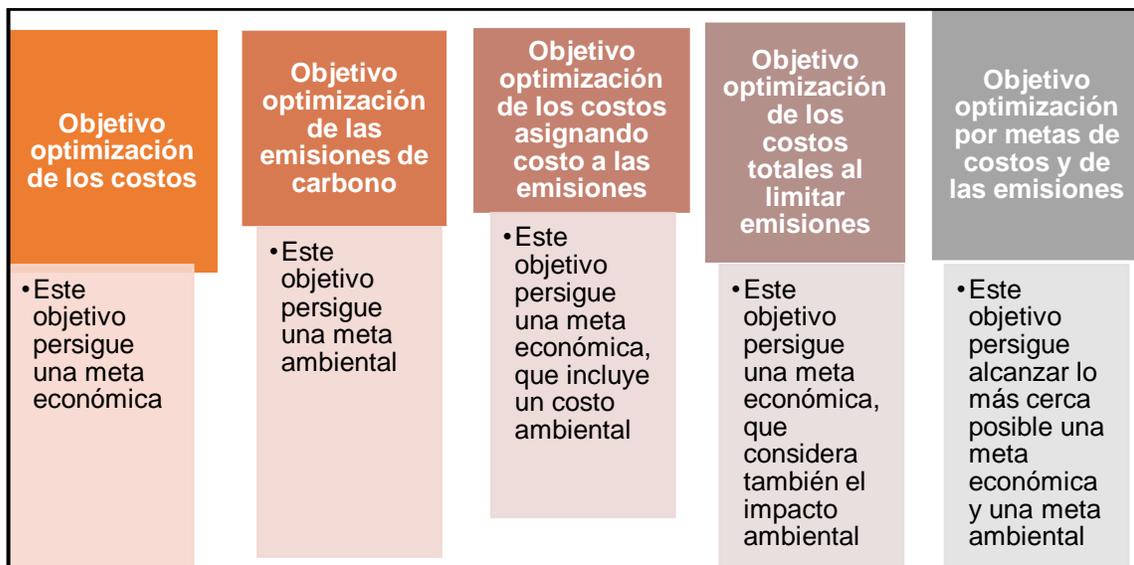
A las emisiones de carbono equivalente de la cadena de suministros es posible asignarles un valor económico de mercado (Ramudhin *et al.* (2008) y Chaabane *et al.* (2012)). Al fijar ese valor, el modelo combina los costos de las emisiones de carbono equivalente con los de la configuración en una única función matemática. Así otra opción del modelo es determinar la configuración de la cadena de suministros al optimizar los costos totales (incluidos los de las emisiones de carbono).

El modelo también está en capacidad de optimizar los costos operativos de la configuración de la cadena de suministros limitando la emisión de carbono de la cadena de suministros, al incluir un valor que limite a la emisión.

Finalmente, el modelo realiza la optimización simultánea de los costos operativos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros. Dado que no siempre

será posible lograrlo, el modelo obtiene una solución subóptima, esto es, una salida cercana. La alternativa de optimización simultánea se incluye en el modelo mediante la programación por metas.

A manera de resumen, las distintas opciones de optimización que proporciona el modelo, según los objetivos que se persigan para configurar la cadena de suministros se describen en la Figura 3.6.



**Figura 3. 6.** Opciones de optimización del modelo matemático.

### 3.3.2 Restricciones del modelo

Para emular mejor el comportamiento de la cadena de suministros se incorporan al modelo las condicionantes para su operación, como las capacidades de producción y la satisfacción de la demanda.

Con respecto a las capacidades, tanto las fábricas como los proveedores tienen la producción limitada. Por su parte, los centros de distribución tienen restricción de almacenamiento. Por ende, se plantean limitantes de capacidad para los proveedores, las fábricas y los centros de distribución (esto se denota en la unidad agregada del modelo que son las toneladas de producto para el periodo en estudio). Los centros de distribución además tienen una restricción de balance sobre los ingresos y egresos de material.

En relación con la demanda, los detallistas solicitan los productos, mientras que las fábricas, la materia prima requerida para sus productos. Por ende, se plantean restricciones de demanda de las fábricas y de los detallistas, que se denotan en la unidad agregada que utiliza el modelo (toneladas de producto y materia prima, respectivamente, para el periodo en estudio).

### **3.4 Recolección de datos: los valores de los parámetros de entrada**

Los parámetros de entrada del modelo se indicaron en los Cuadros 3.1 y 3.2. Como se muestra en dichos cuadros, el modelo contempla parámetros de entrada de todos los actores de la cadena de suministros. La cantidad de parámetros de entrada que contiene el modelo exige que se almacenen ordenadamente, máxime cuanto mayor sea el número de actores de la cadena de suministros que se analice. Por ello, se recomienda utilizar hojas electrónicas o bases de datos, según las necesidades y recursos disponibles.

El valor de cada parámetro de entrada es necesario consultarlo al actor que corresponda (proveedor, fábrica, centro de distribución o cliente). Este proceso de consulta es, en muchos casos, más bien un proceso de cálculo a partir de reportes o datos suministrados por el actor, que puede demorar un cierto tiempo y requerir de recursos. Para estimar los valores de parámetros como los consumos

energéticos, de combustibles, recargas de refrigerantes será conveniente analizar facturaciones y reportes internos. Los parámetros referentes a los costos es posible que no se conozcan con certeza por lo que será necesario aproximarlos también al analizar las facturaciones de materiales, pagos de nóminas y otros. Es importante aclarar que el modelo puede trabajar con valores promedio de los parámetros de entrada. Posteriormente se pueden analizar variaciones en los valores, para casos cuando se tenga baja certeza de ellos, o también analizar la sensibilidad de variaciones en los valores de los parámetros de entrada del modelo. Para fijar las rutas y las distancias se puede hacer uso de herramientas como Google Maps ® cuando se desconozcan o se requieran actualizar. Finalmente, los valores de los factores de emisión de carbono, que son otros parámetros de entrada del modelo, se determinan como se indica en la sección 3.2.1 Variables de Entrada, y las emisiones de carbono equivalentes se calculan como se indica en la sección 3.2.2.3 Indicadores de la Configuración.

### **3.5 Solución del modelo**

Al formularse el problema como un modelo de programación lineal mixta, se tiene la ventaja de que, si existe solución, es posible determinar la solución óptima. Este tipo de problemas es posible resolverlo mediante una gran variedad de software comercial. En la investigación se utiliza el Analytic Solver ® de Frontline Systems ® que se ejecuta en Microsoft Excel ®. Un mayor detalle sobre las características del Analytic Solver ® se presentan en el Apéndice 11.

El paquete LINGO de Lindo Systems ® es ampliamente conocido para la resolución de modelos de gran cantidad de variables y restricciones, también se utiliza para resolver el modelo. Con ello es posible corroborar los resultados obtenidos mediante el Analytic Solver ®. Un mayor detalle sobre las características del paquete comercial LINGO de Lindo Systems ® se presenta en el Apéndice 12.

### **3.6 Aplicación del modelo**

Para verificar la robustez del método de solución del modelo se seleccionó un ejemplo de cadena de suministros el cual se resolvió tanto en el paquete Analytic Solver® como en Lingo®. En las pruebas se introdujeron variaciones en los valores de los parámetros de entrada para luego verificar que los efectos en las variables de salida concordaran con los esperados para dichas variaciones. Se obtuvieron los mismos resultados en ambos paquetes. Los resultados de las pruebas se encuentran en el Apéndice 13.

Una vez verificado el correcto funcionamiento del método de solución del modelo, este se emplea para analizar un caso real de una cadena de suministros (de mayores dimensiones). El criterio para la selección de la cadena de suministros en la que se aplica el modelo es que cumpla con la configuración establecida en él, esto es con proveedores, instalaciones de fábricas, posibles centros de distribución y detallistas o clientes. La cadena de suministros escogida para aplicar el modelo es la de un producto alimenticio fabricado y comercializado en Costa Rica, ya que cumple con los criterios que se indican. El caso se basa en datos reales de la cadena de suministros del producto. La prueba del modelo tiene como objetivo evidenciar su aplicación a las condiciones de una cadena de suministros real.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo, se presentan los resultados de la investigación. En primer lugar, se muestra el desarrollo de la formulación matemática del modelo que se propone para optimizar la configuración de la cadena de suministros, el cual incluye criterios económicos y ambientales por medio del indicador de huella de carbono.

Posteriormente, se demuestra la utilidad del modelo matemático desarrollado mediante su aplicación al caso de la cadena de suministros de un producto alimenticio. En él, se puntualizan las distintas formas de aprovechar la versatilidad en dicho modelo. Entre ellas, se analiza la configuración que resulta al valorar económicamente las emisiones para optimizar el conjunto de costos operativos y de emisiones. Adicionalmente, se considera la configuración de la cadena de suministros también al optimizar los costos, pero limitando las emisiones de carbono. Asimismo, se estudia la optimización simultánea de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros. También se examina con el modelo el efecto que tiene la colaboración de las fábricas al distribuir los productos. Finalmente, se muestra que el modelo permite analizar el impacto de la reducción del consumo energético en las instalaciones de fabricación sobre las emisiones de la cadena de suministros del producto.

#### **4.1 Formulación matemática del modelo**

La cadena de suministros del modelo matemático consta de cuatro eslabones o actores: un conjunto de proveedores, otro de fábricas, otro de centros de distribución y otro de detallistas. El modelo se compone de variables de entrada, que son los parámetros que corresponden a cada uno de estos actores. Las salidas del modelo son métricas de interés en la cadena de suministros como los costos, pero también de impacto ambiental como las emisiones de carbono, al igual que el flujo de bienes y la configuración óptima de la cadena de suministros. Seguidamente, se presenta la formulación matemática completa del modelo que se propone.

Notación utilizada en el 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 las siguientes:

$x_{rij}$  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  $\forall k = 1 a z, l = 1 a w$

Las variables de decisión que corresponden a la configuración, concretamente a la selección de las fábricas y centros de distribución a operar son respectivamente:

$U_f$  variable binaria que toma el valor de uno cuando la fábrica se selecciona y cero cuando no.

$U_c$  variable binaria que toma el valor de uno cuando el centro de distribución se selecciona y cero cuando no.

Los parámetros de entrada son los siguientes:

$\alpha_{ri}$  Precio de venta de cada material r del proveedor i

$\beta_j$  Costo de producción de cada fábrica j (costo variable)

$\lambda_j$  Costo fijo de operar cada fábrica j

$\delta_k$  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 (toneladas)

$Dd_l$  Demanda de producto de cada detallista l (toneladas)  
 $\theta f_j$  Capacidad producción de cada fábrica j (toneladas)  
 $\theta p_{ri}$  Capacidad de suministros de material r de cada proveedor i (toneladas)  
 $\theta c_k$  Capacidad de almacenamiento de cada centro de distribución k (toneladas)  
 $EEp_{ri}$  Consumo energético eléctrico (kWh) de material r 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  
 $FEp_{ri}$  Litros de combustible por material r 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  
 $REp_{ri}$  Descarga de refrigerante (kg) por material r 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 para energía eléctrica de cada proveedor i ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ )  
 $EFEEf_j$  Factor de emisión para energía eléctrica de cada fábrica j ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ )  
 $EFEEc_k$  Factor de emisión para energía eléctrica de cada centro k ( $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ )  
 $EFFEp_i$  Factor de emisión para otras fuentes de energía en cada proveedor i ( $\text{kgCO}_2/\text{l}$ )  
 $EFFEf_j$  Factor de emisión para otras fuentes de energía en cada fábrica ( $\text{kgCO}_2/\text{l}$ )  
 $EFFEc_k$  Factor de emisión para otras fuentes de energía en cada centro de distribución k ( $\text{kgCO}_2/\text{l}$ )  
 $\omega_j$  Emisión fija de cada fábrica j ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ )  
 $\sigma_k$  Emisión fija de cada centro de distribución k ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ )  
 $d_{ij}$  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)  
 $\rho_{ij}$  Costo por tonelada-kilómetro del proveedor i a la fábrica j  
 $\tau_{jk}$  Costo por tonelada-kilómetro de fábrica j a centro de distribución k  
 $\phi_{kl}$  Costo por tonelada-kilómetro de centro de distribución k a detallista l

$T_{fp_{ij}}$  Factor de emisión de transporte en  $\text{kgCO}_2\text{e/t-km}$  de proveedor  $i$  a fábrica  $j$

$T_{ff_{jk}}$  Factor de emisión de transporte en  $\text{kgCO}_2\text{e/t-km}$  de fábrica  $j$  a centro de distribución  $k$

$T_{fc_{kl}}$  Factor de emisión de transporte en  $\text{kgCO}_2\text{e/t-km}$  de centro distribución  $k$  a detallistas  $l$

Los elementos de la función del costo de la configuración de la cadena de suministros provienen de dos fuentes, una correspondiente a los costos operativos y otra a los costos debidos a los traslados. Los operativos ocurren a lo interno de cada nodo o actor de la cadena, en tanto que los costos de los traslados son los correspondientes al transporte del producto entre los nodos de la cadena. Los costos operativos de las fábricas y de los centros de distribución tienen un componente fijo y otro variable. Los costos fijos de operar las instalaciones se agregaron en las fábricas y centros de distribución para que el modelo pueda utilizarlos para determinar la cantidad y localización de ellos. Para los proveedores dado que se contempló el flujo a adquirir de un conjunto definido, solo se contemplaron los costos variables al ser seleccionados sin agregar un componente de costo fijo. Esto mismo ocurrió con los costos de los traslados que solo se contabilizaron como costos variables. La función de costo económico de la configuración se compone de los siguientes sumandos:

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).

La formulación completa de la función del costo de la configuración de la cadena de suministros se muestra a continuación (los números entre paréntesis se refieren a los componentes del costo que aparecen en la expresión anterior).

Minimizar costo =

$$\sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ri} x_{rij} (1) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \beta_j x_{jk} (2) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \delta_k x_{kl} (3)$$

$$+ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \rho_{ij} x_{ij} d_{ij} (4) + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z \tau_{jk} x_{jk} d_{jk} (5) + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w \varphi_{kl} x_{kl} d_{kl} (6)$$

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j Uf_j (7) + \sum_{k=1}^z v_k Uc_k (8)$$

Los componentes de la función de las emisiones de carbono en la configuración de la cadena de suministros provienen de dos fuentes. Una, de los procesos productivos de los proveedores, fábricas y centros de distribución y la otra, de las actividades logísticas de transporte entre ellos. La función de las emisiones de la configuración se compone de los siguientes sumandos:

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 formulación completa de la función de las emisiones de carbono equivalentes de la configuración de la cadena de suministros se muestra a continuación (los números entre paréntesis se refieren a los componentes de las emisiones):

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } E = & \left[ \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} EE p_i EFEE p_i + \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} FE p_i EFFE p_i \right] (1) \\
 & + \left[ \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} EE f_j EFEE f_j + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} FE f_j EFFE f_j \right] (2) \\
 & + \left[ \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} EE c_k EFEE c_k + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} FE c_k EFFE c_k \right] (3) \\
 & + \sum_{r=1}^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{rij} d_{ij} TF p_{ij} (4) \quad + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^z x_{jk} d_{jk} TF f_{jk} (5) \\
 & + \sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w d_{kl} x_{kl} TF c_{kl} (6) + \sum_{j=1}^m \omega_j U f_j (7) + \sum_{k=1}^z \sigma_k U c_k (8)
 \end{aligned}$$

Dado que hoy en día se valora el impacto ambiental en términos económicos, con base en los estudios de Abdallah *et al.* (2010), Nagurney y Floden (2013) y Tseng y Hung (2014), se propone una opción de optimización del modelo en la que se combinan, en una única unidad, los costos de configuración y las emisiones de carbono. Dicha combinación de ambos en una sola unidad requiere en primer lugar dar valor económico a las emisiones para lo que se hace el siguiente cálculo:

Costo de la emisión (\$/kgCO<sub>2e</sub>) \* Total de emisiones resultantes (kgCO<sub>2e</sub>)

La función de emisiones de carbono, cuyas unidades son emisiones totales de carbono equivalente, al pasarse mediante el cálculo anterior a un resultado

económico se puede unir con la función del objetivo económico. La finalidad es minimizar este costo combinado, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar Costo Total (CT)} = \text{Función del costo} + [\text{Costo de la emisión (\$/kgCO}_2\text{e)} * \text{Función de emisiones (E) (kgCO}_2\text{e)}]$$

Esta nueva función permite la evaluación de impuestos al carbono, costos sociales del carbono, o esquemas de compensación de emisiones de carbono, puesto que todos ellos tienen en común asignar un valor económico a la generación de emisiones.

Para emular las condiciones reales de una cadena de suministros, el modelo debe contener restricciones operativas. Las restricciones consideradas en el modelo son las siguientes:

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

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

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

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

$$\sum_{k=1}^z \sum_{l=1}^w x_{kl} \leq \theta c_k Uc_k \text{ (Ecuación 5)}$$

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

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

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

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

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

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

La Ecuación 1 contempla las restricciones referentes a la capacidad de los proveedores. Cada proveedor  $i$  debe suministrar material  $r$  a las fábricas sin exceder su límite.

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 empresas. El producto que envía cada fábrica  $j$  no puede exceder su límite, esto cuando se ha escogido operar la fábrica.

La Ecuación 4 concierne a los centros de distribución, restringiendo el balance entre la mercadería que ingresa y sale del 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, o sea, debe recibir la cantidad de producto que solicitó.

La Ecuación 7 se refiere a que cada empresa puede ser o no seleccionada como parte de la configuración, el valor  $Uf_j$  es uno cuando la fábrica se selecciona y cero 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 uno cuando se selecciona y cero cuando no se selecciona.

Las Ecuaciones 9, 10 y 11 contemplan satisfacer las restricciones de no negatividad para las variables de flujo a través de la cadena de suministros.

El modelo permite varias opciones de optimización. Los encargados de gestionar la cadena de suministros pueden escoger la opción o las opciones de interés de acuerdo con los objetivos que se persigan para su configuración. Por este motivo en el Apéndice 8 se presentan unos diagramas, cuyo fin es guiar al usuario en la aplicación del modelo.

## **4.2 Aplicación del modelo a la cadena de suministros de un producto**

Para demostrar el funcionamiento, alcances y utilización práctica del modelo matemático formulado en esta investigación, se estudia la cadena de suministros de un producto que pertenece al sector industrial alimentario de Costa Rica. La empresa en la que se centra el estudio se dedica a la fabricación y comercialización de miel dentro del país. Seguidamente se define el contexto del caso.

### **4.2.1 Definición de la cadena de suministros del caso de estudio**

La fabricación del producto involucra tres componentes principales, para cada uno de ellos existe más de un posible proveedor, redundando así en un total de nueve. Los clientes demandantes del producto en el país, o detallistas, son en total ocho. Ellos se encuentran ubicados en distintas provincias y regiones del país.

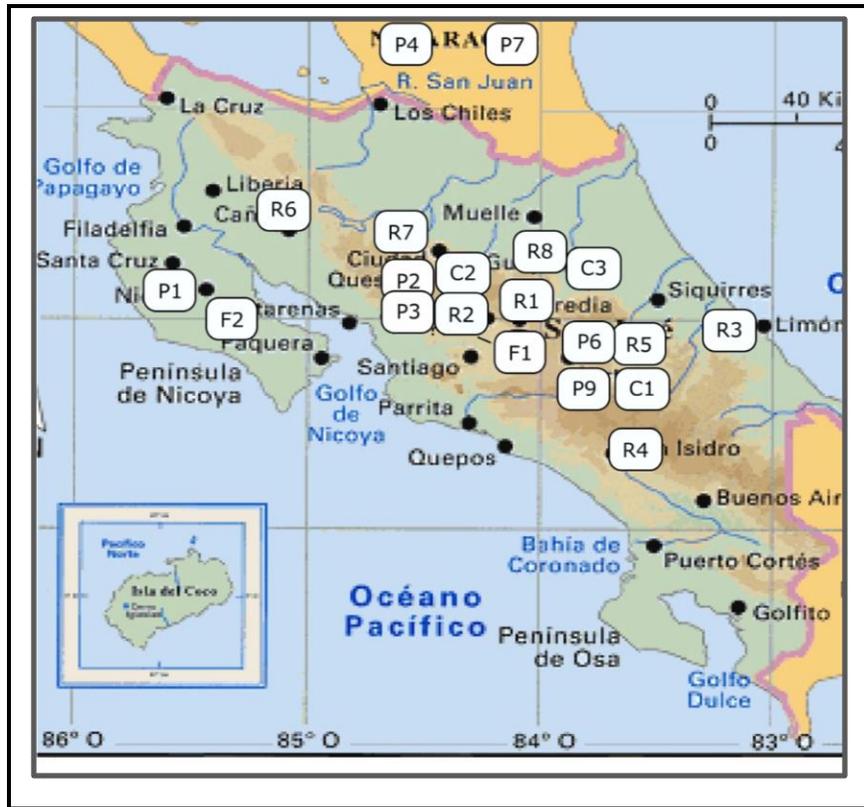
Además, se investiga la conveniencia de escoger dos instalaciones de fabricación: una en San José, que es donde actualmente opera, y otra propuesta en Puntarenas. Adicionalmente, se estudia la conveniencia de establecer alguno(s) de tres posibles centros de distribución o almacenes.

En el Cuadro 4.1 se enlista la ubicación de cada actor de la cadena de suministros del caso en estudio.

**Cuadro 4. 1. Actores de la cadena de suministros y sus ubicaciones.**

Actor	Ubicación	Simbología
Proveedor 1 de material 1	Puntarenas, Puntarenas	P1
Proveedor 1 de material 2	Alajuela, Río Segundo	P2
Proveedor 1 de material 3	Alajuela, Río Segundo	P3
Proveedor 2 de material 1	Nicaragua, Managua	P4
Proveedor 2 de material 2	Guatemala, Ciudad Guatemala	P5
Proveedor 2 de material 3	Cartago, El Guarco	P6
Proveedor 3 de material 1	Nicaragua, Managua	P7
Proveedor 3 de material 2	Guatemala, Ciudad de Guatemala	P8
Proveedor 3 de material 3	Cartago, El Guarco	P9
Fábrica 1	San José, Curridabat	F1
Fábrica 2	Puntarenas, Puntarenas	F2
Centro de distribución 1	Cartago, La Lima	C1
Centro de distribución 2	Alajuela, El Coyol	C2
Centro de distribución 3	Guápiles, Centro	C3
Detallista 1	San José, Sabana Este	R1
Detallista 2	Alajuela, Ciruelas	R2
Detallista 3	Limón, Centro	R3
Detallista 4	Pérez Zeledón	R4
Detallista 5	Cartago, Los Ángeles	R5
Detallista 6	Liberia	R6
Detallista 7	Alajuela, Ciudad Quesada	R7
Detallista 8	Guápiles, Centro	R8

Utilizando la simbología indicada en el Cuadro 4.1, la Figura 4.1 presenta la ubicación física aproximada del grupo mayoritario de los actores de la cadena de suministros que se ubican en Costa Rica y Nicaragua.



**Figura 4. 1.** Ubicación de los actores de la cadena de suministros en Costa Rica y Nicaragua.

#### **4.2.2 Valores de los parámetros de entrada de la cadena de suministros del caso de estudio**

En el Capítulo 3, Metodología, se indicó que el modelo matemático para la identificación y reducción de la huella de carbono de la cadena de suministros requiere de una serie de parámetros de entrada de cada actor y de las operaciones de distribución. Estos datos son conocidos del entorno de la cadena de suministros. Para el caso en estudio, por motivos de confidencialidad, no es posible presentar los valores de todos los parámetros, por lo que para algunos de ellos fue necesario recurrir a fuentes secundarias.

La estimación del consumo energético para la fabricación de cada una de las tres materias primas por cada proveedor se encuentra en el Apéndice 1. Para estimar la emisión de carbono por energía eléctrica de los proveedores ubicados en Costa Rica, se emplearon los factores de emisión de gases de efecto invernadero del IMN (2014). Se usaron los valores del año 2013 por ser el más próximo registrado. Tanto para los proveedores de Guatemala como para los de Nicaragua se utilizaron los factores de emisión para la energía de cada país (PNUMA, 2012).

A continuación, se presentan los valores de los parámetros de entrada que se utilizan en el caso en estudio. Se presentan primero los de cada actor de la cadena de suministros y más adelante los concernientes a las operaciones logísticas de la distribución entre ellos. En cada uno se explica el procedimiento seguido para su estimación. Los valores de los parámetros de los proveedores se muestran en el Cuadro 4.2. Los valores de los parámetros asociados al precio de venta y capacidades de suministro para el periodo se aproximaron, según Morales-Abarca (2008).

**Cuadro 4.2.** Valores de los parámetros de entrada para los proveedores.

Parámetro	Descripción	Valor asignado al parámetro
Cantidad de materiales	Número de materiales	Tres
Cantidad de Proveedores	Número de proveedores	Tres para cada tipo de material
Costo de adquisición de la materia prima	Precio de venta por tonelada de materia prima	\$2000/t Proveedor 1 material 1 \$3760/t Proveedor 1 material 2 \$2200/t Proveedor 1 material 3 \$1900/t Proveedor 2 material 1 \$3560/t Proveedor 2 material 2 \$2220/t Proveedor 2 material 3 \$1850/t Proveedor 3 material 1 \$3500/t Proveedor 3 material 2 \$2210/t Proveedor 3 material 3
Capacidad de cada proveedor	Toneladas de producto	900 t Proveedor 1 material 1 40000 t Proveedor 1 material 2 30000 t Proveedor 1 material 3 900 t Proveedor 2 material 1 40000 t Proveedor 2 material 2 30000 t Proveedor 2 material 3 900 t Proveedor 3 material 1 40000 t Proveedor 3 material 2 30000 t Proveedor 3 material 3
Consumo energético del proveedor	kWh por tonelada de producto	214 kWh/t Proveedor 1 material 1 (Costa Rica) 4800 kWh/t Proveedor 1 material 2 (Costa Rica) 630 kWh/t Proveedor 1 material 3 (Costa Rica) 214 kWh/t Proveedor 2 material 1 (Nicaragua) 4800 kWh/t Proveedor 2 material 2 (Guatemala) 630 kWh/t Proveedor 2 material 3 (Costa Rica) 214 kWh/t Proveedor 3 material 1 (Nicaragua) 4800 kWh/t Proveedor 3 material 2 (Guatemala) 630 kWh/t Proveedor 3 material 3 (Costa Rica)
Otras fuentes de energía del proveedor	Lista de fuentes y tipos de combustibles	120 litros diésel/t proveedor 1 material 2 (Costa Rica) 186 litros diésel/t proveedor 1 material 3 (Costa Rica) 120 litros diésel/t proveedor 2 material 2 (Guatemala) 186 litros diésel/t proveedor 2 material 3 (Costa Rica) 120 litros diésel/t proveedor 3 material 2 (Guatemala) 186 litros diésel/t proveedor 3 material 3 (Costa Rica)
Consumo de refrigerantes	Lista de tipos y consumo	Ningún proveedor utiliza refrigerantes

Los valores de los parámetros de las fábricas se presentan en el Cuadro 4.3.

**Cuadro 4. 3.** Valores de los parámetros de entrada de las fábricas.

Parámetro	Descripción	Valor asignado al parámetro
Capacidad de cada fábrica	Toneladas de capacidad por periodo	250 t Fábrica 1 250 t Fábrica 2
Costo de producción en la fábrica	Costo por tonelada de producto (costo variable y costo fijo)	\$500/t Fábrica 1 \$500/t Fábrica 2
Consumo energético de la fábrica	kWh por tonelada de producto	300 kWh/t Fábrica 1 300 kWh/t Fábrica 2
Fuentes de energía del proceso de la fábrica (no eléctrica)	Lista de fuentes, combustibles y consumos	No hay en Fábrica 1 No hay en Fábrica 2
Consumo de refrigerantes	Lista de tipos y consumo de refrigerantes	Ninguno
Demanda de los insumos para la producción	Toneladas de materia prima que se solicita a cada proveedor para el periodo	215 t de material 1 12.5 t de material 2 5.4 t de material 3

Para el caso se consideró que las dos instalaciones industriales, F1 y F2, eran iguales en todos sus parámetros (capacidades y tecnología de producción, consumo energético y costos de operación). Además, se consideró que ambas podrían elaborar desde nada hasta toda la producción de 250 toneladas. Para estimar el valor del parámetro de costo productivo de las fábricas del caso en estudio, se utilizó el análisis de Morales-Abarca (2008). Así, los costos de producción comprenden un 71% del costo total (solo la materia prima y mano de obra directa representan el 65%), en tanto que los costos de administración representan un 15% y los de las ventas un 14%. El proceso de fabricación es dependiente de la mano de obra, no está automatizado. Los costos fijos, son costos que no varían con el volumen de producción, se estiman en un 15%, en tanto que los costos variables se estiman en un 85%.

El consumo energético de las fábricas se determinó de acuerdo con la tecnología de producción que emplean para la manufactura. Esta tecnología no es automatizada. Los cálculos para estimar el consumo energético de las fábricas se encuentran en el Apéndice 2. Al ubicarse las fábricas del caso en estudio en Costa

Rica se aplicaron los factores de emisión de energía eléctrica del IMN (2014). Se utilizaron los del año 2013 ser éstos los registrados más recientemente.

La demanda de materiales para la producción, esto es la cantidad de insumos que adquiere cada proveedor, está asociada al uso que se le da al material en la elaboración del producto en la fábrica. Por ello, para su aproximación se recomienda realizar un plan de requerimiento de materiales, conocido como MRP. Así, para el caso en estudio, fue necesario estimar el uso de las materias primas por medio del establecimiento de un factor de consumo para cada una de ellas, de acuerdo con el proceso productivo que se realiza en las fábricas. Las estimaciones de estos factores de consumo de cada materia prima se detallan en el Apéndice 3.

Los valores de los parámetros de los centros de distribución se muestran en el Cuadro 4.4.

**Cuadro 4. 4.** *Valores de los parámetros de entrada para los centros de distribución.*

Parámetro	Descripción	Valor asignado al parámetro
Cantidad de centros de distribución	Cantidad (número entero) de centros de distribución	Tres centros de distribución
Capacidad del centro de distribución	Toneladas de capacidad de almacenaje en el centro de distribución	250 t centro distribución 1 250 t centro distribución 2 250 t centro distribución 3
Costo operativo del centro de distribución	Costo por tonelada de producto (fijo y variable)	\$200/t centro distribución 1 \$200/t centro distribución 2 \$200/t centro distribución 3
Consumo energético del centro de distribución	kWh por tonelada de producto	60 kWh centro distribución 1 60 kWh centro distribución 2 60 kWh centro distribución 3
Otras fuentes de energía en el centro de distribución	Lista de fuentes, combustibles y consumos	No hay ninguno en los centros de distribución
Consumo de refrigerantes	Lista de tipos y descargas	Ninguno

Los centros de distribución se consideraron iguales en sus capacidades de almacenamiento, costos de operación y consumos energéticos. Se analizó un tope de almacenamiento del total de lo demandado (en toneladas). La empresa no

cuenta actualmente con centros de distribución, por lo que el interés se enfoca en determinar si resultan convenientes o no, cuáles podrían serlo y en qué condiciones.

La estimación de los costos de almacenaje en el centro de distribución se muestra en el Apéndice 5. La estructura de costos que se consideró fue de un 25% de costo variable y un 75% de costo fijo. Lo anterior debido a que la mano de obra directa en el centro era escasa, así que se catalogó como un costo fijo, al igual que el espacio alquilado.

El consumo energético de los centros de distribución se determinó teniendo en cuenta la tecnología utilizada para el almacenamiento, la cual, para el caso, era principalmente manual. La estimación del consumo energético de los centros de distribución en detalle se encuentra en el Apéndice 4. Al ubicarse los centros de distribución propuestos en Costa Rica se emplearon los factores de emisión de energía eléctrica del IMN (2014). Se aplicaron los factores del 2013 por ser el año más reciente registrado.

Los valores de los parámetros de los detallistas se muestran en el Cuadro 4.5.

**Cuadro 4. 5.** *Valores de los parámetros de entrada para los detallistas.*

Parámetro	Descripción	Valor asignado al parámetro
Demanda de los Detallistas	Toneladas de producto	100 toneladas detallista 1
		40 toneladas detallista 2
		25 toneladas detallista 3
		20 toneladas detallista 4
		18 toneladas detallista 5
		15 toneladas detallista 6
		15 toneladas detallista 7
		17 toneladas detallista 8

Los detallistas o clientes en este caso tienen como único parámetro de entrada las demandas de producto. Para el caso en estudio hay ocho de ellos.

A continuación, se presentan los valores de los parámetros asociados a las operaciones de distribución de los insumos entre los actores de la cadena de suministros. El modelo matemático analiza el flujo de bienes, de materiales de proveedores a fábricas, de productos de fábricas a centros de distribución y de centros de distribución a detallistas en una unidad agregada que es el peso del producto. En primer lugar, se presentan los valores de los parámetros de la distribución desde los proveedores hasta las fábricas en el Cuadro 4.6.

**Cuadro 4. 6.** *Valores de los parámetros de entrada para distribución de proveedores a fábricas.*

Parámetro	Descripción	Valor designado al parámetro
Distancias de proveedores a fábricas	Distancias (km)	Ver en el cuadro 4.7.
Características de la flotilla para el traslado del proveedor a la fábrica	Tipo de vehículos Combustible Peso	Vehículos de más de 6 toneladas, con una capacidad de carga de 4 toneladas Operan con diésel
Costo de traslados del proveedor a fábrica	Costo (\$/t-km)	Ver en el cuadro 4.7.
Rendimiento del combustible para el recorrido de cada proveedor a cada fábrica	km/l	Ver en el cuadro 4.7. El rendimiento para la flotilla indicada varió entre 3 y 6km/l de acuerdo con el trayecto

Las distancias entre los actores (nodos) de la cadena de suministros, proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas son datos conocidos del caso en estudio. Las distancias entre ellos se derivan de sus ubicaciones. Para estimarlas se consideraron sus sedes y se aplicaron también los cálculos que para ellas reporta Google Maps y Google Earth.

Como se indicó en el Capítulo 3, Metodología, para determinar las emisiones de carbono emitidas por los vehículos, se requiere establecer factores de emisión. Para hacerlo se necesita evaluar las características de la flotilla que realiza el transporte. Estas son su peso, capacidad de carga, tipo y rendimiento del combustible (km/l).

Para el caso en estudio se definieron como se indica en el Cuadro 4.6. En el Apéndice 6 se muestra la estimación del consumo de combustible en el transporte requerido para todas las entregas entre las rutas de los actores de la cadena de suministros, proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas.

Los costos del transporte se estimaron mediante el rendimiento del combustible y las características de la flotilla, en el Apéndice 7 se detallan los cálculos. Las consideraciones presentadas en este apéndice se utilizan para todos los traslados de materiales y productos que se realizan entre las rutas de los actores de la cadena de suministros, proveedores, fábricas, centros de distribución y detallistas.

Las distancias, los costos de transporte y el rendimiento de combustible en la distribución de proveedores a fábricas se presentan en el Cuadro 4.7.

**Cuadro 4. 7. Valores de los parámetros distancias, rendimientos y costos para la distribución de insumos de proveedores a fábricas.**

Material	Proveedor	Distan. a Fábrica F1 (km)	Distan. a Fábrica F2 (km)	Rend. a Fábrica F1 (km/l)	Rend. a Fábrica F2 (km/l)	Costo a Fábrica F1 (\$/t-km)	Costo a Fábrica F2 (\$/t-km)	Factor de emisión a Fábrica F1 (kgCO <sub>2</sub> e /t-km)	Factor de emisión a Fábrica F2 (kgCO <sub>2</sub> e /t-km)
1	1	240	10	4	5	0.300	0.240	0.187	0.149
2	1	30	215	5	5	0.240	0.240	0.149	0.149
3	1	30	215	6	5	0.200	0.240	0.125	0.149
1	2	482	338	4	4	0.300	0.300	0.187	0.187
2	2	1408	1315	3	3	0.400	0.400	0.249	0.249
3	2	16	270	6	5	0.200	0.240	0.125	0.149
1	3	432	338	4	4	0.300	0.300	0.187	0.187
2	3	1408	1315	3	3	0.400	0.400	0.249	0.249
3	3	16	270	6	5	0.200	0.240	0.125	0.149

Los valores de los parámetros de distribución de los productos desde las fábricas hacia los centros de distribución propuestos se presentan en el Cuadro 4.8.

**Cuadro 4. 8.** *Valores de los parámetros de entrada para distribución de las fábricas hacia los centros de distribución.*

Parámetro	Descripción	Valor designado al parámetro
Distancias de las fábricas a los centros de distribución	Distancias (km)	Ver en el cuadro 4.9.
Características de la flotilla para el traslado de la fábrica al centro de distribución	Tipo de vehículos Combustible	Vehículos de más de 6 toneladas, con una capacidad de carga de 4 toneladas. Operan con diésel.
Costo de traslados de la fábrica al centro de distribución	Costo (\$/t-km)	Ver en el cuadro 4.9.
Rendimiento del combustible para el recorrido de cada fábrica a cada centro de distribución.	km/l	Ver en el cuadro 4.9. El rendimiento para la flotilla indicada varió entre 4 y 6 km/l de acuerdo con el trayecto.

Los valores de las distancias, costos de transporte y rendimiento de combustible para la distribución de fábricas a centros de distribución se muestran en el Cuadro 4.9.

**Cuadro 4. 9.** *Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución de las fábricas hacia los centros de distribución.*

Centro de Distribu.	Distancia a Fábrica F1 (km)	Distancia a Fábrica F2 (km)	Rend. F1 (km/l)	Rend. F2 (km/l)	Costo desde F1 (\$/t-km)	Costo desde F2 (\$/t-km)	Factor de emisión a F1 (kgCO <sub>2</sub> e/t-km)	Factor de emisión a F2 (kgCO <sub>2</sub> e/t-km)
1	17	265	6	4	0.200	0.300	0.125	0.187
2	31	220	5	4	0.240	0.300	0.149	0.187
3	70	280	5	5	0.240	0.240	0.149	0.149

Los valores de los parámetros de la logística de la distribución de bienes de los centros de distribución hacia los detallistas se presentan en el Cuadro 4.10.

**Cuadro 4. 10.** *Valores de los parámetros de entrada para distribución desde los centros de distribución hacia los detallistas.*

Parámetro	Descripción	Valor designado al parámetro
Distancias de los centros de distribución a clientes (detallistas)	Distancias (km)	Ver en el Cuadro 4.11.
Características de la flotilla para el traslado del centro de distribución al detallista	Tipo de vehículos Combustible	Vehículos pequeños de 5 toneladas, con una capacidad de carga de 2,5 toneladas que operan con diésel
Costo de traslados del CD al detallista	Costo (\$/t-km)	Ver en el Cuadro 4.11.
Rendimiento del combustible para el recorrido de cada centro de distribución a cada detallista (con la máxima carga permitida)	km/l	Ver en el Cuadro 4.11. El rendimiento para la flotilla indicada varió entre 5 y 7 km/l de acuerdo con el trayecto

La flotilla que realiza la entrega de los productos desde los centros de distribución hasta los detallistas consiste en camiones de menor peso y capacidad que los que realizan dicho reparto desde las fábricas hasta ellos. Los valores de las distancias, costos de transporte y rendimiento de combustible, concerniente al despacho del producto desde los centros de distribución (que se contempla operar) hacia los detallistas, se presentan en el Cuadro 4.11.

**Cuadro 4. 11.** Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución desde los centros de distribución hacia los detallistas.

		Distancias desde cada centro de distribución hacia cada detallista (km)							
Centro de distribuc.		1	2	3	4	5	6	7	8
1		25	46	144	117	5	290	141	87
2		23	7	184	167	49	192	97	90
3		69	90	95	270	146	276	115	6
		Rendimiento desde cada centro de distribución hacia cada detallista (km/l)							
Centro de distribuc.		1	2	3	4	5	6	7	8
1		6	5	5	6	7	5	5	5
2		6	7	5	5	5	5	5	5
3		6	6	5	5	5	5	5	6
		Costo del transporte desde cada centro de distribución hacia cada detallista (\$/t-km)							
Centro de distribuc.		1	2	3	4	5	6	7	8
1		0.320	0.384	0.384	0.320	0.274	0.384	0.384	0.384
2		0.320	0.274	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384
3		0.320	0.320	0.384	0.384	0.384	0.384	0.384	0.320
		Factor de emisión de carbono para el transporte desde cada centro de distribución hacia cada detallista (kgCO <sub>2</sub> e/t-km)							
Centro de distribuc.		1	2	3	4	5	6	7	8
1		0.149	0.179	0.179	0.149	0.128	0.179	0.179	0.179
2		0.149	0.128	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179
3		0.149	0.149	0.179	0.179	0.179	0.179	0.179	0.149

Los parámetros de la logística de la distribución de los productos directamente desde las fábricas hacia los detallistas, como parte de los parámetros de entrada del modelo matemático, se presentan en el Cuadro 4.12:

**Cuadro 4. 12.** Valores de los parámetros de entrada para distribución de fábricas hacia los detallistas.

Parámetro	Descripción	Valor designado al parámetro
Distancias de las fábricas a clientes (detallistas)	Distancias (km)	Ver en el Cuadro 4.13.
Características de la flotilla para el traslado de la fábrica al detallista	Tipo de vehículos Combustible	Vehículos de 6 toneladas, con una capacidad de carga de 4 toneladas que operan con diésel
Costo de traslados de fábrica al detallista	Costo (\$/t-km)	Ver en el Cuadro 4.13.
Rendimiento del combustible para el recorrido de cada fábrica a cada detallista	km/l	Ver en el Cuadro 4.13. El rendimiento para la flotilla indicada varió entre 3 y 5 km/l de acuerdo con el trayecto

Esta distribución de los productos se hace directamente desde las instalaciones de las fábricas a los detallistas. Las distancias, los costos del transporte y el rendimiento de combustible de la flotilla que se encarga de realizar la distribución de los productos desde las fábricas hacia los detallistas o clientes de la cadena de suministros se presentan en el Cuadro 4.13.

**Cuadro 4. 13.** Valores de los parámetros distancia, rendimientos y costos para la distribución desde las fábricas hacia los detallistas.

Distancias desde cada fábrica hacia cada detallista (km)								
Fábrica	1	2	3	4	5	6	7	8
F1	9	31	167	132	20	220	210	70
F2	242	220	385	387	270	155	272	315
Rendimiento desde cada fábrica hacia cada detallista (km/l)								
Fábrica	1	2	3	4	5	6	7	8
F1	5	4	4	4	5	4	4	5
F2	4	4	3	4	4	4	4	4
Costo del transporte desde cada fábrica hacia cada detallista (\$/t-km)								
Fábrica	1	2	3	4	5	6	7	8
F1	0.240	0.300	0.300	0.300	0.240	0.300	0.300	0.240
F2	0.300	0.300	0.400	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
Factor de emisión de carbono del transporte desde fábricas hacia detallistas (kgCO <sub>2</sub> e/t-km)								
Fábrica	1	2	3	4	5	6	7	8
F1	0.149	0.187	0.187	0.187	0.149	0.187	0.187	0.149
F2	0.187	0.187	0.249	0.187	0.187	0.187	0.187	0.187

#### 4.3. Solución: obtención de la configuración óptima de la cadena de suministros

Seguidamente, se presentan los resultados de cada una de las opciones de optimización de configuración de la cadena de suministros que se desarrollaron en el modelo matemático. Para obtener la configuración óptima de la cadena de suministros, se procedió a solucionar el modelo matemático como se indicó en la Metodología, utilizando el software Analytic Solver ® de Frontline Systems ®.

Los resultados están asociados a los valores de los parámetros de entrada que anteriormente se detallaron. Adicionalmente, las restricciones y consideraciones contenidas en el modelo rigen sobre dichas cifras.

#### 4.3.1 Configuración de la cadena de suministros para la optimización de los costos

En esta sección se resuelve el modelo optimizando únicamente los costos. La función objetivo es la función de los costos y se busca su minimización. Esta opción de optimización está centrada en un objetivo económico al solo contemplar los costos. Los resultados de la optimización de los costos en el caso de estudio se muestran en el Cuadro 4.14.

El modelo logró determinar una configuración y patrón de flujo para la cadena de suministros que minimiza los costos de operación. Además, determinó las emisiones de carbono asociadas a la configuración encontrada.

**Cuadro 4. 14.** Solución para la optimización de los costos de la cadena de suministros.

Función objetivo	Total costos (\$)	Total emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Fábricas y producción asignada	Centros de distribución escogidos
Minimizar el costo total (\$)	730998	88477	Fábrica 1 (para la producción total de 250 toneladas)	Ninguno
Configuración y patrón de flujo:				
El proveedor 3 suministra el material 1 mientras que el proveedor 1 suministra los materiales 2 y 3. La fábrica 1 produce y envía desde sus instalaciones (como almacén) a todos los clientes				

La solución obtenida define cuáles fábricas operar y también cuánto deben producir. Igualmente, para los centros de distribución se determinó cuántos y cuáles operar. Más aún, se estableció cuánto producto almacenan en el periodo estudiado. Lo anterior permite definir su capacidad y costos operativos (esto siempre y cuando se hayan definido capacidades mayores a la demanda para los centros de distribución, como se hizo en este caso de estudio, pues de lo contrario serían más bien limitantes).

El indicador de emisión de carbono de la producción en el periodo analizado para la optimización de los costos es:

$$88477 \text{ kgCO}_2\text{e} / 250 \text{ toneladas} = 354 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{tonelada de producto.}$$

#### **4.3.2 Configuración de la cadena de suministros para la optimización de las emisiones de carbono**

En este apartado, se resuelve el modelo optimizando únicamente las emisiones de carbono. Para esto se aplica la función centrada en un objetivo ambiental, a saber, las emisiones de carbono, y se busca minimizarlas.

Al solucionar el modelo matemático para la función se obtiene una configuración óptima y un patrón de flujo que lleva a la mínima cantidad de emisiones totales alcanzable. También se presentan cuáles fábricas operar y cuántos y cuáles centros de distribución fueron escogidos como parte de la configuración óptima. El modelo además determinó los costos asociados, a pesar de que solamente se optimizaron las emisiones. Los resultados se presentan en el Cuadro 4.15.

**Cuadro 4. 15.** Solución para la optimización de las emisiones de carbono de la cadena de suministros.

Función objetivo	Total costo (\$)	Total emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Fábricas y producción asignada	Centros de distribución escogidos
Minimización de las emisiones totales (kgCO <sub>2</sub> e)	827391	46855	F1 para producir 138 toneladas y F2 para producir 112 toneladas	Uno, el CD3
Configuración y patrón de flujo:				
Ambas fábricas escogen al proveedor 1 para suministrar los materiales 1 y 2. Para el material 3, la fábrica F2 escoge al proveedor 1, pero la F1 escoge al proveedor 2. La fábrica F1 envía directamente a los clientes 1, 4 y 5. La fábrica F2 envía de forma directa a los clientes 2, 6 y 7, además, envía al centro de distribución 3, de donde distribuye a los clientes 3 y 8.				

El indicador de emisión de carbono para la producción del periodo analizado para la optimización de las emisiones de carbono (minimización de la huella de carbono) es:

$$46855 \text{ kgCO}_2\text{e} / 250 \text{ toneladas} = 187 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{tonelada de producto.}$$

Este indicador puede convertirse al nivel de cajas de producto o a la presentación individual.

Los resultados muestran que el indicador de huella de carbono en la producción del periodo analizado, al optimizar las emisiones en la cadena de suministros, es menor al que se obtuvo cuando se optimizó el costo. Para los datos utilizados en este caso, es un 47% menor.

### 4.3.3 Comparación de la optimización de los costos contra la optimización de las emisiones de la cadena de suministros

Los resultados indican que la configuración óptima de la cadena de suministros, cuando se optimizan sus costos, objetivo económico, puede ser distinta a la que se obtiene al optimizar las emisiones totales, objetivo ambiental. En el caso en estudio, se encontraron diferencias entre ambas opciones con el modelo matemático, como se muestra en el Cuadro 4.16.

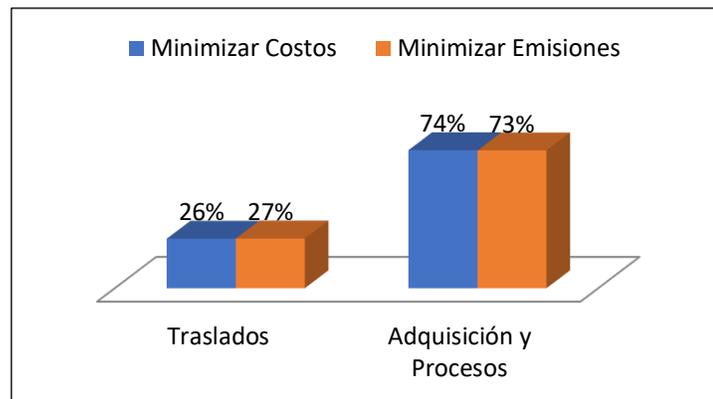
**Cuadro 4. 16.** Comparación de la optimización de las emisiones de carbono y de los costos de la cadena de suministros.

Función objetivo	Costos (\$)	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)
Diferencias entre los objetivos económico y ambiental (objetivos 1 y 2)	96393	41622

Al optimizar los costos de la configuración de la cadena de suministros se logra llegar a una diferencia de \$96393, esto es un 11% menor al que resultó después de optimizar las emisiones de carbono. Para ello, la instalación manufacturera a operar debe ser solo la una (F1). Sin embargo, bajo estas condiciones, las emisiones de carbono por el contrario se incrementan en un 83%.

Luego de optimizar las emisiones, la configuración de la cadena le asigna a la fábrica F1 un 55% de la producción y a la F2 el restante 45%. Además, esta configuración incluye las labores de un centro de distribución en Guápiles para minimizar las emisiones de carbono. Ese centro repartiría a los clientes de esa zona y de Limón. También se estableció su capacidad de almacenamiento.

El modelo matemático puede presentar para cada opción de optimización el desglose, tanto de costos como de emisiones de carbono de cada actor de la cadena, proveedores, fábricas y centros de distribución, así como de la logística entre ellos. La siguiente Figura 4.2 muestra el desglose de las emisiones de carbono para los traslados (transportes) y para las operaciones, tanto para la opción de optimización de los costos como para las emisiones de carbono (cada una por separado). Nótese que en ambos casos las emisiones de carbono generadas por los procesos productivos de la cadena de suministros de este producto alimenticio son aproximadamente tres veces más que las que se originan por las actividades de logística (transportes).

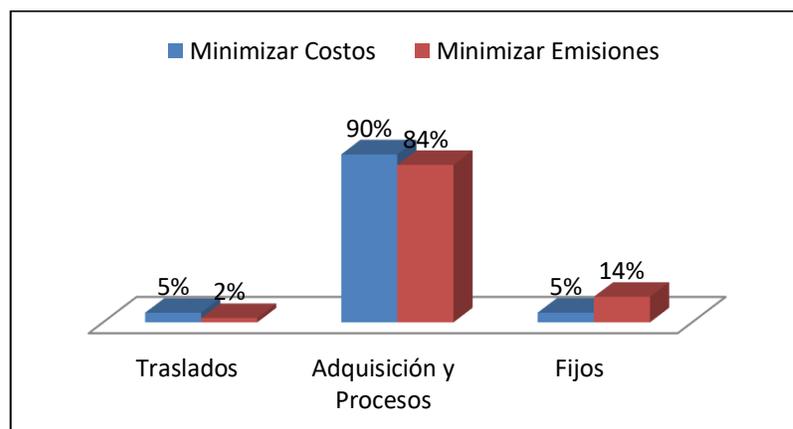


**Figura 4. 2.** Comparación entre las emisiones de carbono, de los procesos productivos y de los traslados, al optimizar los costos y las emisiones de carbono.

Con respecto a las emisiones de carbono, al optimizar los costos, el 73% de dichas emisiones se generaron en los procesos productivos, mientras que el 27% restante en los traslados. En cambio, al optimizar las emisiones de carbono, la contribución de los procesos operativos aumentó a 74% y la de los traslados bajó a 26%.

Por otra parte, cuando se optimizaron las emisiones de carbono, los costos fijos aumentaron como se muestra en la Figura 4.3. Este incremento se relaciona con el

hecho de que la configuración, al optimizar las emisiones, está compuesta por más instalaciones (más fábricas y centros de distribución), aspecto que eleva los costos fijos.



**Figura 4. 3.** Comparación entre los costos, de los procesos productivos y de los traslados, al optimizar los costos y las emisiones de carbono.

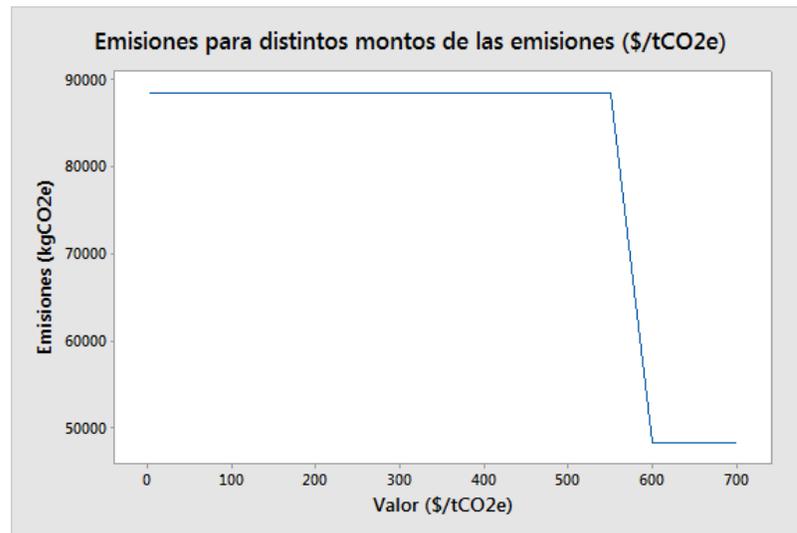
El modelo matemático permite establecer la razón del costo por cada kilogramo de emisión que la empresa debería asumir para pasar de las emisiones del objetivo económico a las obtenidas al minimizar la huella de carbono. Este indicador se calcula como la razón que resulta de tomar la diferencia entre el costo que se obtuvo, tanto para el objetivo económico como para el ambiental, dividiéndola entre la diferencia de emisiones de carbono correspondientes a cada objetivo:

$$\frac{\text{(Diferencia absoluta entre los costos de los objetivos económico y ambiental)}}{\text{(Diferencia absoluta entre las emisiones de los objetivos económico y ambiental)}}$$

El indicador del costo por kilogramo de emisión que la empresa debería asumir para pasar de los objetivos económicos a los objetivos ambientales resulta ser de \$2,32/kgCO<sub>2e</sub>, o bien, \$2320 /tCO<sub>2e</sub>.

#### 4.3.4 Configuración de la cadena de suministros para la optimización de los costos totales combinando los costos de las emisiones de carbono con los costos operativos

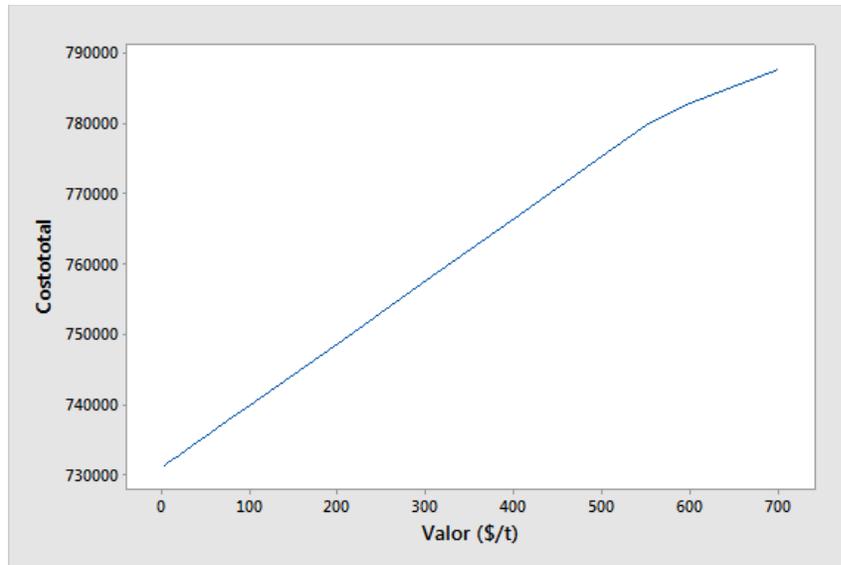
En esta sección, se resuelve el modelo optimizando el costo total (incluyendo el de las emisiones de carbono). Para ello, la función objetivo combina el costo de la configuración con el de las emisiones de carbono al asignarles un valor económico. El objetivo es minimizar el costo total. Soto (2013) menciona la apertura del mercado de carbono en Costa Rica con las unidades costarricenses de carbono (UCC) con valores de \$3 por unidad costarricense de carbono (UCC,) que equivale a una tonelada de dióxido de carbono. La Figura 4.4 muestra el comportamiento del volumen de emisiones de carbono para montos por tonelada de dióxido de carbono emitida en el rango desde los 3 hasta los \$700/tCO<sub>2</sub>e.



**Figura 4. 4.** Emisiones totales para distintos valores de costo de las emisiones de carbono.

La Figura 4.4 muestra que, a mayor valor económico de las emisiones, menores son las emisiones totales de la configuración.

La Figura 4.5. muestra el comportamiento del costo total de la configuración para los distintos valores de las emisiones. En esta, se observa que, a mayor precio de las emisiones, mayor es el costo total de la configuración de la cadena de suministros. Esta tendencia, obtenida por el modelo, coincide con la encontrada por Tseng y Hung (2014).



**Figura 4. 5.** Costo total para distintos valores de costo de las emisiones de carbono.

Hasta el valor de \$565/tCO<sub>2</sub>e de las emisiones de carbono, la configuración óptima que se encontró en esta opción de optimización fue la misma que se encontró al optimizar el objetivo económico (minimización de la función de los costos). Para valores de las emisiones iguales o superiores a \$566/tCO<sub>2</sub>e la configuración óptima cambió por una más semejante a la obtenida al optimizar el objetivo ambiental. En dicha configuración se alcanza una reducción de un 45% en las emisiones de la cadena de suministros operando solo una fábrica (F2).

#### **4.3.5. Configuración de la cadena de suministros para la optimización del costo al limitar las emisiones de carbono**

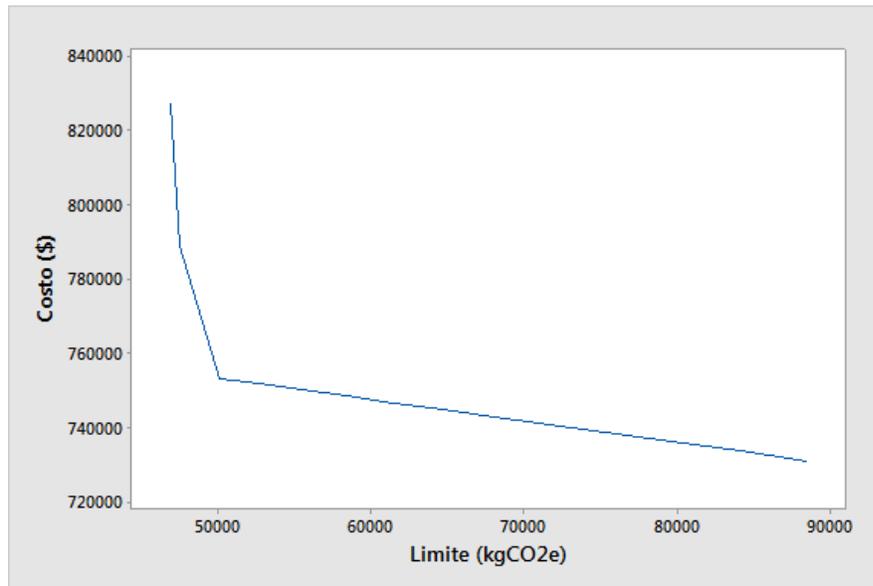
En esta sección, se resuelve el modelo optimizando los costos de la configuración de la cadena de suministros, pero asignándole límite a la cantidad de emisiones que pueda generar. Esta opción del modelo permite valorar la influencia que tendría restringir las emisiones de carbono con el propósito de determinar la configuración de la cadena de suministros que no sobrepase un determinado tope máximo de emisiones. Para ello, se debe introducir en el modelo una condición límite correspondiente a la cantidad máxima de emisiones que se permita liberar a la cadena de suministros, tal y como se establece en la siguiente restricción:

Emisiones de carbono  $E$  ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ ) = emisiones operativas de los proveedores + emisiones operativas de las fábricas + emisiones operativas de los centros de distribución + emisiones por traslado de proveedores a fábricas + emisiones por traslado de fábricas a centros de distribución + emisiones por traslado de centros de distribución a detallistas + emisiones fijas de las fábricas seleccionadas + emisiones fijas de los centros de distribución seleccionados  $\leq$  Límite sobre las emisiones ( $\text{kgCO}_2\text{e}$ ).

Con esta restricción sobre el límite de emisiones, se realizaron experimentos optimizando la función del objetivo económico. Se probaron valores para este límite, partiendo del monto de emisiones encontradas al resolver el objetivo económico y aplicando reducciones de un 5% hasta llegar al valor de emisiones de la solución ambiental. Como era de esperarse, para topes inferiores a la solución ambiental, 46855  $\text{kgCO}_2\text{e}$ , no se encontró salida posible.

La Figura 4.6 muestra el comportamiento de los costos de la configuración con respecto a los valores utilizados como límite para las emisiones de carbono equivalente totales de la cadena de suministros. Los resultados indican que

conforme se reduce el valor del límite permitido para las emisiones de carbono, los costos de operación aumentan. Este incremento en el costo al restringir las emisiones coincide con lo encontrado por Diabat y Simchi-Levi (2010).



**Figura 4. 6.** Costo total para distintos valores límite de las emisiones de carbono.

El Cuadro 4.17 resume los resultados obtenidos con distintos límites de emisiones de carbono para la cadena de suministros. En el cuadro se muestra la configuración encontrada para cada tope de emisión, con sus flujos, costos y emisiones de carbono. En el cuadro se incluye la materia prima principal, que se denotó como material 1, con el fin demostrar el efecto que causa limitar la emisión de carbono en la adquisición de materias primas. Nótese que, para valores altos del límite de emisión de carbono, el material 1 se adquirió del proveedor 3, pero conforme se fue restringiendo, se adquirió una parte también del proveedor 1. Para límites de emisión de carbono más estrictos la adquisición completa se otorgó al proveedor 1. El proveedor 3 ofertaba un costo menor, en un 10%, al costo del proveedor 1, pero se ubicaba más distante de las fábricas.

**Cuadro 4. 17.** Solución para la optimización de los costos de cadena de suministros con distintos límites de emisiones de carbono.

Límite máximo (kgCO <sub>2</sub> e)	Costos (\$)	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Configuración (instalaciones de fabricación y su producción)	Adquisición del material 1 (proveedor y cantidad)
88477	730998	88477	F1 (250 t)	Proveedor 3 (250t)
84053	733554	84053	F1 (250 t)	Proveedor 1 (27 t) y Proveedor 3 (223t)
79629	736109	79629	F1 (250 t)	Proveedor 1 (55.3t) y Proveedor 3 (194.7t)
71666	740709	71666	F1 (250 t)	Proveedor 1 (105.1) y Proveedor 3 (144.9t)
68083	742778	68083	F1 (250 t)	Proveedor 1 (127.5) y Proveedor 3 (122.5t)
64679	744745	64679	F1 (250 t)	Proveedor 1 (148.75) y Proveedor 3 (101.25t)
61445	746613	61445	F1 (250 t)	Proveedor 1 (169) y Proveedor 3 (81t)
58373	748388	58373	F1 (250 t)	Proveedor 1 (188.17) y Proveedor 3 (61.83t)
55454	750074	55454	F1 (250 t)	Proveedor 1 (206.4) y Proveedor 3 (43.6t)
52681	751675	52681	F1 (250 t)	Proveedor 1 (223.74) y Proveedor 3 (26.26t)
50047	753197	50047	F1 (250 t)	Proveedor 1 (240.2) y Proveedor 3 (9.8t)
47545	789033	47545	F1 (120t) F2 (70t)	Proveedor 1 (250t)
46900	827095	46900	F1 (159t) F2 (91t)	Proveedor 1 (250t)
46855	Estas son las emisiones mínimas (igual a la optimización de las emisiones) Para emisiones menores a este límite, no existe solución (configuración)			

#### 4.3.6 Configuración de la cadena de suministros para la optimización por metas de los costos y de las emisiones de la cadena de suministros

En este apartado, se presenta la opción de optimización del modelo matemático con la que se intenta alcanzar valores meta, tanto de los costos como de las emisiones de carbono de la configuración de la cadena de suministros. Así las dos funciones tendrán un valor específico como el objetivo que se pretende conseguir. Como

puede ser posible que no se logre alguna o ninguna, se buscará alcanzar la menor desviación posible respecto a los valores propuestos como meta. Dado que la programación lineal no permite determinar soluciones subóptimas para los objetivos fijados, se utilizó la programación por metas (*goal programming*).

En la programación por metas se pueden considerar varias y estas pueden o no tener jerarquía, es decir, pueden existir metas cuya consecución es prioritaria o bien se puede dar el caso de que todas tengan igual preferencia. En esta opción del modelo se definió de igual importancia lograr el objetivo económico como el ambiental. Es decir, se estableció tan importante cumplir con la meta de costo como con la de emisiones de carbono. Por ello, se aplicó el caso de programación por metas llamado sin prioridad (*non preemptive goal programming*). Cabe resaltar que la programación por metas, en el caso de que sea imposible alcanzarlas simultáneamente, es capaz de establecer una solución subóptima, esto es, una solución lo más cercana posible al cumplimiento de las metas. En esta opción esto sería determinar una configuración de la cadena de suministros que conlleve un costo y unas emisiones de carbono que estén lo más cerca posible de los definidos como meta.

Los administradores de la cadena de suministros pueden establecer a partir de su experiencia los valores meta, tanto de los costos como de las emisiones de carbono para la cadena de suministros. Sin embargo, se sugiere emplear como referencia el resultado de la optimización de las emisiones al definir el valor meta de las emisiones de carbono. Igualmente, para fijar el valor meta de los costos se sugiere usar como referencia el resultado de la optimización de los costos.

El costo de la configuración de la cadena de suministros es el total establecido en la función de los precios (la del objetivo económico):

$$\text{Costo} + s_1^- - s_1^+$$

Donde

$s_1^+$  = la cantidad en la que se excede la meta del costo

$s_1^-$  = la cantidad en la que se está por debajo de la meta del costo

Este costo, el cual antes fue una función objetivo, se utiliza ahora como una restricción, por lo que debe cumplir con el valor meta que se defina para él, por lo tanto, se debe satisfacer que:

$$\text{Costo} + s_1^- - s_1^+ = \text{costo meta (cercano al obtenido al optimizar los costos)}$$

Las emisiones de carbono de la configuración son las emisiones totales establecidas en la función ambiental (objetivo ambiental)

$$\text{Emisiones} + s_2^- - s_2^+$$

Donde

$s_2^+$  = la cantidad en la que se excede la meta de emisiones de carbono

$s_2^-$  = la cantidad en la que se está por debajo de la meta de emisiones de carbono

Estas emisiones, que antes fueron una función objetivo, ahora son una restricción que debe cumplir la meta establecida para ellas, por lo cual, se debe garantizar:

$$\text{Emisiones} + s_2^- - s_2^+ = \text{emisiones meta (cercanas a las obtenidas al optimizarlas)}$$

Así la opción del modelo de optimización de la configuración de la cadena de suministros con una meta de costos y otra de las emisiones de carbono, al fijar como de igual orden de importancia o prioridad a la consecución de ambas metas, se formula añadiendo al modelo matemático las restricciones antes descritas y aplicando como objetivo la función que se describe seguidamente.

Función objetivo (sin prioridad)

Función objetivo =  $s_1^+ + s_2^+$

Sujeto a

Restricción del costo total:

Costo total -  $s_1^+$  = costo meta (cerca al obtenido al optimizar los costos)

Restricción de las emisiones totales:

Emisión total -  $s_2^+$  = emisiones meta (cerca a las obtenidas al optimizar las emisiones)

También es posible definir una penalización por el incumplimiento de las metas fijadas, esto es por diferencias con respecto a las que querían lograrse. La pena puede ser tanto por excederse como por no alcanzarlas. Evidentemente, las que sean multadas con más rigurosidad tenderán a cumplirse en mayor grado que aquellas que reciban una menor sanción.

Para fijar los montos sancionatorios en el caso ambiental, se puede considerar que producir más emisiones de las que se definan como meta máxima, puede implicar tener que compensarlas (si se pretende lograr la carbono neutralidad) o bien pagar un impuesto si existiera una legislación. En el plano económico, si el costo final es mayor al estipulado como meta, puede implicar menores utilidades o incluso la pérdida de ventas y/o de clientes por el incremento en el precio final.

La opción del modelo de optimización de la configuración de la cadena de suministros con una meta de costos y otra de las emisiones de carbono, al establecer penalizaciones al incumplimiento de ambas metas, esto es, al obtener valores distintos a los fijados, se formula añadiendo al modelo matemático la función que se describe a continuación.

Función objetivo (sin prioridad)

Función objetivo = pena (\$/costo) \*  $s_1^+$  + pena (\$/tCO<sub>2</sub>e) \*  $s_2^+$

Sujeto a

Restricción del costo total

Costo total -  $s_1^+$  = costo meta (cercano al obtenido al optimizar los costos)

Restricción de las emisiones totales

Emisión total -  $s_2^+$  = emisiones meta (cercanas a las obtenidas al optimizar las emisiones)

Con esta fórmula se ejecutó la optimización simultánea de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros en el caso de estudio. En primer lugar, se experimentó la optimización simultánea sin multa, utilizando como meta los valores mínimos antes encontrados al optimizar las emisiones de carbono y los costos de la configuración de la cadena de suministros. Los resultados se presentan en el primer renglón del Cuadro 4.18. Nótese que no fue posible lograr las dos metas simultáneamente, aunque sí lo fue obtener una configuración de la cadena de suministros que representara un acuerdo favorable para ambos.

Posteriormente, se experimentó aplicando penas a los desvíos en ambas metas. Las emisiones de carbono se sancionaron con montos de 0, 10, 300 y 700 \$/tCO<sub>2</sub>e para la cantidad que sobrepasara el valor meta fijado en 47323 kgCO<sub>2</sub>e (los valores que se emplearon como meta tanto para costos como para emisiones de carbono fueron un 1% mayores a los mínimos encontrados al optimizar cada uno por separado). Los desvíos en los costos también se penalizaron. Se probó una sanción en los costos para cada monto de las emisiones antes indicada. Para la primera cifra multada de emisiones (\$10/tCO<sub>2</sub>e), se experimentó aplicando sanciones de \$0, 0.01, 0.005 y 0.015 por cada unidad que sobrepasara el valor meta de costos fijado de 738308. Para la segunda, se impusieron penas de \$0.15, 0.30 y 0.45, y para la tercera de \$0.35, 0.70, 1.05 y 1.4.

**Cuadro 4. 18.** Análisis de sensibilidad de la optimización de metas ambiental y económica para la cadena de suministros.

Meta para emisión kgCO <sub>2</sub> e	Pena excedente emisiones (\$/tCO <sub>2</sub> e)	s <sub>2</sub> <sup>+</sup> (desvío en emisión)	Emisiones totales (kgCO <sub>2</sub> e)	Meta los costos (\$)	Pena al sobrepasar los costos (\$/exceso)	s <sub>1</sub> <sup>+</sup> (desvío en costo)	Costo total (\$)
46855	0	1406.6	48262	730998	0	22752.8	753750.8
47323	0	938.5	48262	738308	0	15442.8	753750.8
47323	10	938.5	48262	738308	0.005	15442.8	753750.8
47323	10	938.5	48262	738308	0.01	15442.8	753750.8
47323	10	938.5	48262	738308	0.015	15442.8	753750.8
47323	300	938.5	48262	738308	0.15	15442.8	753750.8
47323	300	938.5	48262	738308	0.30	15442.8	753750.8
47323	300	938.5	48262	738308	0.45	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	0.07	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	0.175	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	0.175	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	0.35	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	0.70	15442.8	753750.8
47323	700	938.5	48262	738308	1.05	15442.8	753750.8
47323	700	28499.3	75822.3	738308	1.4	0	738308

La formulación completa del modelo, incluyendo la penalización para desvíos en las metas, es la siguiente:

$$\text{Función objetivo} = (\$/\text{penalización/costo}) * s_1^+ + (\$/\text{penalización/kgCO}_2\text{e}) * s_2^+$$

Sujeto a

Restricción del costo total

$$\text{Costo total} - s_1^+ = 738308$$

Restricción de las emisiones totales

$$\text{Emisión total} - s_2^+ = 47323$$

Como se muestra en el Cuadro 4.18, al elevar la penalización del desvío en el costo, se llega a un punto en el que el modelo opta por reducirlo a cero. En esta parte, las emisiones de carbono se elevan considerablemente como se muestra en el último renglón del cuadro.

Más allá, los resultados denotan que cuando se aplica la misma penalización al desvío de los costos con respecto a su meta que al desvío de las emisiones de carbono, la configuración que resulta presenta desvíos en ambas metas.

Hasta que la penalización en los desvíos del costo meta es del doble que la del desvío en las emisiones de carbono, se llega a una configuración cuyo desvío de la meta del costo es nulo. Otra interpretación es que cuando la multa en el desvío de la meta ambiental es 50% o menor que la del desvío la del económico, la configuración que resulta tiene emisiones considerables (más de 30 veces la meta buscada). Este incremento no se presenta cuando la penalización del objetivo ambiental es 50% o mayor que la del objetivo económico.

No fue posible lograr la optimización simultánea de los objetivos ambiental y económico. Al penalizar los desvíos con respecto a las metas de emisiones y de costos, se presentaron desviaciones en el cumplimiento de dichas metas (salvo en la meta económica cuando la pena aplicada fue muy alta). Sin embargo, estas desviaciones fueron relativamente bajas, para ambos objetivos se tuvo una desviación de aproximadamente un 2% por encima de las metas que se plantearon.

#### **4.3.7 Comparación de los resultados de las opciones de optimización del modelo**

Un resumen de los resultados obtenidos para la configuración de la cadena de suministros del caso de estudio con cada una de las opciones de optimización

analizadas con el modelo se presenta en el Cuadro 4.19. Este contiene para cada opción de optimización, las emisiones de carbono y costos resultantes para la cadena de suministros.

**Cuadro 4. 19.** Resultados para cada opción de optimización del modelo para la cadena de suministros.

Opción de optimización	Consideraciones	Emisiones (kgCO <sub>2e</sub> )	Costo (\$)	Razón respecto a la optimización económica	Indicador de emisiones de la producción del periodo (kgCO <sub>2e</sub> /t)
Optimizar costos	-	88477	730998	-	354
Optimizar Emisiones	-	46855	827391	\$2320/ tCO <sub>2</sub>	187
Optimizar función combinada	Costo de emisiones= \$566 / tCO <sub>2</sub>	48262	782708	\$1286/ tCO <sub>2</sub>	193
Optimizar costos bajo un límite de emisiones (kgCO <sub>2e</sub> )	Límite=46900	46900	827095	\$2311/tCO <sub>2</sub>	188
	Límite=47545	47545	789033	\$1418/tCO <sub>2</sub>	191
	Límite=48262	48262	753751	\$566/tCO <sub>2</sub>	193
	Límite=50047	50047	753197	\$578/tCO <sub>2</sub>	200
Optimizar dos metas (ambiental y económica)	Metas Emisión= 46855 Costo= 730998	48262	753751	\$566/tCO <sub>2</sub> (sin pena)	193
	Metas Emisión=47323 Costo=\$738308	48262	753751	\$566/tCO <sub>2</sub> (sin pena)	193
	Pena en emisiones 50% más que la de los costos	48262	753751	\$566/tCO <sub>2</sub> (con penas)	193

Solamente en la optimización individual de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros el resultado que se obtiene es único. Por ese motivo,

en las otras opciones se presentan solo algunos de los posibles resultados que se logran en cada una. Los mostrados se alcanzaron al aplicar las consideraciones específicas que se indican en la columna así denominada.

En las opciones de optimización de la función combinada, de la optimización con un límite de emisiones y de la programación por metas, se llega a un resultado similar. Sin embargo, nuevamente se destaca que este resultado es solo uno posible dentro de varios. En el caso de la función combinada, lo es para un rango de valor de las emisiones. En la optimización de los costos bajo un límite de emisión, lo es para un límite específico de emisiones de carbono. En la opción de optimización que usa la programación por metas ese resultado se obtuvo para un rango de valores de penalización de los desvíos tanto en emisiones como en montos económicos.

En la columna denominada razón respecto a la optimización económica, se muestra para cada opción de optimización la razón de la diferencia entre los costos y las emisiones con respecto a la optimización de los costos de la cadena de suministros. La más baja fue de \$566/tCO<sub>2</sub>, que se obtuvo con la opción de optimización por metas. A esa misma razón también se llegó cuando se optimizaron los costos, pero se limitaron las emisiones de carbono a \$48262/tCO<sub>2e</sub>. También se llegó a ella en la optimización de la función combinada de costos y emisiones cuando se les dio a estas últimas un valor de \$566/tCO<sub>2e</sub>.

La última columna del Cuadro 4.19 presenta el indicador de emisiones de la producción del periodo para cada opción de optimización, es decir, su huella de carbono. El más bajo es el que se obtuvo al optimizar las emisiones de carbono. Por el contrario, el más alto es el obtenido al optimizar solamente los costos. La optimización simultánea de los costos como objetivo económico y de las emisiones de carbono como objetivo ambiental no fue posible, sin embargo, la configuración obtenida tiene costos y emisiones bastante cercanos a los deseados, es decir, los desvíos con respecto a ambas metas son bajos. El indicador de las emisiones de la

producción es tan solo 3% mayor que el obtenido al optimizar solo las emisiones como objetivo ambiental.

#### **4.3.8 Configuración de la cadena de suministros al considerar fuentes alternativas de energía**

En esta parte, se aborda el impacto del consumo energético que resulta de la tecnología de producción que se maneja en las fábricas, así como el empleo de otras fuentes de energía. Los cambios tecnológicos, así como dichas fuentes alternativas que reduzcan el consumo energético, tanto en las instalaciones de fabricación como en proveedores o centros de distribución, se pueden incorporar al modelo. Cuando se modifique la tecnología por una que reduzca el consumo de energía, la incorporación al modelo implicaría un uso menor de este recurso (kWh para la cantidad de producción del periodo). Por otra parte, cuando la tecnología conlleve a un menor consumo de combustible como fuente energética en el proceso, se reflejará al contabilizarlo (litros de combustible para la cantidad de producción del periodo). También, es posible incorporar al modelo matemático propuesto el costo que tales cambios tecnológicos impliquen. La forma de contemplarlo es agregándolo a los parámetros de los costos operativos.

Se hicieron experimentos sobre el efecto que una mayor eficiencia energética en las fábricas tendría para la huella de carbono en la cadena de suministros. La mayor eficiencia energética se supuso a partir de una fuente alterna de energía, como puede ser una solar. Esta implica una baja en el consumo energético de producción. Se experimentó concretamente con un porcentaje de reducción de un 20% en el consumo energético de las fábricas. Dicha reducción se probó por separado en cada una de las instalaciones con el fin de analizar si era más o menos conveniente para la configuración aplicarla a alguna de ellas. Además, se tomó en cuenta que este tipo de cambio, al representar una inversión considerable, no siempre es posible aplicarlo en todas las instalaciones. En el primer experimento se aplicó la mayor

eficiencia energética solo a la instalación F1. Por ende, se usó en esa fábrica un consumo energético de 240 kWh/t, mientras que el de la otra instalación F2 se mantuvo en los 300 kWh/t. Al optimizar los costos y las emisiones de carbono, se obtienen los resultados del Cuadro 4.20 para la configuración de la cadena de suministros.

**Cuadro 4. 20.** Solución para la optimización de las emisiones de carbono cuando la fábrica F1 tuvo mayor eficiencia energética.

Función objetivo	Costo (\$)	Emisiones (kgCO <sub>2e</sub> )	Configuración (fábricas y producción)	Configuración (centros de distribución)
Minimización del costo total (\$)	730998	86527	F1 (250 t)	Ninguno
Minimización de las emisiones totales (kgCO <sub>2e</sub> )	789801	45518	F1 (220 t) y F2 (30 t)	Ninguno

Los resultados indican que, para optimizar las emisiones de carbono, la fábrica F1 deberá asumir la mayor parte de la producción. La fábrica F2 solo deberá producir y distribuir directamente a los clientes 6 y 7. Además, no se propone tomar en cuenta ningún centro de distribución, a diferencia de la configuración que soluciona el aspecto ambiental del primer escenario del caso (cuando la fábrica F1 tenía un consumo energético mayor e igual al de la otra instalación).

En el segundo experimento, se aplicó un 20% de reducción en el consumo energético más bien a la fábrica F2. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.21.

**Cuadro 4. 21.** Solución para la optimización de las emisiones de carbono cuando la fábrica F2 tuvo mayor eficiencia energética.

Función objetivo	Total costo (\$)	Total emisiones (kgCO <sub>2e</sub> )	Configuración (fábricas y producción)	Configuración (centros de distribución)
Minimización del costo total (\$)	730998	88477	F1 (250t)	Ninguno
Minimización de las emisiones totales (kgCO <sub>2e</sub> )	790592	45441	F2 (250t)	CD3

Al aplicar la reducción del consumo energético en la fábrica F2, la solución ambiental encuentra una configuración que lleva a menores emisiones de carbono que cuando la reducción energética fue en la fábrica F1, aunque el costo es ligeramente mayor.

Nótese la sensibilidad de la solución ambiental a la reducción en el consumo energético de las fábricas. Cuando dicha reducción se aplicó en la fábrica F1, la fábrica F2 también operó, aunque con mucho menor volumen productivo. Pero cuando la reducción se empleó a la fábrica F2, la configuración óptima escoge operar únicamente esta y agregar un centro de distribución.

De igual manera, es posible evaluar los beneficios que se pueden obtener al reducir la huella de carbono de la cadena de suministros reduciendo el consumo energético de las instalaciones, de los centros de distribución o de los proveedores.

#### **4.3.9 Configuración de la cadena de suministros al considerar la colaboración de las fábricas para la distribución**

Colaborar en la distribución, en términos de distribuir las fábricas juntamente con los centros de distribución a los clientes o bien de abastecerse de producto entre estos, puede favorecer objetivos ambientales en términos de reducir las emisiones de carbono, así como también los objetivos económicos.

El modelo matemático está en la capacidad de analizar esos dos tipos de colaboración.

##### a) Colaboración de las fábricas para la entrega de productos

Como una forma de colaboración en la cadena de suministros, se experimentó el trasiego de producto directamente desde las fábricas hacia los clientes, así como desde los centros de distribución hacia los consumidores para determinar si, extendiendo la posibilidad de traslado a más actores, esto contribuiría a reducir las emisiones de carbono.

##### b) Colaboración para el abastecimiento de productos entre las fábricas

Otra forma de colaborar en la cadena de suministros es el abastecimiento entre las fábricas de forma que una pueda recibir producto de la otra a fin de cumplir los niveles que requiere despachar.

Esta colaboración descrita en el punto a) se aplicó al caso en estudio. Como consecuencia se obtuvo un beneficio. De hecho, estos resultados al optimizar, tanto los costos como las emisiones de carbono, consideraron esta posibilidad de colaborar, pues demostró en ambos casos ser favorable.

La colaboración descrita en el punto b) se aplicó al caso en estudio. Los resultados para la optimización de emisiones, con los datos de este análisis no se vieron modificados. Tampoco variaron los resultados para optimizar costos, ni se presentaron cambios en la optimización de la función combinada de costos y emisiones.

#### **4.3.10 Análisis de variación en los valores de parámetros de entrada del caso de estudio mediante la simulación**

En el caso en estudio, se consideraron todos los valores de los parámetros de entrada como únicos, sin variación. Sin embargo, algunos de esos parámetros pueden presentar cambios. Unos de los que mayor modificación suelen mostrar son los referentes a los costos económicos. Al revisar la literatura, se encontró que los costos de localización han sido un parámetro incorporado en estos análisis, Gao y Ryan (2013) estudiaron el efecto de su incertidumbre en la configuración óptima. En este punto es de interés investigar si se mantendría o no la configuración óptima encontrada para la cadena de suministros. Para analizar este aspecto, se condujo una simulación Montecarlo de los costos de la cadena de suministros que podrían tener una mayor tendencia a variar, a fin de asegurar que la configuración de la cadena de suministros sea robusta.

Por ende, se definieron los parámetros de los costos para los que se simularía variación. Se utilizó una distribución de probabilidad triangular para estimar su variación, por ser la más adecuada para aproximar parámetros cuando no se conocen con certeza los datos reales. La distribución triangular trabaja con dos valores extremos y uno medio como más probable, para la simulación éste último correspondió al valor usado en el caso en estudio. En el Cuadro 4.22., se muestran los parámetros de costos que se simulan, así como la magnitud de variación considerada para cada uno.

**Cuadro 4. 22.** *Parámetros de costos y variación considerada.*

Parámetro	Variación
$\lambda_j$ Costo fijo de operar cada fábrica j	+/- 20%
$v_k$ Costo fijo de operar cada centro de distribución k	+/- 20%
$\rho_{ij}$ Costo por tonelada-kilómetro del proveedor i a la fábrica j	+/- 50%
$\tau_{jk}$ Costo por tonelada-kilómetro de fábrica j a centro de distribución k	+/- 50%
$\phi_{kl}$ Costo por tonelada-kilómetro de centro de distribución k a detallista l	+/- 50%

En la columna derecha, se indica la variación aplicada a cada parámetro para la simulación. Para estimar los valores máximos y mínimos, se aplicaron rangos de variación de un 20% para los costos de localización y de un 50% para los del transporte. Estos últimos implicaron asignar montos al traslado desde la mitad del valor medio usado en el caso en estudiado hasta el doble. Los rangos son amplios con el fin de establecer la medida con la que se pueden alterar los resultados. En la columna derecha se indica la variación aplicada a cada parámetro para la simulación. De esta forma, para dicha simulación, los parámetros tuvieron los valores para la distribución de probabilidad triangular mostrados en el Cuadro 4.23.

**Cuadro 4. 23.** *Valores de la distribución triangular para cada parámetro.*

Parámetro	Costo del transporte (factor)	Costo Fijo F1	Costo Fijo F2	Costo Fijo CD1	Costo Fijo CD2	Costo Fijo CD3	Costo Fijo CD4	Costo Fijo CD5
Valor más probable	1	37500	37500	37500	37500	93.75	93.75	37500
Mínimo	0.5	30000	30000	30000	30000	75	75	30000
Máximo	2	45000	45000	45000	45000	112.5	112.5	45000

El resultado de las emisiones de carbono y de costos de la configuración, así como esta última en términos de las fábricas y centros de distribución que participan

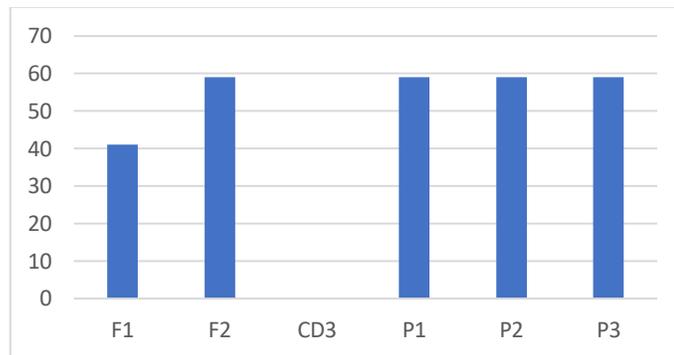
(denotados con 0 cuando no participan y 1 cuando si lo hacen) se presentan en el Cuadro 4.24.

**Cuadro 4. 24.** Resultados de la optimización con las variaciones en los parámetros de costos de transporte y costos fijos de operación de fábricas y centros de distribución.

Simulación	Fábrica 1 F1	Fábrica 2 F2	Centro 3 CD3	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Costos (\$)
1	0	1	0	48261.6	748256.1
2	0	1	0	48261.6	743433.2
3	0	1	0	48261.6	752963.9
4	0	1	0	48261.6	753084.5
5	0	1	0	48261.6	746667.9
6	0	1	0	48261.6	749832.5
7	1	0	0	48480.2	763978.9
8	0	1	0	48261.6	766418.0
9	1	0	0	48480.2	757838.0
10	1	0	0	48480.2	765151.4
11	0	1	0	48261.6	760111.1
12	1	0	0	48480.2	758308.8
13	0	1	0	48261.6	754931.6
14	1	0	0	48480.2	752748.1
15	1	0	0	48480.2	761810.5
16	0	1	0	48261.6	750836.2
17	1	0	0	48480.2	751983.2
18	0	1	0	48261.6	754901.2
19	0	1	0	48261.6	754323.8
20	0	1	0	48261.6	752159.6
21	1	0	0	48480.2	761827.9
22	0	1	0	48261.6	744740.4
23	1	0	0	48480.2	755562.9
24	1	0	0	48480.2	755646.2
25	0	1	0	48261.6	737790.9
26	1	0	0	48480.2	746034.2
27	0	1	0	48261.6	754364.0
28	0	1	0	48261.6	765066.5
29	1	0	0	48480.2	754699.8

De acuerdo con la simulación, la probabilidad de mantenerse la configuración óptima, encontrada para optimizar el multiobjetivo de los costos y de las emisiones de carbono (por metas) de la cadena, es de un 60%. La fábrica 2 es la que se escoge

para operar, el proveedor (P1) le suministra el material 1, el proveedor (P2) el material 2 y el proveedor (P3) el material 3. La probabilidad de cada actor en la configuración, de acuerdo con la simulación, se muestra en la Figura 4.7. Nótese que el centro de distribución 3 (CD3) no se escoge operar en ninguna oportunidad.



**Figura 4. 7.** Probabilidad de cada actor en la configuración de la cadena de suministros acuerdo con la simulación

La probabilidad de que opere por el contrario la Fábrica 1, con otros proveedores, es de 0.4. El detalle completo de esta simulación de variaciones en los parámetros de costos de transporte y de localización de fábricas y centros de distribución se muestra en el Apéndice 14.

En la revisión de literatura, se encontró que la variabilidad de la demanda de los clientes ha sido un factor incorporado en estos análisis, Altmann y Bogaschewsky (2014), Gao y Ryan (2013) y Wang et al (2013) analizaron el efecto de la incertidumbre en las demandas de los clientes en la configuración óptima. Este comportamiento variable en la demanda hace que para muchos productos solo se disponga estimados de valores entre los que se puede encontrar. Al ser las demandas de los consumidores un parámetro influyente para la configuración de la cadena de suministros, conviene también investigar si se mantendría o no la configuración óptima encontrada para la cadena de suministros, en caso de que

estas variaran. Por lo tanto, para analizar la robustez de la configuración propuesta, incorporando la variación de las demandas de estos, también se realizó otra simulación Montecarlo.

Dicha simulación requirió generar demandas de los usuarios bajo una distribución de probabilidad triangular. Esta distribución se seleccionó por ser la más adecuada para aproximar casos en los que los datos reales no son bien conocidos. La distribución triangular trabaja con el valor medio como el más probable. Para la simulación, el valor medio de demanda de cada cliente fue el del caso estudiado. Además, se añadieron valores máximos y mínimos esperados para la demanda de cada cliente, por lo que se consideró un rango de variabilidad de  $\pm 20\%$  sobre el valor más probable de demanda. De esta forma los mínimos, máximos y más probables de las demandas de los usuarios (en toneladas para el periodo) fueron los que se muestran en el Cuadro 4.25.

**Cuadro 4. 25.** *Valores de la distribución triangular para cada demanda.*

Parámetro	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5	Cliente 6	Cliente 7	Cliente 8
Valor más probable	100	40	25	20	18	15	15	17
Mínimo	80	32	20	16	14	12	12	14
Máximo	120	48	30	24	22	18	18	20

Para el análisis de la optimización multiobjetivo (por metas), se especificó como meta económica, el mínimo que se obtuvo al optimizar los costos de la configuración en \$730998. Como meta ambiental, o sea, las emisiones de la configuración, se especificó la cantidad mínima encontrada al optimizarlas, en 46856 kgCO<sub>2</sub>e. El resultado de fábricas y centros de distribución a operar (denotados con 0 y 1), así como los desvíos en las metas y valores finales que resultaron, se muestran en el Cuadro 4.26.

**Cuadro 4. 26.** Resultados de la optimización multiobjetivo por metas con demandas de clientes variables.

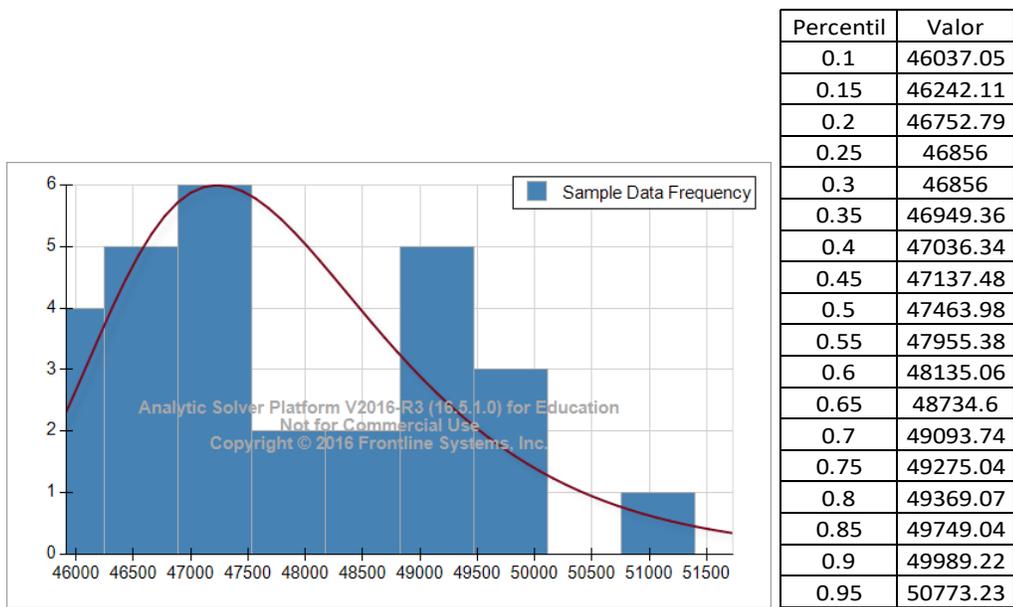
Simulación	F1	F2	CD2	CD3	Emisiones (kgCO <sub>2e</sub> )	Desvió en emisiones	Costos (\$)	Desvió en costos
1	1	0	1	0	46856.0	0.0	704938.4	0.0
2	0	1	0	0	47023.1	167.1	739441.7	8442.7
3	0	1	0	0	49032.2	2176.2	768214.4	37215.4
4	0	1	0	0	49360.2	2504.2	771295.6	40296.6
5	1	0	1	0	46041.1	0.0	720141.1	0.0
6	0	1	0	0	48803.8	1947.8	767847.6	36848.6
7	0	1	0	0	46856.0	0.0	733784.0	2785.0
8	0	1	0	0	47123.5	267.5	739602.8	8603.8
9	0	1	0	0	47045.2	189.2	739477.2	8478.2
10	0	1	0	0	47523.9	667.9	745355.1	14356.1
11	0	1	0	0	46856.0	0.0	733950.8	2951.8
12	0	1	0	0	49404.7	2548.7	776476.5	45477.5
13	0	1	0	0	47404.1	548.1	742608.1	11609.1
14	1	0	1	0	45596.5	0.0	714317.4	0.0
15	0	1	0	0	46936.3	80.3	736747.7	5748.7
16	1	0	1	0	46339.9	0.0	725730.8	0.0
17	1	0	1	0	46189.4	0.0	722934.2	0.0
18	0	1	0	0	49287.6	2431.6	771179.2	40180.2
19	0	1	0	0	49987.6	3131.6	782521.8	51522.8
20	1	0	1	0	46000.5	0.0	720075.9	0.0
21	0	1	0	0	48342.8	1486.8	759443.4	28444.4
22	0	1	0	0	49237.3	2381.3	773653.1	42654.1
23	0	1	0	0	49934.5	3078.5	782436.5	51437.5
24	0	1	0	0	47996.6	1140.6	751223.5	20224.5
25	0	1	0	0	47978.1	1122.1	751193.8	20194.8
26	1	0	1	0	46856.0	0.0	723613.8	0.0
27	0	1	0	0	50003.8	3147.8	782547.9	51548.9
28	0	1	0	0	51402.7	4546.7	805231.4	74232.4

De acuerdo con la simulación, la configuración obtenida para la optimización multiobjetivo de las emisiones de carbono y de los costos de la cadena (por metas) del caso inicial se mantiene con un 75% de probabilidad. El proveedor (P1) suministra el material 1 a la fábrica 2, el proveedor (P2) el material 2 y el proveedor (P3) el material 3. Con probabilidad de 25%, opera la fábrica 1 y el centro de distribución 2. Esto ocurre cuando la demanda total es muy baja. La Figura 4.8 muestra los actores de la configuración de la cadena de suministros que se mantienen (probabilidad 75%) enmarcados en color rojo y en color café los de 25%.



**Figura 4. 8.** Configuración de la cadena de suministros para la simulación de variaciones en las demandas de los clientes

El comportamiento de las emisiones de carbono equivalente de la configuración de la cadena de suministros, de acuerdo con la simulación, se muestra en la Figura 4.9. De esta y de la tabla de percentiles, se observa una probabilidad del 60% de presentarse emisiones de carbono en la cadena, menores a la cantidad encontrada en la optimización multiobjetivo del caso inicial (sin variación en la demanda).



**Figura 4. 9.** Comportamiento de las emisiones de carbono de la simulación de variaciones en la demanda de los clientes

El detalle completo de esta simulación de variaciones en las demandas de los clientes se encuentra el Apéndice 15.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES**

El objetivo principal de esta investigación fue diseñar la configuración de la cadena de suministros mediante un modelo matemático que contribuya a la toma de decisiones para hacerla sostenible, tanto en términos económicos como de reducción de la huella de carbono. Se desarrolló un modelo matemático de programación lineal entera mixta, el cual contempla el comportamiento de los actores de la cadena de suministros, desde los proveedores de los insumos hasta los detallistas (o clientes) de los productos. La cadena contemplada en el modelo es general, por lo tanto, es posible aplicarlo a una amplia variedad de productos que cumplan la configuración establecida en este, y con ser transportables y almacenables.

El modelo optimiza los costos de la cadena de suministros, las emisiones de carbono y ambos criterios combinados en una unidad monetaria. Este último aspecto lo hace capaz de analizar los efectos de una regulación sobre las emisiones de carbono (como puede ser un impuesto a estas emisiones o la consecución de una política de carbono neutralidad). También, puede buscar la optimización de los costos al restringir la emisión total de carbono de la cadena de suministros. Asimismo, puede optimizar dicha cadena para mantenerse dentro de un determinado costo y generación de emisiones de carbono. El modelo desarrollado se aplicó al caso de la cadena de suministros de un producto, con el fin mostrar sus capacidades y las opciones de optimización que provee. Los resultados obtenidos demuestran que se logró determinar una configuración para hacer su cadena más sostenible, al reducir tanto sus costos como su huella de carbono.

Del modelo matemático desarrollado en la investigación se concluye:

1. El modelo contiene suficientes parámetros de entrada de la cadena de suministros, con el fin de valorar distintos escenarios para la reducción de las emisiones de carbono, desde modificaciones en los procesos productivos de los

actores hasta cambios en las operaciones de transporte de bienes. Por ende, empresas industriales lo pueden aplicar para modelar el efecto de posibles modificaciones en los procesos y seleccionar los más convenientes en términos de reducir las emisiones sin dejar de lado el efecto en los costos.

2. El modelo desglosa en cada opción de optimización cómo se componen tanto las emisiones de carbono como los costos de la configuración de la cadena de suministros por cada actor y cada traslado. Este desglose permite priorizar las actividades en las que más emisiones de carbono se generan y así procurar una gestión más sostenible de la cadena de suministros.

3. Las opciones de optimización desarrolladas en el modelo lo hacen versátil. La selección de cada una depende de los objetivos o prioridades del administrador de la cadena de suministros, así como de la información que posea. El modelo se puede aplicar a distintas opciones de gestión de las emisiones de carbono en las empresas, desde la reducción, el control bajo algún límite, hasta la compensación para la búsqueda de la carbono neutralidad.

4. La contribución más importante del modelo es que apoya el proceso de toma de decisiones en materia de gestión ambiental ante el cambio climático. Aporta un mejor conocimiento del impacto de las decisiones de la configuración de la cadena de suministros en la huella de carbono, además, en sus costos operativos, lo cual favorece la implementación de acciones positivas para su sostenibilidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la aplicación del modelo al caso de estudio, se concluye:

1. La mayor cantidad de emisiones de carbono de la configuración de la cadena, aproximadamente 75%, la generan los actores, proveedores, fábricas y centros de distribución, mientras que 25% se genera en la logística entre ellos.

2. Las emisiones de carbono se reducen conforme aumentan las instalaciones que opera la cadena de suministros, sean estas fábricas o centros de distribución o incluso proveedores de materiales.

3. La optimización combinada de los costos y de las emisiones de carbono evidencia que, a mayor costo económico de las emisiones, menor es la cantidad de emisiones generadas y mayor el costo total de la cadena de suministros.

4. Conforme se reduce el límite máximo permitido en las emisiones de la huella de carbono, el costo de operación de la cadena de suministros aumenta.

5. La selección de proveedores de materiales es sensible a la limitación de la cantidad de emisiones de carbono a permitir en la cadena de suministros.

6. La solución del modelo mediante la programación por metas, con dos valores, uno económico y otro ambiental, demuestra ser de gran utilidad. Al aplicarla se determinó una configuración que, si bien puede no satisfacer ninguna de las dos metas por completo, determina la condición donde, con un incremento relativamente pequeño en los costos óptimos, disminuye sustancialmente las emisiones de carbono. Al penalizar los desvíos en el cumplimiento de ambas, se determinó que en tanto el desvío en el objetivo ambiental se penalice 50% o menos que el económico, la configuración que se obtiene sobrepasa considerablemente la cantidad de emisiones estipuladas (meta).

7. La optimización de las emisiones de carbono de la cadena de suministros es más sensible al reducir el consumo energético en unas instalaciones de fabricación que en otras. Por ese motivo, el modelo matemático es de utilidad para decidir los programas de inversión en eficiencia energética empresarial a fin de disminuir la huella de carbono.

8. El trabajo colaborativo en la distribución del producto, específicamente con el envío directo de este desde las fabricas a los clientes y no solo mediante centros de distribución, demostró tener un impacto positivo en la reducción de las emisiones de carbono en la cadena de suministros.

9. Mediante una simulación de las demandas de los clientes, se corroboró la robustez de la configuración óptima determinada para la cadena de suministros. Esta se mantuvo con una probabilidad de un 75% para variaciones en las demandas de los clientes y de 60% para variaciones en los costos de transporte, y de localización de fábricas y centros de distribución.

10. El modelo logró determinar configuraciones de la cadena de suministros del producto con menores emisiones de carbono, sin embargo, todas conllevan costos por encima de los mínimos que se podrían alcanzar (al optimizar solo los costos de la cadena). Por lo tanto, la empresa requiere estar dispuesta a tal incremento para reducir las emisiones de carbono de la cadena de suministros, y por ende del producto. Se determinaron configuraciones con menores emisiones y costos tan solo un poco más altos que los mínimos. Para reducciones más agresivas se encontró que la empresa debe invertir en más instalaciones para sus operaciones.

Finalmente, de la investigación se concluye que es necesario afianzar la cultura ambiental en las empresas e individuos en general. En la experimentación con el modelo, se observó que solo cuando se estiman las emisiones de carbono, cerca al valor real de los perjuicios que provocan al medio ambiente, se logra la reducción de las emisiones de la huella de carbono. Más aún, cuando se valora poco el impacto sobre el medioambiente, la cadena de suministros genera mayor cantidad de emisiones de carbono.

## **CAPITULO 6. RECOMENDACIONES**

1. Con respecto a la adquisición de materiales, los proveedores podrían presentar otras externalidades, por ejemplo, las referentes al uso de plaguicidas en las actividades agrícolas. Aunque estos insecticidas no influyan directamente en el aumento de gases de efecto invernadero, su empleo debe considerarse en la selección de proveedores. Los insecticidas modernos son organofosforados y, a pesar de ser menos persistentes, resultan ser más dañinos para los seres vertebrados. Es común que los plaguicidas se empleen en forma irracional, por lo tanto, es importante combatir tal conducta para no agravar el problema.

2. La combustión móvil genera no solo emisiones de gases de efecto invernadero, sino también contaminantes. El problema es más grave en las flotillas con mayor antigüedad. Como la investigación solo se centró en los gases de efecto invernadero, no se detalló sobre los contaminantes, por lo tanto, se recomienda considerarlos. Sin embargo, se remarca que el cambio en las actividades logísticas al definir una configuración que optimiza la huella de carbono de la cadena de suministros evita no solo la emisión de gases efecto invernadero, sino también de los contaminantes asociados.

3. La tendencia actual hacia el análisis del ciclo de vida de los productos y hacia el reporte al consumidor sobre sus impactos ambientales obliga a las cadenas de suministros a preocuparse por cerrar el ciclo de la cadena. El cierre conlleva una serie de operaciones que también tienen un impacto tanto ambiental, como económico y social, los cuales en muchos casos son difíciles de predecir. Por ende, es necesario analizar el impacto de las actividades de fin de vida del producto, para determinar las estrategias más adecuadas. Por ejemplo, en el empaque de alimentos y bebidas, algunas industrias han optado por envases oxo degradables como alternativa para el manejo de fin de vida del producto.

4. Una empresa con compromiso social, que atiende las necesidades y preocupaciones de la sociedad y procura su bienestar, debería manifestar con obras

su interés por el impacto que tiene en el ambiente. Más allá, un objetivo prioritario debería ser reducir este y su impacto en el cambio climático. Una forma de evidenciar lo anterior es valorar las emisiones de carbono económicamente cercanas al detrimento que provocan.

## **CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA**

- Abdallah, T., Diabat, A. y Simchi-Levi, D. (2010). Carbon Sensitive Supply Chain Network Problem with Green Procurement. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 1-6. Recuperado de <http://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/66601>
- Ahi, P. y Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 52, 329-341. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018
- Aldanueva, I. (2012). Los principios de la responsabilidad social y la ISO 26000. *Harvard Deusto Business Review*, 217, 74-79. Recuperado de <https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/consulta/registro.cmd?id=140536>
- Altmann, M. y Bogaschewsky, R. (2014). An environmentally conscious robust closed-loop supply chain design. *Journal of Business Economics*, 84, 613-637. doi: 10.1007/s11573-014-0726-4
- Aly, A. y Baker, C. (2013). Productivity Issues: Industrial Engineering and Operations Management. En C. Baker (Ed.), *Handbook of Food Factory Design (147-170)*. doi: 10.1007/978-1-4614-7450-0
- Beamon, B. (1999). Designing the green supply chain. *Logistics Information Management*, 12(4), 332-342. <http://dx.doi.org/10.1108/09576059910284159>
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. y Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233, 299-312. doi: 10.1016/j.ejor.2013.09.032
- Carballo-Penela, A. y Doménech, J. L. (2010). Managing the carbon footprint of products: the contribution of the method composed of financial statements (MC3). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 962-969. doi: 10.1007/s11367-010-0230-1

Carbon Trust. (2012). *Carbon Footprint Guide*. Recuperado de [http://www.carbontrust.com/media/44869/j7912\\_ctv043\\_carbon\\_footprinting\\_aw\\_interactive.pdf](http://www.carbontrust.com/media/44869/j7912_ctv043_carbon_footprinting_aw_interactive.pdf)

Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI). (2008). *Manual para la implementación de Compras Verdes en el sector público de Costa Rica*. San José, Costa Rica. Recuperado de [https://www.hacienda.go.cr/comprared/Manual\\_Compras\\_Verdes.pdf](https://www.hacienda.go.cr/comprared/Manual_Compras_Verdes.pdf)

Cervantes, G., Sosa, R., Rodríguez, G. y Robles, F. (2009). Ecología industrial y desarrollo sustentable. *Ingeniería*, 13(1), 63-70. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46713055007>

Chaabane, A. Ramudhin, A. y Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135, 37- 49. doi: 10.1016/j.ijpe.2010.10.025

Chase, R. B. y Jacobs, F. R. (2014). *Administración de Operaciones. Producción y Cadena de suministros* (13 ed.). México: McGraw-Hill.

Charnes, A. Cooper, W. W. y Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

Chomkhamsri, K. y Pelletier, N. (2011). *Analysis of Existing Environmental Footprint Methodologies for Products and Organizations: Recommendations, Rationale and Alignment*. European Commission Joint Research Center. Institute for Environmental and Sustainability. Recuperado de <http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/Deliverable.pdf>

- Chopra, S. y Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministros. Estrategia, Planeación y Operación* (3ª ed.). México: Pearson Educación.
- Department for environment food and rural affairs (DEFRA). (2006). *Environmental key performance indicators*. Crown Copyright. Recuperado de <https://www.gov.uk/government/publications/environmental-key-performance-indicators-reporting-guidelines-for-uk-business>
- Diabat, A. y Simchi-Levi, D. (2010). *A carbon-capped supply chain network problem*. IEEE (International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management), 523-527. Recuperado de <http://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/58988>.
- Dekker, R., Bloemhof J., Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 671-679. doi:10.1016/j.ejor.2011.11.010
- Dietz, T., Fitzgerald, A. y Shwom, R. (2005). Environmental values. *Annual Review of Environmental Resources*, 30, 335-72. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144444>
- Edwards J., Mc Kinnon, A. y Cullinane, S. (2011). Comparative carbon auditing of conventional and online retail supply chains: a review of methodological issues. *Supply Chain Management: An International Journal*, 16, 57-63. <http://dx.doi.org/10.1108/13598541111103502>
- Elhedhli, S. y Merrick, R. (2012). Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D*, 17, 370-379. doi: 10.1016/j.trd.2012.02.002

- Ercin, A. E. y Hoekstra, A. Y. (2012). *Carbon and Water Footprints- Concepts, Methodologies and Policy Responses*. United Nations Educational, Scientific and Culture Organization. Paris. Recuperado de <http://www.waterfootprint.org/Reports/Ercin-Hoekstra-2012-Carbon-and-Water-Footprints.PDF>
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J. y Péton, O. (2015). *Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review*. Omega, Elsevier, 2015, 54, 11-32. doi: 10.1016/j.omega.2015.01.006
- Evans, J. R. y Lindsay, W. M. (2005). *Administración y Control de la Calidad* (6ª ed.). Mexico: Thomson Editores.
- European Commission. (2013). *Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organizations*. Official Journal of the European Union. Vol 56. Recuperado de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:124:FULL:EN:PDF>
- Gao, N. y Ryan, S. M. (2014). Robust design of a closed-loop supply chain network for uncertain carbon regulations and random product flows. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 3, 5-34. doi: 10.1007/s13676-014-0043-7
- Egilmez, G., Kucukvar, M., Tatari, O. y Bhutta, M.K. (2014). Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cycle based frontier approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 8-20. doi: 10.1016/j.resconrec.2013.10.008

- Hao, R. y Fu, S. (2013). *The research of carbon footprint in the manufacturing supply chain management*. Proceedings of the International Conference on Low Carbon LTLGB, 615-621. doi: 10.1007/978-3-642-34651-4\_85
- Hassini, E., Surti, C. y Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. *International Journal on Production Economics*, 140, 69-82. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.01.042
- Hillier, F. S. y Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9ª ed.). México: McGraw-Hill.
- Hoejmoose, S., Brammer, S. y Millington, A. (2012). "Green" supply chain management: The role of trust and top management in B2B and B2C markets. *Industrial Marketing Management*, 41, 609-620. doi: 10.1016/j.indmarman.2012.04.008
- Hong, P., Kwon, H. B. y Roh, J. J. (2009). Implementation of strategic green orientation in supply chain. An empirical study of manufacturing firms. *European Journal of Innovation Management*, 12(4), 512-532. doi: 10.1108/14601060910996945
- Hopp, W. J. y Spearman, M. L. (2001). *Factory Physics: Foundations of manufacturing management* (2ª Edition). New York: McGraw-Hill.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2014). *Factores de Emisión GEI* (4ª ed.). Recuperado de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision>
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). (2004). *Sistemas de Gestión Ambiental Requisitos con Orientación para su uso*. INTE-ISO 14001: 2004. San José, Costa Rica.

\_\_\_\_\_. (2006). *Gases de efecto invernadero-Parte 1: especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero*. INTE-ISO 14064-1:2006. (1ª ed.). San José, Costa Rica.

\_\_\_\_\_. (2007). *Análisis del Ciclo de Vida: Principios y Marco de Referencia*. INTECO 14040: 2007. San José, Costa Rica.

\_\_\_\_\_. (2011). *Norma nacional para demostrar la C- Neutralidad: requisitos*. INTECO 12-01-06:2011. San José, Costa Rica. INTECO.

Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC). (2014). *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 y L. A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland. Recuperado de <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Jensen, B. (2002). Knowledge, Action, and Pro-environmental Behaviour. *Environmental Education Research*, 8(3), 325-334. doi: 10.1080/13504620220145474

Jiménez, M. A. (2009). *Indicadores de Desempeño Ambiental en el Marco de la ISO 26000 RS*. Coloquio Internacional y Consorcio Doctoral sobre Indicadores de Evaluación de Responsabilidad Social y Medioambiental de las Empresas ISEOR Universidad de Jean Moulin Lyon 3 y Academy of Management. *Pecnia*, 9, 111-128. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.18002/pec.v0i9.664>

Kainuma, Y. y Tawara, N. (2006). A multiple attribute utility theory approach to lean and green supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 101, 99-108. doi: 10.1016/j.ijpe.2005.05.010.

- Kannegiesser, M. y Günther, H.O. (2014). Sustainable development of global supply chain-part 1: sustainable optimization framework. *Flexible Services Manufacturing Journal*, 26, 24-47. doi: 10.1007/s10696-013-9176-5.
- Krikke, H. (2011). Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12),1196-1205. doi: 10.1016/j.resconrec.2011.07.001
- Le T. P. N. & Lee, T-R. (2011). Model selection with considering the CO<sub>2</sub> emission along the global supply chain. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 24(4), 653-672. doi: 10.1007/s10845-011-0613-6
- Lee, K. (2013). Product Life Cycle Assessment (PLCA) and Product Carbon Footprint (PCF). En J. Kauffman & K-M. Lee (Eds.), *Handbook of Sustainable Engineering* (371-388). Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-1-4020-8939-8\_37
- Martínez-Jurado, P. J. y Moyano-Fuentes, J. (2013). Lean Management, Supply Chain Management and Sustainability: A Literature Review. *Journal of Cleaner Production*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.042>
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T. y Weber, C. L. (2008). The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environmental Science and Technology*, 42 (16), 5839-5842. doi: 10.1021/es703112w.
- Mc Kinnon, A. (2010). Product-level carbon auditing of supply chains. Environmental imperative or wasteful distraction. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40 (½), 42-60. doi: 10.1108/09600031011018037

- Morales-Abarca, F. (2008). Costos de la industrialización y venta de miel de abeja: El caso de una microempresa en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 19(2), 279-284. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43711425014>
- Moreno, A. y Urbina, J. (2008). *Impactos sociales del cambio climático en México*. INE- PNUD. México. Recuperado de [http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/impactos\\_sociales\\_cc.pdf](http://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/impactos_sociales_cc.pdf)
- Myers, D. (2004). *Social Psychology* (2ª ed.). New York: McGraw-Hill. Recuperado de [http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0070952027/363504/Ch04\\_Myers3Ce.pdf](http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0070952027/363504/Ch04_Myers3Ce.pdf)
- Nagurney, A., Yu, M. y Floden, J. (2013). Supply chain network sustainability under competition and frequencies of activities from production to distribution. *Computational Management Science*, 10, 397-422. doi: 10.1007/s10287-013-0190-6
- Nahmias, S. (2014). *Análisis de la Producción y las Operaciones* (6ª ed.). México: McGraw-Hill.
- O'Brien, D., Capper, J. L., Garnsworthy, C., Grainger, C. y Shalloo, L. (2014). A case study of the carbon footprint of milk from high-performing confinement and grass-based dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 97(3), 1835-1851. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7174>
- Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD). (2017). Employment Implications of Green Growth: Linking jobs, growth and green policies. OECD Report for the G7 Environment Ministers. Recuperado de <https://www.oecd.org/environment/Employment-Implications-of-Green-Growth-OECD-Report-G7-Environment-Ministers.pdf>

Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2016). Green Jobs Progress Report 2014-2015. Recuperado de [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_emp/---emp\\_ent/documents/publication/wcms\\_502730.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_502730.pdf)

Pandey, D., Agrawal, M. y Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178, 135 -160. doi: 10.1007/s10661-010-1678-y

Pishvaei, M. S., Rabban, M. y Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to close loop supply chain under uncertainty. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, 35, 637-349. doi: 10.1016/j.apm.2010.07.013.

Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA).\_(2012). *El mejoramiento de la eficiencia de los equipos de enfriamiento Guatemala*. REGATTA Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la Acción frente al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Recuperado de <http://www.cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/negociaciones-cmnucc/category/equipos-de-refrigeracion-eficientes-en-alc>

\_\_\_\_\_. (2012). *El mejoramiento de la eficiencia de los equipos de enfriamiento Nicaragua*. REGATTA Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la Acción frente al Cambio Climático en América Latina y el Caribe. Recuperado de <http://www.cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/negociaciones-cmnucc/category/equipos-de-refrigeracion-eficientes-en-alc>

Radu, A. L. Scriciu, M. A. y Caracota, D. M. (2013). Carbon footprint analysis: towards a projects evaluation model for promoting sustainable development. *Procedia Economics and Finance*. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(13\)00149-4](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(13)00149-4)

Ramírez E. y Tovar, N. (2012). Conciencia y Cultura Ambiental Empresarial: un indicador de la medida de la responsabilidad social empresarial. Caso río Fucha, Bogotá. *Revista Estrategias*, 10 (19), 68-80. Recuperado de <http://revistas.ucc.edu.co/index.php/es/article/view/522>

Ramudhin, A., Chaabane, A., Kharoune, M. y Paquet, M. (2008). Carbon Market Sensitive Green Supply Chain Network Design. *Proceedings of the 2008 IEEE IEEM*. doi: 10.1109/IEEM.2008.4738039

Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54, 1513-1520. doi: 10.1016/j.dss.2012.05.053.

Sheu, J.-B., Chou, Y.-H. y Hu, Ch.-Ch. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transportation Research Part E*, 41, 287–313. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655450400047X>

Silver, E., Pyke, D. & Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling* (3ª ed.). New York: Wiley and Sons.

Soto, M. (11 de setiembre de 2013). Costa Rica crea mercado local de carbono. *La Nación*. Recuperado de [http://www.nacion.com/economia/Costa-Rica-mercado-local-carbono\\_0\\_1365463474.html](http://www.nacion.com/economia/Costa-Rica-mercado-local-carbono_0_1365463474.html)

Supply Chain Council (SCC). (2010). *Supply chain operations reference (SCOR®) model*. Recuperado de <http://www.apics.org/sites/apics-supply-chain-council>

- Sundarakani, B., Souza, R., Goh, M., Warner, S. y Manikandan, S. (2010). Modeling carbon footprints across supply chain. *International Journal of Production Economics*, 128, 43-50. doi: 10.1016/j.ijpe.2010.01.018
- Sundarakani, B., Souza, R., Goh, M., Van Over, D., Manikandan, S. y Koh, S. C. L. (2010). A Sustainable Green Supply Chain for Globally Integrated Networks. En S.C.L. Koh & L. Wang (Eds.), *Enterprise Networks and Logistics for Agile Manufacturing* (pp. 191-206). doi: 10.1007/978-1-84996-244-5\_9
- Taticchi, P., Tonelli, F. y Pasqualino, R. (2013). Performance Measurement of Sustainable Supply Chains. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), 782-804. doi: 10.1108/IJPPM-03-2013-0037
- Ten Have, H. A. M. J. (2010). *Ética ambiental y políticas internacionales*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 7, place de Fontenoy 75732 Paris 07 SP, Francia. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001873/187309s.pdf>
- Testa, F. y Iraldo, F. (2010). Shadows and lights of GSCM (Green Supply Chain Management): determinants and effects of these practices based on a multi-national study. *Journal of Cleaner Production*, 18, 953-962. doi:10.1016/j.jclepro.2010.03.005
- Tiwari M. K., Mahanty B., Sarmah, S. P. & Jenamani, M. (2013). *Modeling of Responsive Supply Chain*. Florida: CRC Press Taylor and Francis Group.
- Tseng, S. C. y Hung, S. W. (2014). A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management.

*Journal of Environmental Management*, 133, 315-322. doi:  
10.1016/j.jenvman.2013.11.023

Van der Bergh, J.C.J.M y Botzen, WJW. (2015). Monetary valuation of the social cost of CO<sub>2</sub> emissions: A critical survey. *Ecological Economics*, 114, 33–46. doi:  
10.1016/j.ecolecon.2015.03.015

Van Hoof, B., Monroy, N. y Saer, A. (2008). *Producción más Limpia, Paradigma de la Gestión Ambiental* (1ª ed.). México: Editorial Alfaomega.

Van Hoof, B. y Thiell, M. (2013). Collaboration for sustainable supply chain management: small and medium sized enterprises in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 67, 239-248. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.12.030

Van Rossem, C., Tojo, N., y Lindhqvist, T. (2006). *Extended producer responsibility. An examination of its impact on innovation and green products*. Report Commissioned by Greenpeace International, European Environmental Bureau and Friends for the Earth Europe. Recuperado de <http://www.greenpeace.org/international/PageFiles/24472/epr.pdf>

Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C. y Jacobs, R. F. (2005). *Planeación y control de la producción, administración de la cadena de suministros* (5ª ed.). México: McGraw-Hill.

Wang, F., Lai, X. y Shi, N. (2011). A multi objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51, 262-269. doi:  
10.1016/j.dss.2010.11.020

Wang, L. C., Chen, T. L., Chen, Y. Y., Chen, Y. W., y Wang, A. (2013). Closed-Loop Sustainable Supply Chain Design Under Uncertainties. En A. Azevedo (ed.),

*Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems* (pp. 799-812).  
doi: 10.1007/978-3-319-00557-7\_66

World Resources Institute (WRI) y World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2011). *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. Recuperado de [http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard\\_041613.pdf](http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf)

\_\_\_\_\_. (2012). *Emission Factors Compilation*. Recuperado de [www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Emission-Factors-from-Cross-Sector](http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Emission-Factors-from-Cross-Sector).

Yeh W. C. y Chuang, M. C. (2011). Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems. *Expert Systems with Applications*, 38, 4244-4253. doi:10.1016/j.eswa.2010.09.091

Yi, H. (2013). Clean energy policies and green jobs: An evaluation of green jobs in U.S. metropolitan areas. *Energy Policy*, 56, 644–652. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.034>

Zakeri, A. Dehghanian, F., Fahimnia, B. y Sarkis, J. (2015). Carbon pricing versus emissions trading: A supply chain planning perspective. *International Journal Production Economics*, 164,197-205. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.012

Zhao, R., Yiyun, L., Zhang, N. y Huang, T. (2017). An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach. *Journal of Cleaner Production* (pp. 1085-1097). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.006>

Zhou, M., Pan, Y., Chen, Z. y Yang, W. (2013). Optimizing green production strategies: An integrated approach. *Computers & Industrial Engineering*, 65, 517-528. doi: 10.1016/j.cie.2013.02.020

Zhu, Q., Geng, Y. y Sarkis, J. (2013). Motivating green public procurement in China: An individual level perspective. *Journal of Environmental Management*, 126, 85-95. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.04.009

## **APÉNDICES**

**APÉNDICE 1**  
**Consumo energético de los proveedores**

A continuación, se presentan las estimaciones del consumo energético de los proveedores de cada materia prima.

### 1. Materia prima principal (Material 1)

El proveedor de la principal materia prima tiene un grado de tecnología bajo. En su proceso productivo, solo utiliza energía eléctrica.

La estimación de la producción diaria es la siguiente: considerando que se requiere procesar 210 toneladas de producto al año, partiendo de que el proceso tiene una temporada productiva de 8 meses y que se trabaja 5 días a la semana, se tiene una producción diaria de: 1 212 kg /día (al tomar 210 toneladas/(52/12\*8\*5)) .

En una jornada de 6 horas, con una máquina que trabaja 6 horas al día, se encuentra que debe tener la capacidad para procesar 200 kg/hora. En el siguiente Cuadro 1 se muestra la maquinaria, con sus consumos energéticos:

**Cuadro 1. Características de la maquinaria.**

Parte	Descripción	Cálculos	kW Total
Motor	Motor de 5 hp de fuerza	5 x 0.746 kw	3.73
Ventiladores	Dos motores de 1 hp	2 x 0.746 kw	1.49
Compresor	Motor de 2 hp de fuerza	2 x 0.746 kw	1.49
		Total=	6.71

El consumo eléctrico de esta máquina por un tiempo de una hora sería:

$$6.71 \text{ kW} * 1 \text{ hora} = 6.71 \text{ kWh}$$

Adicionando iluminación general de la fábrica y otras cargas, estimadas en 1 000 kWh por mes, y considerando que se trabajan al mes 22 días y 6 horas al día, el consumo por hora adicional sería de= 7.6 kWh.

Total consumo eléctrico por hora= 14.3 kWh

Total consumo por producción (de una hora)= 14.3 kWh/0.202 t  
= 71 kWh/t

+ Consumo de un equipo de calentamiento (descristalizador)= 143 kWh/t

Total consumo por producción= 214 kWh/t

### **1. Materia prima secundaria de envasado (Material 2)**

El proveedor de la materia prima secundaria de envasado provee botellas en plástico PET (tereftalato de polietileno) para envasar el producto. Para la producción de estas, el proveedor utiliza energía eléctrica y otras fuentes, como diésel, en su proceso productivo.

Se estima que el proceso de moldeo y conformación de una botella de PET requiere 0,83 kWh/kg de PET (tomado del reporte de Esterform Packing).

A esta energía, debe agregársele la que se consume para fabricar la preforma utilizada para confeccionar la botella. La energía requerida por la maquinaria para hacer preformas es del orden de los 5.2 kWh/kg PET. Resulta entonces que se requieren en total 6 kWh/kg PET, o sea, 20 MJ/kg PET (este valor también se corrobora en el estudio de Gleick y Cooley (2009)).

De acuerdo con lo anterior, la energía requerida para confeccionar una botella de 500 g que tiene un peso de 29 g sería 0,17 kWh.

Las botellas PET requieren en total 100 MJ/kg PET, si se toma en consideración la energía consumida para elaborar la materia prima del PET. Bajo estas condiciones, las emisiones de GHG son del orden de 2 kgCO<sub>2</sub>e/kg PET, incluyendo la producción de la resina. De acuerdo con el programa WARM de EPA (2015), reciclando el PET, este valor se reduce significativamente a 0.13 kgCO<sub>2</sub>e/kg PET.

Regresando a la elaboración de las proformas para luego moldearlas en botellas, se tiene que de los 6 kWh/kg requeridos, o bien, de los 6000 kWh/t PET, un 80 % corresponde a electricidad y el restante 20 % o menos a energía calórica proveniente de otras fuentes. Estos son valores aproximados porque es difícil estimarlos, dado que dependen de los fabricantes y de los medios que utilicen para producir calor.

Manteniendo los anteriores porcentajes, se tiene que 4800 kWh corresponderían a energía eléctrica y 1200 kWh a energía calórica, que podría obtenerse mediante búnker o con diésel. En este caso, se utiliza diésel, aproximadamente 120 litros.

## **2. Materia prima secundaria de empaque (Material 3)**

El proveedor de la materia prima secundaria de empaque utiliza energía eléctrica y otras fuentes como diésel para las calderas en su proceso productivo.

Considerando una caja de cartón corrugado, cuyo proceso productivo requiere como principal insumo el papel, se tiene que el consumo energético corresponde principalmente al corrugador, también, participa otra maquinaria en el proceso.

El consumo de litros de combustible en el proceso productivo de una planta con capacidad de 300 toneladas de cartón de papel al año se estimó de un manufacturador:

Combustible utilizado para las calderas= 186 litros por tonelada

Consumo energético total= 630 kWh/t de producto

El Cuadro 2. resume las estimaciones del consumo de los proveedores de los insumos.

**Cuadro 2.** Consumo energético eléctrico y de otras fuentes de energía para la fabricación de las materias primas.

Rendimiento de la materia prima	Consumo energético kWh/t	Otras fuentes de energía	Litros de combustible
Materia prima principal	214	No	N.A.
Materia prima secundaria - envasado	4800	Si	120
Materia prima secundaria - empaque	630	Si	186

Bibliografía:

Etiopia Embassy. (s. f.). *Corrugated paper box*. Recuperado de [http://www.ethiopianembassy.org/AboutEthiopia/InvestmentProjectProfiles/Manufacturing/Paper%20and%20Paper%20Products/Corrugated\\_Paper\\_Box.pdf](http://www.ethiopianembassy.org/AboutEthiopia/InvestmentProjectProfiles/Manufacturing/Paper%20and%20Paper%20Products/Corrugated_Paper_Box.pdf)

Gleick, P. H. y Cooley, H. S. (2009). Energy Implications of Bottled Water. *Environmental Research Letters*. 4 (1). Recuperado de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/4/1/014009/meta>

Waste Resource Conservation (WARM). (2015). *Plastics*. Environment Protection Agency EPA. Recuperado de <http://www3.epa.gov/warm/>

Esterform Packaging (s. f. ). *Raising the bar in PET bottle lightweighting*. Recuperado de: <http://www.esterform.com/>

**APÉNDICE 2**  
**Consumo energético de las fábricas**

Seguidamente, se presentan las estimaciones del consumo energético de las fábricas de producción.

Para el consumo energético de la fábrica es importante considerar la tecnología que se utiliza. En el caso de estudio, el proceso productivo es bastante sencillo y poco dependiente de maquinaria, pues más bien es bastante manual. El proceso se centra en el envasado de un insumo.

Equipamiento considerado para la fábrica y aproximaciones de su consumo energético se muestran en el siguiente Cuadro 1:

**Cuadro 1. Equipos y consumo eléctrico.**

Equipo	Descripción	Consumo (kW)
1 Compresor	-	15 kW
Máquinas con tres motores	Motores de 1.5 hp*	3.4 kW
Iluminación del área	Área de 10 x 20 m. al menos seis lámparas de 150 W.	0.8 kW
Otros consumos	Varios	2 kW
Total carga=		21.2 kW

Considerando una FCA (carga media del equipo en relación con su carga máxima) de 0.40 (para ajustar el hecho de que el equipo no se utiliza durante toda la jornada) como un factor de carga diario, se tiene un consumo energético promedio de 8.48 kW de demanda durante 24 horas.

El consumo energético anual sería entonces: de  $21.2 \times 24 \times 0.40 \times 6 \times 52 = 63\,498$  kWh (aproximadamente igual al de considerar 9 horas laborales al día por 330 días al año).

Si se toma en cuenta la tasa de producción mensual, se puede calcular el indicador de consumo energético de la fábrica como razón del consumo de 63 498 kWh al año entre la producción anual de 215 toneladas. La tasa de consumo energético para la producción resulta en= 295 kWh/tonelada valor, que se redondeó a 300 kWh/t.

\*Nota: 1hp = 0.746 kW

**APÉNDICE 3**  
**Consumo de materias primas en el proceso productivo**

A continuación, se presentan las estimaciones del rendimiento medio de cada materia prima en el proceso productivo empleado en la fábrica en conformidad con la tecnología de producción que se utiliza.

### **1. Materia prima principal**

La materia prima principal conforma en sí el producto de la fábrica y para el caso se asume que se aprovecha en un 100%, por lo que, si se debe producir 215 toneladas de producto, se requiere, a su vez, 215 toneladas de esta materia prima.

### **2. Materia prima secundaria de envasado**

Para esta materia prima, se hizo una estimación a partir de la cantidad de peso del material de envasado, plástico PET (tereftalato de polietileno), para 215 toneladas de producto.

Considerando que:

Para 215 toneladas, es decir, 215000 kg, o bien, 215 000 000 gramos, se requieren 430000 envases de 500 g.

Si cada botella tiene un peso de 29 gramos, se necesita 12470 kg de botellas, o bien, 12.47 toneladas de botella.

### **3. Materia prima secundaria de empaque**

En este empaque, se transportan unidades del producto ya envasado en plástico.

Considerando que:

Cada uno de los envases de 500 gramos tiene unas dimensiones aproximadas de 55x75x150mm, se pueden acomodar 50 envases en una caja de 280X380X305 mm. Esto lleva a un área de 0.62 m<sup>2</sup> de cartón.

Para estimar la cantidad de material de empaque para estas dimensiones, se utilizó como referencia una caja comercial, cuyas dimensiones son 390 x 224 x 230 mm que tiene un peso de 328 gramos. El área de esta caja es de 0.46 m<sup>2</sup>. De esta manera, se obtiene que el peso del cartón es de 713 gramos/ m<sup>2</sup>, o bien, 0.713 kg/m<sup>2</sup>. Dado que el peso total por caja de botellas de miel es de 25 kg, este se aumentó en un 40 % por m<sup>2</sup> del cartón a utilizar, lo cual resultó en 1 kg/ m<sup>2</sup>.

De esta forma, partiendo de que el área de la caja de botellas de miel es de 0.62 m<sup>2</sup>, su peso será 0.62 kg, o bien, 620 gramos.

Considerando finalmente el volumen de botellas a empacar:

Total botellas= 430000 botellas

Total cajas con 50 botellas= 8 600 cajas

Total gramos de material en cada caja= 529 gramos o 0.529 kg

Total toneladas de material en la producción 215 toneladas= 4.55 toneladas

El siguiente Cuadro 1. resume las estimaciones de los factores de consumo:

**Cuadro 1.** Resumen de factores de consumo de cada materia prima del producto.

Rendimiento de la materia prima	Descripción y Rendimiento	Factor de consumo del material
Materia prima principal	Para producir 215 toneladas se requieren 215 toneladas Rendimiento del material 100%	1 (215/215)
Materia prima secundaria -envasado	Para producir 215 toneladas se requieren 12.5 toneladas	17.2 (215/12.5)
Materia prima secundaria - empaque	Para producir 215 toneladas se requieren 4.6 toneladas	40 (215/4.6)

**APÉNDICE 4**  
**Estimación del consumo energético del centro de distribución**

Considerando un centro de distribución con una capacidad de almacenamiento de 18 toneladas almacenadas al mes (220/12).

Con pallets de a lo más 500 kg  $\Rightarrow$  Aproximadamente, 36 pallets al mes

Pallets (tarimas) de tamaño estándar = 48" x 40" x 6.4"  
o bien 122cm x 102 cm x 16 cm  
Área disponible= 12444 cm<sup>2</sup>  
3 cajas x 3 cajas = 9 cajas, esto representa 10800 cm<sup>2</sup>  
Peso / pallet 1 capa = 225 kg  
Peso / pallet 2 capas = 450 kg  
Peso / pallet 3 capas = 675 kg  
127 cm x 107 cm = 13589 cm<sup>2</sup>

Si se estiban en dos niveles= 18 estibas al mes  $\Rightarrow$  23 m<sup>2</sup>.

Al adicionar los pasillos y espacio de oficinas, resulta en una bodega de 70 a 80 m<sup>2</sup>.

Esta tendría la capacidad de la demanda del periodo.

La bodega contaría con las siguientes condiciones:

- Sin refrigeración
- Un montacarga
- Sin montacargas a gas

Con los datos de referencia, se obtiene:

21000 kWh al año para una bodega de 920 pallets, esto es 1750 kWh al mes para 920 pallets, o bien 1.9 kWh por mes por pallet.

Esto da un consumo mensual de 68 kWh, que para el caso se tomó como 60 kWh, debido a las condiciones de menor consumo energético que las del dato tomado como referencia.

#### Bibliografía

Vogtländer, J. G. (2004). *Corrugated Board Boxes and Plastic Container Systems: an analysis of costs and eco-costs*. FEFCO (European Federation of Corrugated Board Manufacturers).

Franchetti, M. J. y Apul, D. (2013). *Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation, and Case Studies*. New York, USA: CRC Pres.

**APÉNDICE 5**  
**Estimación de costos operativos de los centros de distribución**

Considerando una cantidad de toneladas almacenadas al mes = 18 (215/12).

Con pallets de a lo más 500 kg ⇨ Aproximadamente, 36 pallets al mes.

Pallets (tarimas) de tamaño estándar = 48" x 40" x 6.4"
o bien 122cm x 102 cm x 16 cm
Área disponible= 12444 cm <sup>2</sup>
3 cajas x 3 cajas = 9 cajas, esto representa 10800 cm <sup>2</sup>
Peso / pallet 1 capa = 225 kg
Peso / pallet 2 capas = 450 kg
Peso / pallet 3 capas = 675 kg
127 cm x 107 cm = 13589 cm <sup>2</sup>

Si se estiban en dos niveles= 18 estibas al mes ⇨ 23 m<sup>2</sup>

Al adicionar pasillos, espacio de oficinas, conllevan a una bodega de 70 a 80 m<sup>2</sup>.

En el siguiente Cuadro 1 se muestra el desglose de los rubros de costos de la operación del centro de distribución:

**Cuadro 1. Costos de operación del centro de distribución**

Rubro	Costo	Total mensual
Alquiler del espacio de bodega de 75 m <sup>2</sup> *	\$8/m <sup>2</sup>	\$600/mes
Mano de obra (1 persona tiempo completo y 1 persona ½ tiempo)	410000y 210000 colones al mes	\$1200/mes
Seguros y otros	0.5% del valor del inventario	\$150/mes
Valor del inventario	12% anual para \$32 400/mes (18 t * \$1800/ton)	\$162 /mes
Inventario total	18 toneladas	
Agua y energía		\$23/mes
Otros gastos administrativos	50000 colones al mes (\$100/mes)	\$100/mes
Total=		\$2235
Entre la cantidad de producto (18 toneladas)	\$124/t	
Para el caso de estudio usar	\$200/t	

*Importante:* Con un inventario medio de 18/2 por mes= 9 toneladas al mes.

Si se reduce al ayudante a un ¼ de tiempo, el valor medio baja a:

Rubro	Costo	Total mensual
Alquiler del espacio de bodega de 75m <sup>2</sup> *	\$8/m <sup>2</sup>	\$600/mes
Mano de obra (1 persona tiempo completo y 1 persona 1/4 tiempo)	410000 y 110000 colones al mes	\$1000/mes
Seguros y otros	1% del valor inventario	\$162/mes
Valor del inventario	12% anual para \$16 200/mes (9 t* \$1800/ton)	\$162/mes
Inventario medio	9 toneladas	
Energía		\$23/mes
Otros gastos administrativos	50000 colones al mes (\$100/mes)	\$100/mes
Total=		\$2047
Entre la cantidad de producto (18 toneladas)		\$113.7/t
Para el caso de estudio usar		\$200/t

\*Valores encontrados para alquileres en Costa Rica (2015) de espacios de bodegas \$6.5 y \$7/m<sup>2</sup>.

**APÉNDICE 6**  
**Estimación del consumo de combustible en el transporte**

Las siguientes consideraciones se aplicaron tanto a la distribución de proveedores a fábricas como de estas a centros de distribución y de estos a los clientes.

#### 1. Rendimiento de viaje desde las fábricas o centros de distribución

Se incluye como parámetro de entrada el rendimiento en términos de km/l del tipo de camión en la ruta de conexión, desde cada proveedor a cada fábrica para la ida cuando este va cargado.

#### 2. Rendimientos de regreso a las fábricas o centros de distribución

Los rendimientos de regreso se pueden también ingresar al modelo en km/l. Para el caso de aplicación, se hicieron las siguientes consideraciones y estimaciones:

- a) La mayor parte de los camiones regresan vacíos una vez entregada la mercadería, con el fin de recolectar más producto.
- b) El viaje de regreso tiene mejor economía del combustible, debido a la reducción en la carga, máxime si los otros factores pendientes, velocidades y distancias no se alteran significativamente, lo que se reflejará en menores emisiones al regreso. DEFRA (2012) señala que los cambios en la eficiencia del combustible son principalmente visibles en camiones grandes, los cuales pueden reportar emisiones de hasta un 25% más cuando viajan con más carga del promedio o 25% menos cuando lo hacen con menos carga del promedio. Leduc (2006) encontró que el consumo del combustible en camiones pesados incrementa según la carga que transporten, el consumo incrementó entre 60% y 65% cuando los camiones se cargaron a su capacidad máxima, en oposición a cuando viajaron sin carga.
- c) Por ende, se estimaron los rendimientos para el viaje de regreso 50% mayores a los de ida.

### 3. Consumo de total de combustible

Este corresponde a la suma de los consumos para los viajes de ida y regreso en cada ruta.

#### Bibliografía:

DEFRA (Department for environment food and rural affairs) (2012). *Guidance on measuring and reporting Greenhouse Gas emissions from freight transport operations.*

Recuperado de  
[https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/218574/ghg-freight-guide.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/218574/ghg-freight-guide.pdf)

Leduc, G. (2006). *Longer and Heavier vehicles, an overview of technical aspects. JRC Scientific and Technical Reports.* European Commission Joint Centre. Institute for Prospective Technical Studies. Luxembourg. Recuperado de  
[http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/road/events/doc/2009\\_06\\_24/2009\\_gigaliners\\_workshop\\_jrc\\_2.pdf](http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/road/events/doc/2009_06_24/2009_gigaliners_workshop_jrc_2.pdf)

**APÉNDICE 7**  
**Estimación de costos del transporte**

## Costos del transporte

Para la estimación de los costos del transporte, se tomaron estas consideraciones:

- a) El rendimiento en términos del uso total de combustible para el transporte es parte del costo económico del traslado, de hecho, corresponde a una cantidad importante de este costo (Alvear y Rodríguez, 2006).
- b) El costo de operación vehicular del transporte de carga se compone de varios rubros; unos se pueden clasificar como fijos y otros como variables. El Ministerio de Transporte de Colombia (2006) clasifica el costo del combustible, lubricantes, llantas, mantenimiento y otros como costos variables (de acuerdo con el uso de los vehículos), también hay otros que no se afectan tanto por el uso de los vehículos, como los seguros, salarios, estacionamiento y las depreciaciones.
- c) El combustible constituye el principal componente variable del costo del transporte y que a su vez representa el mayor rubro respecto a los costos fijos. Se utilizó una estructura de 60% y 40% respectivamente. Este aspecto también concuerda con lo encontrado por la Cámara de Transportistas Centroamericanos (2008).

### **1. Estimación del costo de transporte para flotillas de seis toneladas**

Considerando:

Toneladas del camión= 6 toneladas

Toneladas payload o carga neta = 4 toneladas

Rendimiento en cada ruta= km/l  $\Rightarrow$  estimación de litros totales

Costo por litro  $\Rightarrow$  total costo combustible

Ejemplo: ruta proveedor 1 hacia fábrica 1, con un rendimiento de ida de 4km/l.

**Cuadro 1. Camión de 6 toneladas (4 toneladas de carga neta- payload).**

Rubro	Costo	Cantidad	Total (\$)
Combustible (diésel)	676 colones por litro ida y vuelta	100 litros	67600 colones \$125.2
Otros gastos variables del camión llantas, aceites y otros.	Por ejemplo, 500000 colones cada 10000 km	50 colones/km 480 km total	24000 colones \$44.4
Mano de obra (1 chofer)	410000 al mes	12 horas por el viaje	25000 colones \$47 + aguinaldos y vacaciones \$60
Viáticos	8 000 colones		\$15
Valor del cargamento	(4 t* \$1 800/ton)		\$7200
Seguros	500000 colones por semestre	83333 colones por mes	2777 colones/día \$5.1 /día
Otros gastos administrativos	Secretaria 400000/mes=2500 colones/hora Jefatura 800000 colones /mes 5000 colones/hora	3 horas  1.5 horas	\$30
Depreciación de la flotilla lineal	Camión de 20 000 0000 colones depreciado a 8 años		7150 colones /día \$ 13/día Por las horas de este viaje se contabiliza
Total=			\$287.8
Entre los kilómetros recorridos 240 km	\$1.20/km		
Entre el peso trasegado	4 toneladas		
Costo \$/t-km =			\$0.30/t-km

## Resumen

Rubros fijos	Rubros variables
<b>Seguros</b>	<b>Combustible</b>
<b>Gastos administrativos</b>	<b>Otros gastos</b>
<b>Depreciación</b>	<b>60%-80%</b>
<b>Salarios</b>	<b>(si no considera la mano de obra)</b>
<b>40%-20 (si no considera la mano de obra)</b>	

## 2. Estimación del costo del transporte para flotillas de cinco toneladas

Considerando:

Toneladas del camión= 5 toneladas

Toneladas payload o carga neta= 2.5 toneladas

Rendimiento en cada ruta = km/l  $\Rightarrow$  estimación de litros totales

Costo por litro  $\Rightarrow$  total costo combustible

Ejemplo: ruta CD1 hacia detallista 1, con un rendimiento de ida de 6 km/l.

Camión de 5 toneladas (2.5 toneladas de carga neta- payload)

Rubro	Costo	Cantidad	Total (\$)
Combustible (diésel)	676 colones por litro ida y vuelta	6.94 litros	4691.4 colones \$8.69
Otros gastos variables del camión llantas. aceites. y otros.	Por ejemplo 380000 colones cada 10 000 km	38 colones/km 50 km total	1900 colones \$3.5
Mano de obra (1 chofer)	410000 al mes	1 hora por el viaje	2500 colones \$4.6 + aguinaldos y vacaciones \$6.6
Viáticos	-		-
Valor del cargamento	(4 t* \$1800/ton)		\$4500
Seguros	colones	61666 colones por mes	3085 colones por día \$0.7 /hora viaje
Otros gastos administrativos	Secretaria 400000 /mes = 2500 colones/hora Jefatura 800000/mes 5000 colones/hora	0.66 hora 0.5 hora	\$6.3
Depreciación de la flotilla lineal	Camión de 16 000 000 depreciado a 8 años		5700/día \$1.3/viaje Por las horas de este viaje
Total=			\$27.1
Entre los kilómetros recorridos 25 km	1.08 \$/km		
Entre el peso trasegado	2.5 toneladas		
Costo \$ /t-km =			\$0.43/t-km

## Resumen

<b>Rubros fijos</b>	<b>Rubros variables</b>
Seguros	Combustible
Gastos administrativos	Otros gastos
Depreciación	60%-80% (si no considera la mano de obra)
Salarios	
40%-20% (si no considera la mano de obra)	

## Bibliografía

Alvear, S. y Rodríguez, P. (2006). Estimación del costo por kilómetro de una empresa de transporte de carga, industria agrícola, región del Maule, Chile. *Panorama Socioeconómico*, 24(32), 48-57. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39903206>

CATRANSCA (Cámara de Transportistas Centroamericanos). (2008). *Costos del transporte terrestre por carretera y tarifas sugeridas*. Recuperado de <http://www.catransca.net/archivos/costos.pdf>

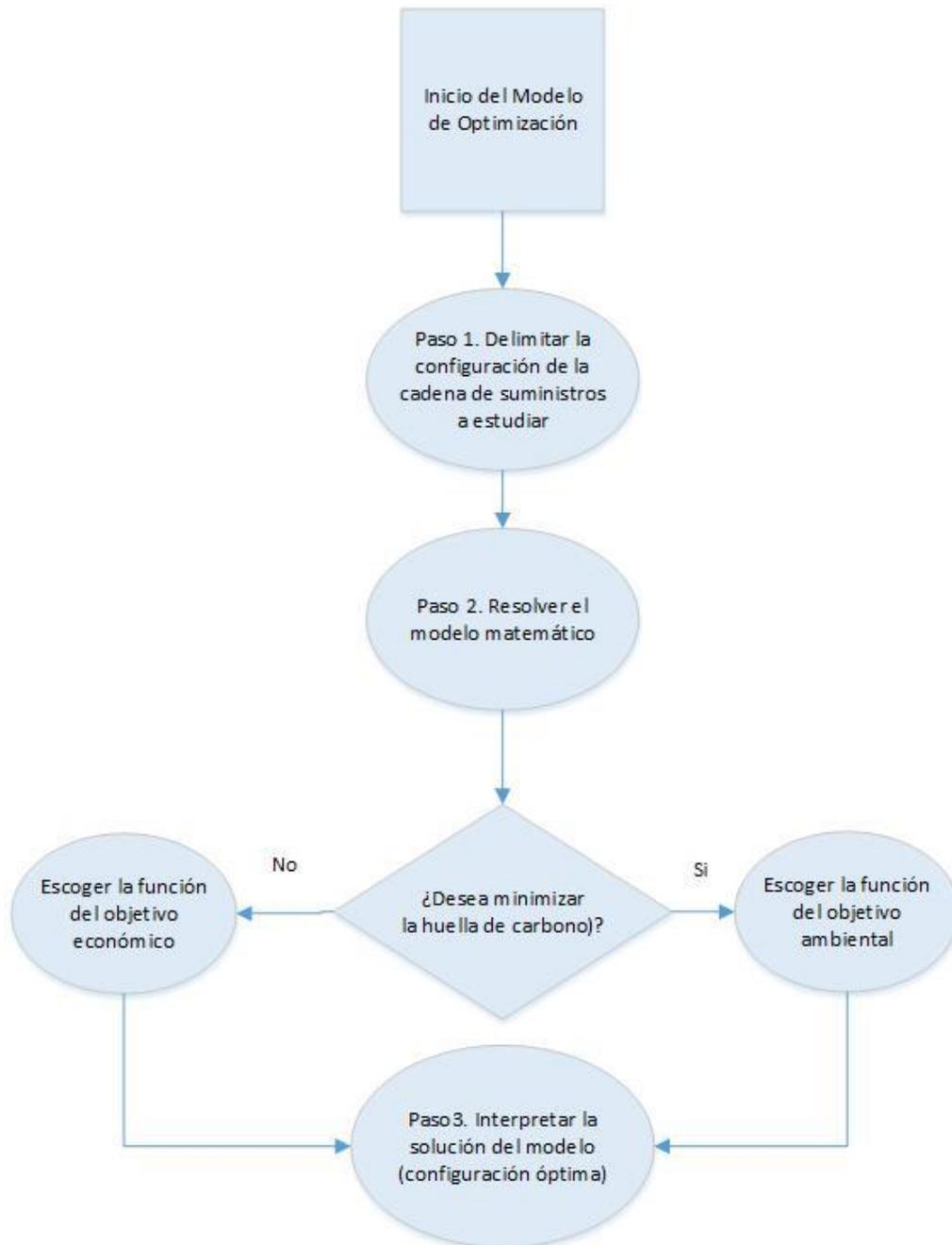
Ministerio de Transporte de Colombia. (2006). *Modelo para la determinación de costos de referencia*. Colombia. Recuperado de <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=290>

## **APÉNDICE 8**

### **Guía de utilización del modelo de optimización**

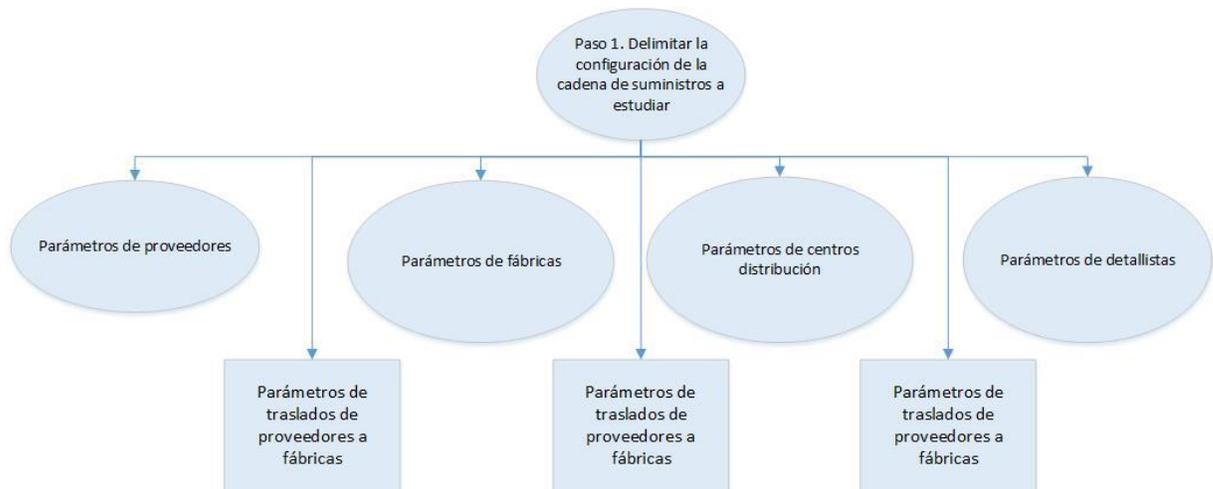
## Procedimientos para la utilización del modelo matemático

En la Figura 1, se muestran los pasos a seguir por el usuario cuando tiene interés de optimización de la huella de carbono de la cadena de suministros.



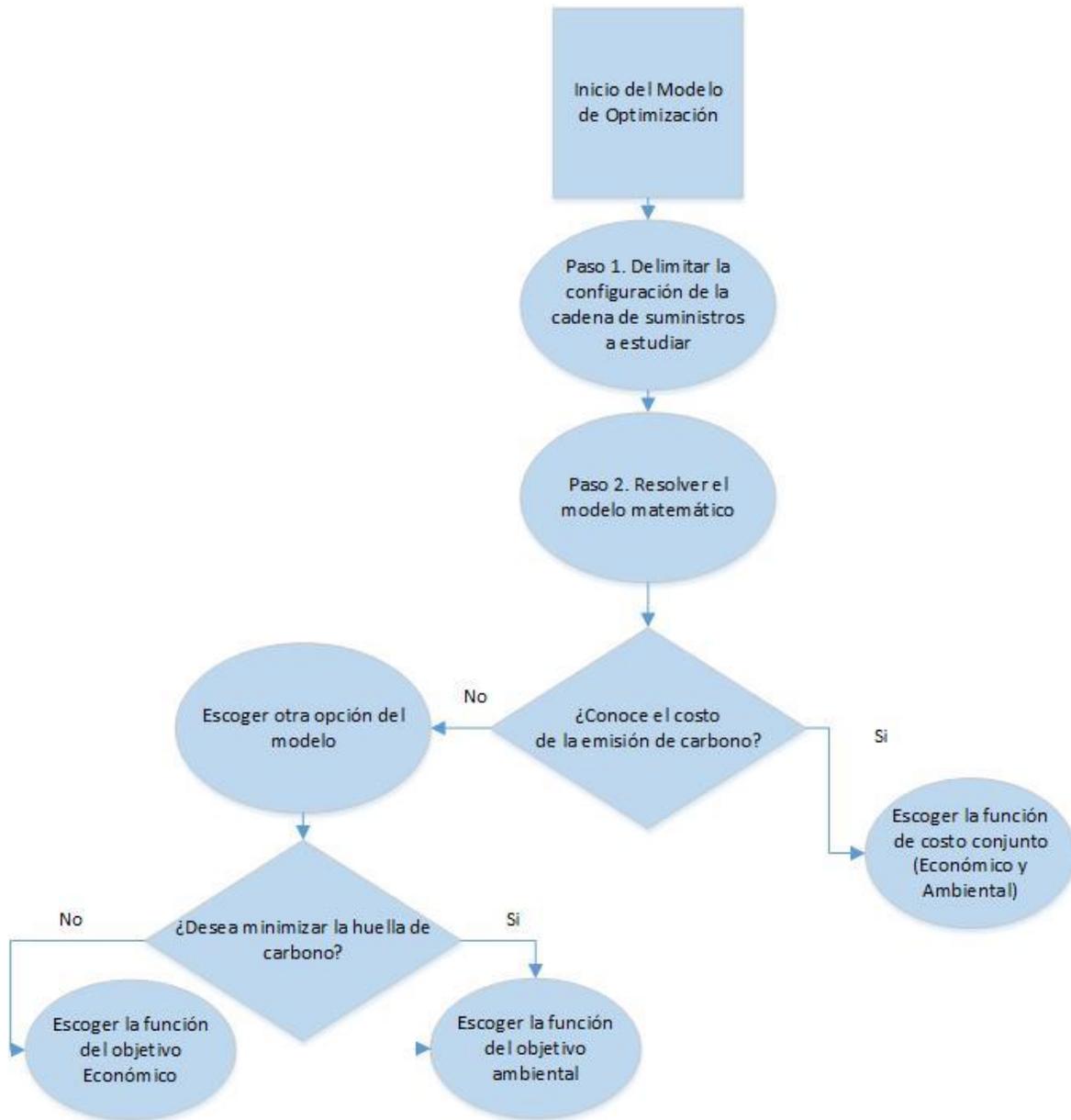
**Figura 1.** Pasos por seguir para la optimización de la huella de carbono.

La Figura 2 señala los pasos para delimitar la cadena de suministros a estudiar. Para detallar la cadena de suministros a analizar, es decir, el paso 1, se deben ingresar los valores de entrada de los parámetros. A continuación, las fuentes a considerar:



**Figura 2.** Parámetros para la delimitación de la cadena de suministros (paso 1).

La Figura 3 muestra los pasos a seguir para usar el modelo con la función combinada de costo de emisiones y de la configuración.



**Figura 3.** Pasos por seguir para la optimización de la función combinada de optimización del costo y de las emisiones de carbono, cuando se conoce su valor.

## **APÉNDICE 9**

**Características de los modelos matemáticos de optimización de la cadena de suministros encontrados en la revisión de literatura**

En el Cuadro 1 se presenta la clasificación de los modelos matemáticos para una cadena de suministros sostenible de acuerdo con el objetivo buscado.

**Cuadro 1. Objetivos de los modelos matemáticos encontrados en la literatura.**

Objetivo	Autores que lo registran
Determinación de flujos óptimos	Sheu, Chou y Hu (2005) Tsengy y Hung (2014)
Determinación de flujos óptimos considerando una logística inversa y ciclo cerrado	Kannegiesser y Günther (2014) Krikke (2011)
Determinación de configuración (de los procesos de fabricación y distribución), así como de flujos óptimos	Nagurney, Yu y Floden (2013) Altmann y Bogaschewsky (2014) Gao y Ryan (2014)
Determinación de configuración (de los procesos de proveedores, fabricación y distribución), así como de flujos óptimos. Sin centros de distribución: Wang, Lai y Shi (2011) y Ramudhin, Chaabane, Kharoune y Paquet (2008)	Le y Lee (2011) Wang, Lai y Shi (2011) Elhedhli y Merrick (2012) Pishvae, Rabban y Torabi (2011) Chaabane <i>et al.</i> (2012) Diabat y Simchi-Levi (2010) Yeh y Chuang (2011) Abdallah <i>et al.</i> (2010) Ramudhin <i>et al.</i> (2008)
Determinación de configuración (de los procesos de fabricación y distribución), así como de flujos óptimos considerando una logística inversa y ciclo cerrado.	Altmann y Bogaschewsky (2014) Gao y Ryan (2014)
Determinación de configuración y flujos óptimos considerando una logística inversa y ciclo cerrado.	Sheu, Chou, Hu (2005) Pishvae, Rabban y Torabi (2011) Chaabane <i>et al.</i> (2012) Wang <i>et al.</i> (2013)
Determinación de configuración, flujos óptimos y niveles de inventarios	Le y Lee (2011) Chaabane <i>et al.</i> (2012)
Selección de los proveedores (solamente proveedores)	Yeh y Chuang (2011)
Determinación de las emisiones de carbono de una cadena de suministros (medición)	Sundarakani <i>et al.</i> (2010)
Determinación del tiempo requerido para la sostenibilidad	Kannegiesser y Günther (2014)

En el Cuadro 2 se clasifican los modelos matemáticos según las variables que buscaron determinar para la configuración de la cadena de suministros.

**Cuadro 2.** Variables utilizadas en los modelos matemáticos encontrados en la literatura.

Variables	Autores
Flujo de bienes	Tsengy y Hung (2014) Sheu, Chou y Hu (2005) Kannegiesser y Günther (2014)
Tasa de producto-ya-usado	Sheu, Chou y Hu (2005)
Subsidios gubernamentales para la logística inversa	Sheu, Chou y Hu (2005)
Costos sociales de emisiones de carbono	Tsengy y Hung (2014)
Emisiones de carbono resultantes	Tsengy y Hung (2014)
Protección del ambiente por la inversión en tecnología de producción	Wang, Lai y Shi (2011)
Ubicaciones de instalaciones (procesos de fabricación y almacenes para la distribución) y flujo de bienes sin logística inversa Algunos evaluaron distintos medios para el transporte Sin centros de distribución: Wang, Lai y Shi (2011)	Wang, Lai y Shi (2011) Elhedhli y Merrick (2012) Diabat y Simchi-Levi (2010) Nagurney <i>et al.</i> (2013) Elhedhli y Merrick (2012)
Ubicaciones de instalaciones (proveedores, fábricas y almacenes para la distribución) y flujo de cantidades sin logística inversa Algunos evaluaron distintos medios para el transporte	Abdallah <i>et al.</i> (2010) Yeh y Chuang (2011) Le y Lee (2011) Wang, Lai y Shi (2011) Ramudhin <i>et al.</i> (2008)
Ubicaciones de instalaciones (procesos fabricación y almacenes para la distribución) y flujo de cantidades, con logística inversa Algunos evaluaron distintos medios para el transporte	Gao y Ryan (2014) Altmann y Bogaschewsky (2014)

Ubicaciones de instalaciones (proveedores, fábricas y almacenes para la distribución) y flujo de cantidades a transportar con logística inversa Algunos evaluaron distintos medios para el transporte	Chaabane <i>et al.</i> (2012) Wang <i>et al.</i> (2013)
Criterio de puntaje en “evaluación verde” y calidad del producto	Yeh y Chuang (2011)
Frecuencia de las actividades	Nagurney <i>et al.</i> (2013)
Impacto de partículas PM emitidas en procesos productivos	Nagurney <i>et al.</i> (2013)
Créditos de carbono	Gao y Ryan (2013) Chaabane <i>et al.</i> (2012) Abdallah <i>et al.</i> (2010)
Incertidumbres (en demandas, retorno de producto ya usado)	Altmann y Bogaschewsky (2014) Gao y Ryan (2013) Wang <i>et al.</i> (2013)
Limites sobre las capacidades de producción máxima y mínima	Kannegiesser y Günther (2014)
Estructura colaborativa entre distribuidores y flexibilidad en los plazos de entrega	Le y Lee (2011)

Como el objetivo de la investigación es la identificación y reducción de la huella de carbono de la cadena de suministros, se catalogaron los modelos de la revisión de literatura según el objetivo que persiguieron para las emisiones de carbono. Ver el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Consideración de las emisiones de carbono en el modelo matemático.

Forma de considerar las emisiones de carbono	Autores	Observaciones
Determinar las emisiones de carbono	Sundarakani et al. (2010) Kannegiesser y Günther (2014)	Sundarakani <i>et al.</i> (2010) en kWh por actor de la cadena Kannegiesser y Günther (2014) diseñaron un marco para su establecimiento
Búsqueda de acuerdos entre los costos de la configuración de la cadena de suministros y la reducción de sus emisiones Se integraron las emisiones en la función del costo al asignarles valor económico	Chaabane et al. (2012) Gao y Ryan (2013) Elhedhli y Merrick (2012) Abdallah <i>et al.</i> (2010) Nagurney <i>et al.</i> (2013)	Los modelos contienen un objetivo económico y otro de reducción de las emisiones
Búsqueda de acuerdos entre los costos de la configuración de la cadena de suministros y la reducción de sus emisiones, con el uso de la programación por metas	Ramudhin <i>et al.</i> (2008)	
Búsqueda de acuerdos entre los costos de la configuración de la cadena de suministros y la reducción de sus emisiones Aplicaron pesos a los objetivos	Altmann y Bogaschewsky (2014)	Los modelos contienen un objetivo económico y otro de reducción de las emisiones Aplicaron pesos a ambos objetivos
Búsqueda de acuerdos entre los costos de la configuración de la cadena de suministros y la reducción de sus emisiones	Wang <i>et al.</i> (2013) Nagurney <i>et al.</i> (2013) Wang, Lai y Shi (2011)	Nagurney <i>et al.</i> (2013) estudió el papel de los impuestos Wang <i>et al.</i> (2013) evalúan escenarios de incertidumbre y su

		efecto en costos y en emisiones de carbono por separado Wang, Lai y Shi (2011) determinaron la frontera Pareto de soluciones de óptimas
Limitar las emisiones de carbono	Diabat y Simchi-Levi (2010)	Con un límite tope a las emisiones, un “cap” como límite superior
Dentro de un mercado de créditos de carbono	Gao y Ryan (2013) Chaabane <i>et al.</i> (2012) Abdallah <i>et al.</i> (2010) Nagurney <i>et al.</i> (2013)	Abdallah <i>et al.</i> (2010) con un costo de las emisiones por encima de un límite “cap” fijado y considerando un mercado de créditos de carbono.
Minimizar el costo total de la cadena de suministros incluyendo el costo de las emisiones de carbono y considerando el cierre de ciclo	Chaabane <i>et al.</i> (2012) Wang <i>et al.</i> (2013) Krikke (2011) sin el costo	
Minimizar los costos sociales de emisiones de carbono	Tsengy y Hung (2014)	

Además, se clasificaron los modelos de la revisión de literatura según el tipo de modelo matemático de optimización y el paquete computacional o software utilizado para buscar su solución; así se muestra en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Tipos de modelos matemáticos formulados y software con el que se solucionaron.

Tipo de modelo	Autores y software utilizado
Lineal entera mixta	Abdallah <i>et al.</i> (2010) con GAMS Le y Lee (2011) con LINGO 11 Diabat y Simchi-Levi (2010) con GAMS Krikke (2011) con Solver en Excel
Heurística primal (primal heuristic)	Elhedhli y Merrick (2012) con Matlab 7.0 y CPLEX 11.0
No lineal entera mixta	Tsengy y Hung (2014) con LINGO
Lineal multiobjetivo (programación por metas)	Ramudhin <i>et al.</i> (2008)
Lineal multiobjetivo (programación entera mixta)	Wang <i>et al.</i> (2013) Chaabane <i>et al.</i> (2012) con LINGO
Lineal multiobjetivo (con método de suma de pesos)	Altmann y Bogaschewsky (2014) con LINGO Sheu <i>et al.</i> (2005) Kannegiesser y Günther (2014) Wang, Lai y Shi (2011) Solver de ILOG CPLEX 9.0
No lineal entera mixta multiobjetivo	Yeh y Chuang (2011) con Visual Basic (algoritmos genéticos) Wang, Lai y Shi (2011) (posteriormente lo modificaron para convertirlo en un MILP modelo de programación lineal entera mixta)
Modelos lineales estocásticos multiobjetivo y modelos con optimización robusta	Pishvae <i>et al.</i> (2011) con ILOG CPLEX 10.1 Gao y Ryan (2014) con IBM ILOG CPLEX 11.0 Altmann y Bogaschewsky (2014) con LINGO con medias y varianzas (para distintos pesos-multiobjetivo) vrs. determinista Wang <i>et al.</i> (2013)
Teoría de juegos	Nagurney <i>et al.</i> (2013) algoritmo computacional
Transporte Euler y Lagrange	Sundarakani <i>et al.</i> (2010)

## **APÉNDICE 10**

### **Factores de emisión de gases de efecto invernadero del IMN (2014)**



## Factores de emisión de gases de efecto invernadero

A continuación se presentan factores de emisión de gases de efecto invernadero avalados por el Instituto Meteorológico Nacional para ser utilizados en los inventarios de gases de efecto invernadero.

Se incluyen los factores de emisión más comunes, si se requiere otro factor de emisión consultar directamente al Instituto Meteorológico Nacional.



## Sector energía

*Dióxido de carbono*

<i>Combustible</i>	<i>CO<sub>2</sub> kg CO<sub>2</sub>/L combustible</i>
Gasolina	2,26
Diesel	2,69
Búnker	3,01
Queroseno	2,48
LPG	1,61
Gasolina de aviación	2,69
Jet fuel	2,46

1

**Figura 1.** Factores de emisión del sector energía (IMN, 2014).



## Sector energía

Uso de electricidad

El factor de emisión en el sector electricidad varía anualmente, los factores para los últimos seis años se indican a continuación:

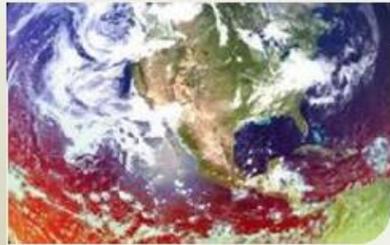
Año	Factor de emisión kg CO <sub>2</sub> e/kWh
2013	0,1300
2012	0,0771
2011	0,0824
2010	0,0570
2009	0,0409
2008	0,0650



## Sector procesos industriales

Fuente	Factor de emisión
Producción de cemento	0,52 kg CO <sub>2</sub> / kg clinker
Producción de cal	0,75 kg CO <sub>2</sub> / kg cal
Producción de vidrio	0,21 kg CO <sub>2</sub> /kg vidrio

**Figura 2.** Factores de emisión de la electricidad (IMN, 2014).



### Potenciales de calentamiento global

Gas	Potencial de calentamiento Horizonte: 100 años
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	21
N <sub>2</sub> O	310
HFC 134a	1.300
HFC 152a	140
R402a	2.447
R402b	2.150
R404a	3.260
R404B	3.260
R407c	1.526
R410a	1.725
R507	3.300
R508B	10.350
ISCEON MO49	2.230
SF <sub>6</sub>	23.900

**Figura 3.** Potenciales de calentamiento global de los gases de efecto invernadero (IMN, 2014).

## **APÉNDICE 11**

**Características del paquete comercial Analytic Solver de Frontline Systems®**

El paquete comercial Analytic Solver de Frontline Systems Inc. ® se ejecuta sobre el paquete comercial de hojas electrónicas Microsoft Excel ®. La aplicación se conocía hasta hace poco como Solver y Solver Premium y también formaba parte de la Academic Solver Platform for Education, dirigida a aplicaciones a nivel universitario, pero recientemente está contenida dentro de lo que Frontline Systems ofrece como Analytic Solver Comprehensive V2017. Además, se pueden obtener versiones de Analytic Solver Optimization V2017, Analytic Solver Simulation V2017, y otras más. La versión correspondiente a Academic Solver Platform se denomina ahora Analytic Solver Basic V2017 y tiene las mismas ventajas que su antecesora.

Analytic Solver se puede adquirir en versión limitada e ilimitada, sobre el número de variables y restricciones. Esta plataforma permite realizar análisis de optimización, simulación y de minería de datos. La aplicación limitada puede manejar hasta 200 variables no lineales y 100 restricciones, además, hasta 500 variables enteras. En la versión ilimitada, puede llegar hasta las 2000 variables y 8000 restricciones, y hasta las 1000 variables enteras. También existe una versión estándar que se corre gratuitamente sobre versiones oficiales de Microsoft Excel ® y que es compatible con las del Analytic Solver.

La aplicación Analytic Solver permite conducir optimización lineal, entera mixta, optimización cuadrática, global y de algoritmos genéticos. Posee motores de solución (*solver engines*) para optimización lineal, no lineal, evolucionario, intervalo global y de barrera SOCP.

Nahmías (2014) indica que Excel se ha venido convirtiendo en el líder en programas de hoja de cálculo. Los autores remarcan que la programación lineal en la herramienta Solver de Excel hace que su uso sea comprensible para una audiencia más amplia.

Además de lo indicado, Solver de Frontline Systems tiene alta compatibilidad con otras herramientas, es relativamente sencillo de adquirir, posee altas capacidades de solución y opciones de programación, por lo que se seleccionó como paquete para la solución del modelo propuesto.

#### Bibliografía

Nahmías, S. (2014). *Análisis de la Producción y las Operaciones* (6ª ed.). México: McGraw-Hill.

Frontline Systems Inc. (2017). *Solver Comparision Summary*. Recuperado de <http://www.solver.com/products-overview>

## **APÉNDICE 12**

**Características del paquete comercial LINGO de Lindo Systems Inc.**

LINGO es una herramienta diseñada por LINDO Systems Inc. ® para construir y resolver modelos de programación lineal, no línea (convexa o no convexa- global), cuadrática, cuadrática restringida, de cono de segundo orden, estocástica y de optimización de enteros de una forma más eficiente, sencilla y veloz.

Según Hillier y Lieberman (2010), LINGO es un poderoso lenguaje de modelado de propósito general. Se caracteriza por su flexibilidad para problemas de la investigación de operaciones, no solo de programación lineal. Además, señalan que el lenguaje de modelado LINGO es eficiente para formular modelos y después correr el solucionador que comparte con LINDO (Linear Interactive and Discrete Optimizer). Este último es un software para la programación lineal y para sus extensiones. Los autores indican que la versión completa de LINDO ha resuelto problemas con cientos de miles de restricciones funcionales y millones de variables de decisión.

Winston (2004) explica que el paquete computacional LINGO es un lenguaje de modelado para la optimización que permite crear muchos, incluso miles de términos de restricciones o funciones objetivos en una línea. Asegura que LINGO es un ejemplo de un generador de matrices sofisticado. Por su parte, Anderson, Sweeney y Williams (1999) afirman que los paquetes para computadora de tipo comercial, como LINDO, tienen amplias capacidades para resolver problemas de programación de enteros.

Por sus capacidades, se escogió el paquete comercial LINGO de Lindo Systems Inc. ® para solucionar el modelo propuesto y comparar los resultados obtenidos con el paquete Analytic Solver de Frontline Systems ®.

#### Bibliografía

Anderson, D. R., Sweeney, D. J., y Williams, T. A. (1999). *Métodos Cuantitativos para los Negocios* (7ª ed.). México. Thomson Editores S. A.

LINDO. (2017). Recuperado de <http://www.lindo.com>

Hillier, F, S. y Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9ª ed.). México: McGraw-Hill.

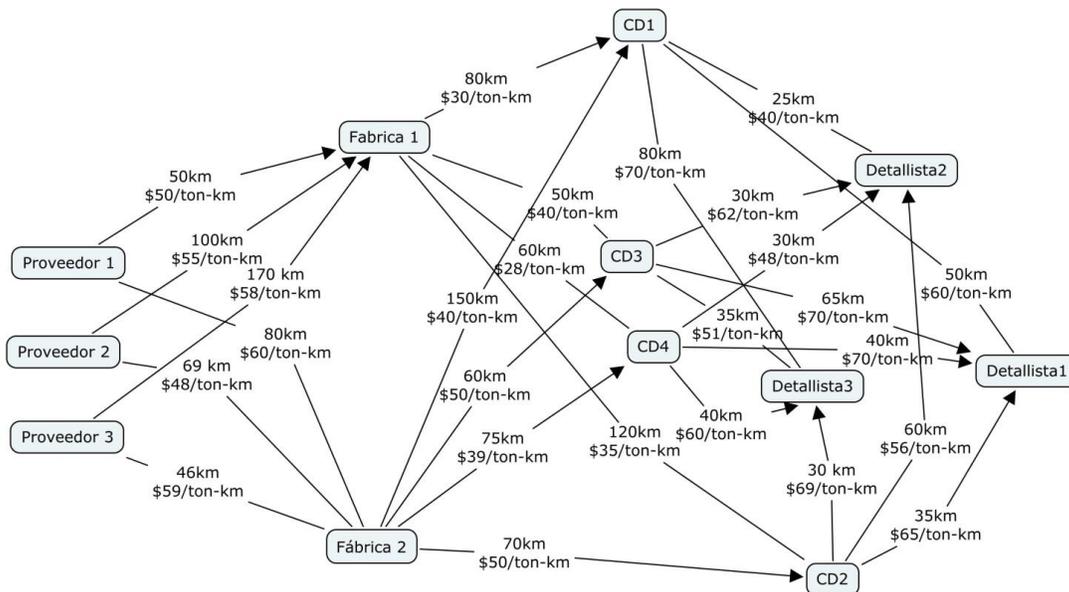
Winston, W. (2004). *Operations Research Applications and Algorithms* (4ª ed.). Canadá: Thompson.

## **APÉNDICE 13**

**Comparación de la robustez del método de solución utilizado por el paquete  
Analytic Solver ® con el del programa LINGO ®**

## Descripción de la configuración de la cadena de suministros

La configuración constó de cuatro eslabones: proveedores, fábricas, centros de distribución y clientes o detallistas. Considera un flujo de las materias primas de los proveedores a las fábricas y de los productos desde las fábricas, donde se manufacturan hacia los centros de distribución y detallistas. Contempló tres proveedores de tres materias primas, dos instalaciones de fabricación, cuatro centros de distribución y tres detallistas. La Figura 1 muestra la configuración de cadena de suministros del ejemplo numérico, incluye las distancias y los costos de los transportes en cada arco de la red.



**Figura 1.** Configuración de la cadena de suministros del ejemplo numérico.

Los proveedores tenían suficiente capacidad para satisfacer la demanda de las fábricas y estas, a su vez, para cumplir con la de los detallistas. Así cada detallista demandaba 300, 500 y 600 toneladas de producto en el periodo y las fábricas tenían una capacidad de producción de 900 y 950 toneladas cada una. La capacidad de un proveedor fue de 1500 toneladas, y para los otros dos fue de 2000 toneladas.

El modelo matemático propuesto se aplicó a un ejemplo numérico y se resolvió tanto con Analytic Solver de Frontline Systems Inc. ® en Microsoft Excel como con el paquete LINGO 11.0. de Lindo Systems Inc. ®

**Optimización del objetivo económico: solución para la función objetivo de minimización del costo total de la configuración**

Los resultados de la configuración para la optimización del costo total se presentan en el Cuadro 1. Además de la configuración y el flujo, se determinaron las emisiones de carbono equivalentes resultantes.

**Cuadro 1. Resultados de la optimización del costo total.**

Configuración y patrón de flujo	Costo total (\$)	Emisiones totales kg CO <sub>2e</sub>	Software
El proveedor 1 envía 600 t a fábrica 1 El proveedor 2 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 1 envía 500 t a fábrica 2 El proveedor 2 envía 380 t a fábrica 2 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 2 Fábrica 1 envía 600 t al CD3 y 300 t al CD4 Fábrica 2 envía 500 t al CD4 CD3 envía 600 t al cliente 3 CD4 envía 500 t al cliente 2 CD4 envía 300 t al cliente 1	18 510 560	2 508 196	Analytic Solver de Frontline Systems (en MS Excel)
El proveedor 1 envía 600 t a fábrica 1 El proveedor 2 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 1 envía 500 t a fábrica 2 El proveedor 2 envía 380 t a fábrica 2 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 2 Fábrica 1 envía 600 t al CD3 y 300 t al CD4 Fábrica 2 envía 500 t al CD4 CD3 envía 600 t al cliente 3 CD4 envía 500 t al cliente 2 CD4 envía 300 t al cliente 1	18 510 560	2 508 196	Lingo 11.0 (solucionado en la iteración 10)

**Optimización del objetivo ambiental: solución para la función objetivo de minimización de las emisiones de carbono equivalente**

Para la optimización del objetivo ambiental, se buscó minimizar la función que calcula la cantidad total de emisiones de carbono equivalente de la configuración. El Cuadro 2 resume los resultados. Además de la configuración y el flujo, se determinó el costo total de la configuración.

**Cuadro 2.** Resultados de la optimización de las emisiones de carbono.

<b>Configuración y Patrón de flujo</b>	<b>Costo total (\$)</b>	<b>Emisiones totales kg CO<sub>2</sub>e</b>	<b>Software</b>
El proveedor 1 envía 600 t a fábrica 1 El proveedor 2 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 1 envía 500 t a fábrica 2 El proveedor 2 envía 380 t a fábrica 2 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 2 Fábrica 1 envía 900 t al CD 3. Fábrica 2 envía 300 t al CD 2. Fábrica 2 envía 200 t al CD 3. CD 3 envía 600 t al cliente 3 CD 3 envía 500 t al cliente 2 CD 2 envía 300 t al cliente 1	18 919 560	2 506 530	Analytic Solver de Frontline Systems (en MS Excel)
El proveedor 1 envía 600 t a fábrica 1. El proveedor 2 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 1 El proveedor 1 envía 500 t a fábrica 2 El proveedor 2 envía 380 t a fábrica 2 El proveedor 3 envía 400 t a fábrica 2 Fábrica 1 envía 900 t al CD 3 Fábrica 2 envía 300 t al CD 2 Fábrica 2 envía 200 t al CD 3 CD 3 envía 600 t al cliente 3 CD 3 envía 500 t al cliente 2 CD 2 envía 300 t al cliente 1	18 919 560	2 506 530	Lingo 11.0 Solución en la iteración 10.

Ambos paquetes computacionales llegan a los mismos resultados para la optimización de los objetivos.

## **APÉNDICE 14**

**Simulación de variación de parámetros de entrada en la optimización por metas de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros**

En el caso de estudio presentado en el Capítulo IV sobre los resultados, se consideraron todos los valores de los parámetros de entrada como valores conocidos, sin variación. Sin embargo, algunos parámetros pueden presentar variación. Uno de estos son los referentes a costos económicos. En este punto, surge la duda sobre si se mantendría o no la configuración óptima encontrada para la cadena de suministros. Para analizar este aspecto, se condujo una simulación Montecarlo con los parámetros de la cadena de suministros que podrían tener mayor tendencia a la variación, con el fin de asegurar que la configuración de esta sea robusta. En la revisión de literatura, se encontró que los costos de localización ha sido un parámetro incorporado en estos análisis, Gao y Ryan (2013) analizaron el efecto de su incertidumbre en la configuración óptima.

Los parámetros que se consideraron con variación se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** *Parámetros de costos que se variaron en la simulación*

Parámetro	Variación
$\lambda_j$ Costo fijo de operar cada fábrica j	+/- 20%
$v_k$ Costo fijo de operar cada centro de distribución k	+/- 20%
$\rho_{ij}$ Costo por tonelada-kilómetro del proveedor i a la fábrica j	+/- 50%
$\tau_{jk}$ Costo por tonelada-kilómetro de fábrica j a centro de distribución k	+/- 50%
$\phi_{kl}$ Costo por tonelada-kilómetro de centro de distribución k a detallista l	+/- 50%

La simulación implicó la generación de números aleatorios para los parámetros anteriores bajo una distribución triangular. Se escogió esta última por ser la más adecuada para aproximar casos donde los datos reales no son bien conocidos, pues la distribución triangular trabaja con el valor medio más probable, que para la simulación corresponde al del caso base presentada en el Capítulo IV, y con los valores máximos y mínimos esperados. Para estimar estos valores de cada parámetro, se tomaron rangos de variación de un 20% para los costos de localización y de un 50% para los del transporte. Estos últimos implicaron aplicar costos del transporte desde la mitad del valor medio usado en el caso base hasta el

doble. Tales rangos son amplios con el fin de establecer la medida en que pueden alterar los resultados. En la columna derecha, se indica la variación aplicada a cada parámetro para la simulación, de modo que estos tuvieron los siguientes valores para la distribución triangular:

**Cuadro 2.** *Valores más probables, mínimos y máximos de cada parámetro de costo*

Parámetro	Costo del transporte (factor)	Costo fijo F1	Costo fijo F2	Costo fijo CD1	Costo fijo CD2	Costo fijo CD3	Costo fijo CD4	Costo fijo CD5
Valor más probable	1	37500	37500	37500	37500	9375	9375	37500
Mínimo	0.5	30000	30000	30000	30000	75	75	30000
Máximo	2	45000	45000	45000	45000	112.5	112.5	45000

Primero, se investigó simulando 10 combinaciones aleatorias de los parámetros indicados. A pesar de que se encontró un error bajo en los resultados, para mejorar la estimación, se condujeron más simulaciones hasta completar una muestra de 29 combinaciones de los parámetros indicados.

Los resultados obtenidos del total de simulaciones para la optimización multiobjetivo por metas de los costos y de las emisiones de carbono de la configuración para el total simulaciones, se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Resultado de la simulación al variar algunos costos de la cadena**

Simulación	Costo del transporte (factor)	Costo fijo F1	Costo fijo F2	Costo fijo CD1	Costo fijo CD2	Costo fijo CD3	Costo fijo CD4	Costo Fijo CD5
1	1.0	37988.4	30953.3	38993.1	33445.5	95.4	96.5	41009.4
2	0.7	38928.9	34467.2	38823.2	37150.0	87.7	94.9	36045.0
3	1.0	37902.3	36038.1	35647.6	36978.8	80.0	86.5	33664.8
4	1.0	40460.1	37357.6	37789.4	36542.4	110.6	96.9	38344.6
5	0.9	37481.6	32071.2	38554.6	31902.2	80.7	101.7	31246.0
6	1.1	34164.2	31455.2	42248.5	36870.0	98.6	78.0	37106.3
7	1.5	34743.9	43048.1	39674.3	39748.9	103.6	91.2	37002.6
8	1.5	38706.9	39430.3	38613.0	37183.5	90.8	92.7	38766.7
9	1.4	31575.8	33914.2	36792.1	32896.3	103.9	81.3	34979.7
10	1.4	38481.6	39978.2	38928.4	35402.8	91.9	90.6	36873.2
11	1.1	44161.2	40720.4	31755.5	40792.6	100.7	103.0	31687.7
12	1.1	38520.7	41265.9	40689.9	35602.2	88.3	103.5	39465.5
13	1.2	42357.8	34869.1	34726.0	37170.3	99.3	104.4	33504.6
14	1.0	35787.1	39282.3	32241.9	37758.9	95.7	97.6	38458.7
15	1.4	36011.6	37037.6	37892.6	38861.9	99.1	96.1	37030.9
16	0.9	37518.7	35766.8	39479.4	36147.4	105.7	100.6	40317.3
17	0.9	36587.0	39896.6	38518.4	38135.3	101.1	99.6	36633.1
18	1.0	37844.5	37545.4	38991.2	38852.6	94.3	106.1	37485.2
19	1.2	34039.9	34649.6	36764.6	36096.7	106.5	99.5	36305.3
20	0.9	38642.0	38802.9	36133.3	32708.2	96.4	100.6	44302.0
21	1.4	35130.4	42117.9	34893.6	37720.6	86.0	85.5	35430.2
22	0.7	40014.5	35264.6	42136.9	40827.5	93.4	104.0	41207.4
23	1.3	31380.1	34189.9	35943.5	36134.8	80.2	99.8	40369.2
24	1.0	38130.8	39181.7	31839.6	40690.8	86.4	97.8	36648.7
25	0.6	39002.4	30136.5	39449.0	37194.1	89.9	96.0	31306.4
26	0.9	32788.5	36898.0	36725.6	31325.0	79.5	98.4	38124.8
27	1.0	37209.7	37702.5	41475.3	37338.8	82.1	107.9	40956.9
28	1.7	35389.0	33262.5	36903.8	38754.3	93.7	88.4	32089.1
29	1.2	34125.7	42184.1	38726.9	36802.4	102.3	97.6	32408.3

El resultado de emisiones de carbono óptimas y costos de la configuración, así como fábricas y centros de distribución aparecen en el Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Resultado de la simulación al variar algunos costos de la cadena

Simulación	Fábrica 1 F1	Fábrica 2 F2	Centro 3 CD3	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Costos (\$)
1	0	1	0	48261.6	748256.1
2	0	1	0	48261.6	743433.2
3	0	1	0	48261.6	752963.9
4	0	1	0	48261.6	753084.5
5	0	1	0	48261.6	746667.9
6	0	1	0	48261.6	749832.5
7	1	0	0	48480.2	763978.9
8	0	1	0	48261.6	766418.0
9	1	0	0	48480.2	757838.0
10	1	0	0	48480.2	765151.4
11	0	1	0	48261.6	760111.1
12	1	0	0	48480.2	758308.8
13	0	1	0	48261.6	754931.6
14	1	0	0	48480.2	752748.1
15	1	0	0	48480.2	761810.5
16	0	1	0	48261.6	750836.2
17	1	0	0	48480.2	751983.2
18	0	1	0	48261.6	754901.2
19	0	1	0	48261.6	754323.8
20	0	1	0	48261.6	752159.6
21	1	0	0	48480.2	761827.9
22	0	1	0	48261.6	744740.4
23	1	0	0	48480.2	755562.9
24	1	0	0	48480.2	755646.2
25	0	1	0	48261.6	737790.9
26	1	0	0	48480.2	746034.2
27	0	1	0	48261.6	754364.0
28	0	1	0	48261.6	765066.5
29	1	0	0	48480.2	754699.8

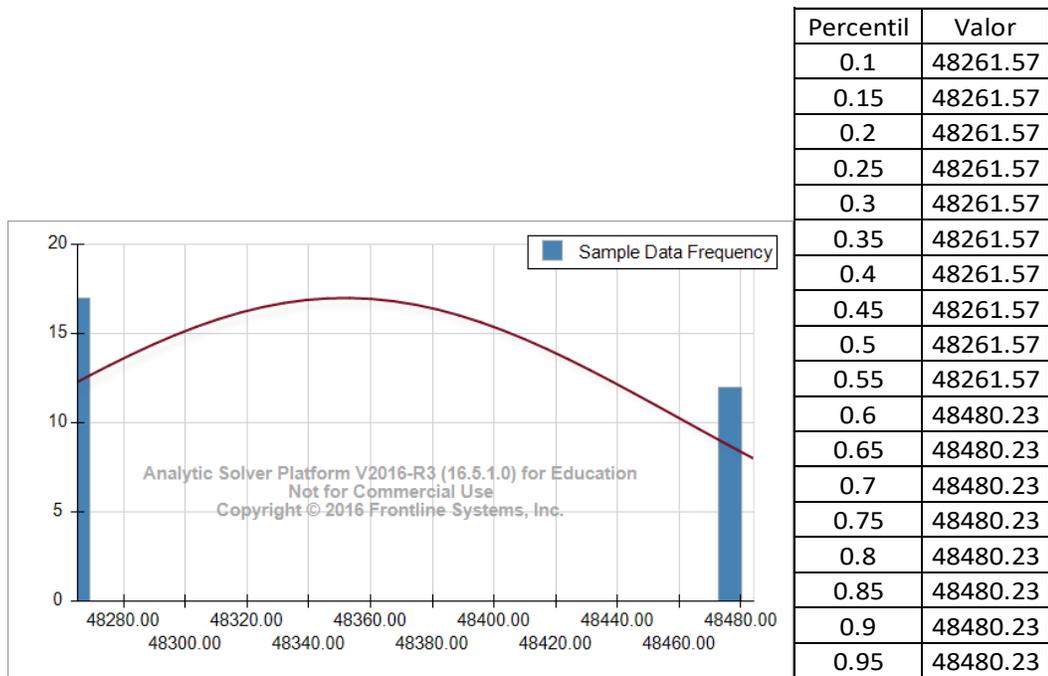
Las estadísticas de los costos y de las emisiones de carbono de la configuración para la optimización multiobjetivo según la simulación conducida son las siguientes:

**Cuadro 5. Estadísticas de la variación de costos simulada**

Estadística	Valores
<b>Promedio de emisiones (sin contar casos del extremo bajo)</b>	48352 kgCO <sub>2</sub> e
<b>Desviación estándar de las emisiones</b>	107.7 kgCO <sub>2</sub> e
<b>Promedio de los costos</b>	\$754326.6
<b>Desviación estándar de los costos</b>	\$6814.4
<b>Desvió promedio de la meta de costos</b>	\$23327.6
<b>Desviación promedio de la meta de emisiones</b>	1496.6 kgCO <sub>2</sub> e
<b>Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbono promedio de la configuración</b>	48312.9 a 48391.3 kgCO <sub>2</sub> e
<b>Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbono promedio de la configuración</b>	\$751846.4 a \$756806.8

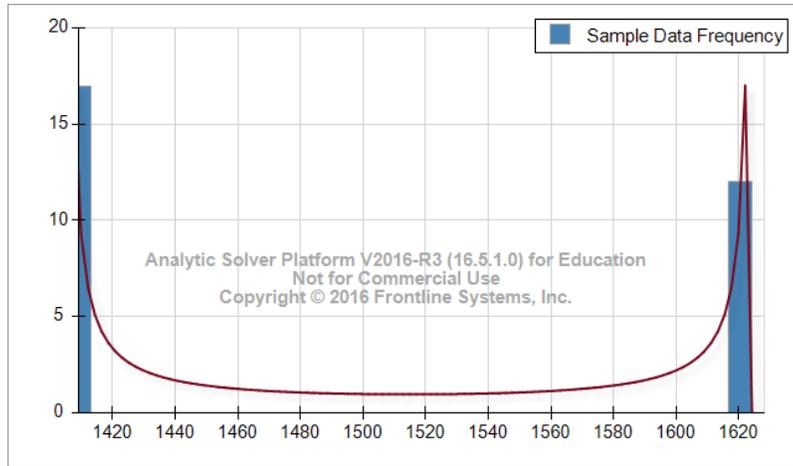
El error en el valor promedio de las emisiones de carbono estimado a partir de la simulación es de 490 kgCO<sub>2</sub>e, o bien, de 0,5 kgCO<sub>2</sub>e, el cual se puede considerar aceptable al revisar que el indicador de emisiones para la producción del periodo, que sería de 193.4 kgCO<sub>2</sub>e o 0.193 tCO<sub>2</sub>e tiene un error de  $\pm 1.96$  kgCO<sub>2</sub>e, o bien,  $\pm 0.002$  t tCO<sub>2</sub>e.

El comportamiento de las emisiones de carbono para la simulación optimizando por metas los costos y las emisiones de la configuración se presenta en la Figura 1. Este comportamiento de acuerdo con la prueba Kolgomorov tiene una distribución de probabilidad Log Normal.



**Figura 1.** Comportamiento de las emisiones de carbono en la simulación

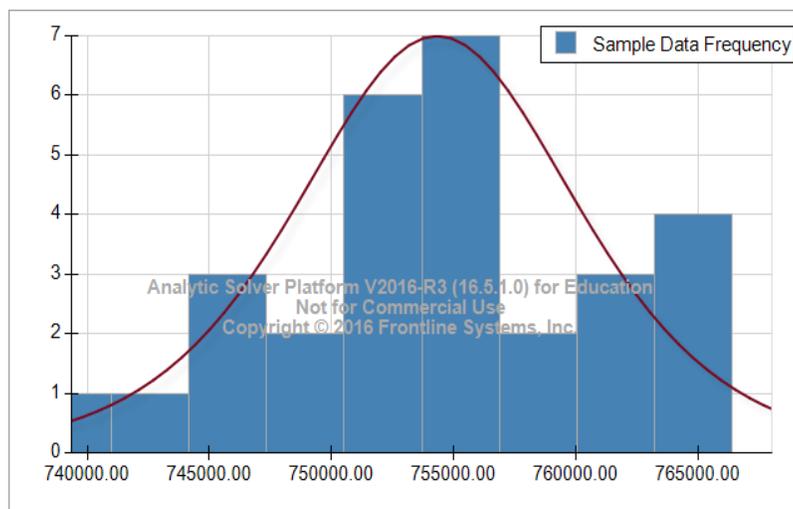
El comportamiento de los desvíos de la meta de emisiones para la optimización por metas presenta un comportamiento de distribución Log Logistic como se muestra en la Figura 2.



Percentil	Valor
0.1	1405.6
0.15	1405.6
0.2	1405.6
0.25	1405.6
0.3	1405.6
0.35	1405.6
0.4	1405.6
0.45	1405.6
0.5	1405.6
0.55	1405.6
0.6	1624.2
0.65	1624.2
0.7	1624.2
0.75	1624.2
0.8	1624.2
0.85	1624.2
0.9	1624.2
0.95	1624.2

**Figura 2.** Comportamiento de los desvíos de la meta de emisiones de carbono

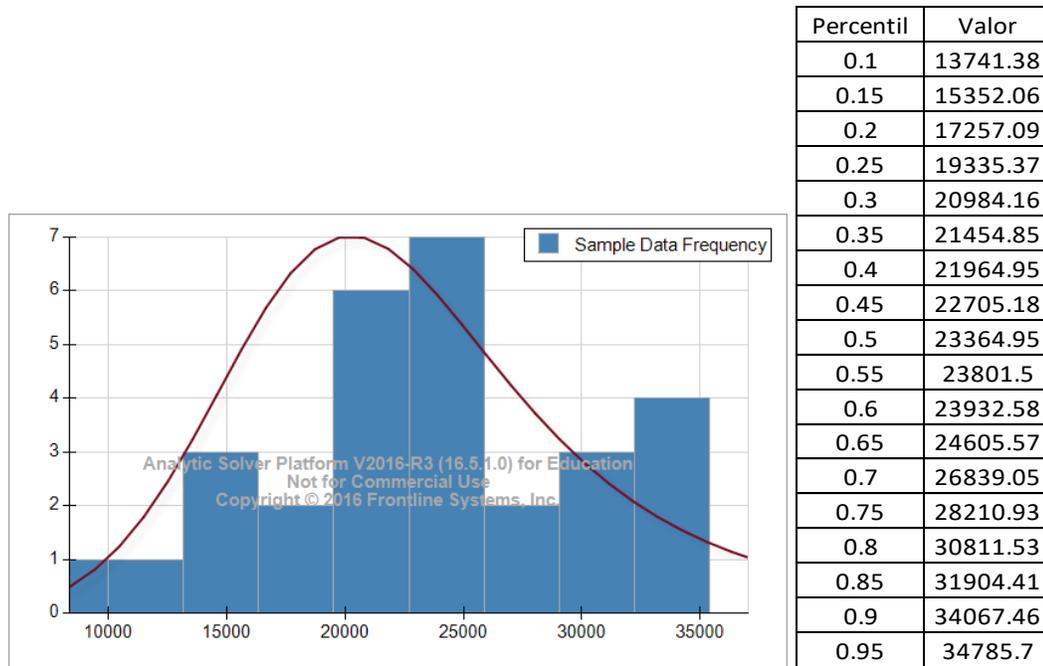
El comportamiento de los costos en la simulación de la optimización por metas se presenta en la Figura 3. De acuerdo con la prueba Kolmogorov, tiene una distribución de probabilidad Logística.



Percentil	Valor
0.1	744740.4
0.15	746351.1
0.2	748256.1
0.25	750334.4
0.3	751983.2
0.35	752453.8
0.4	752963.9
0.45	753704.2
0.5	754364
0.55	754800.5
0.6	754931.6
0.65	755604.6
0.7	757838
0.75	759209.9
0.8	761810.5
0.85	762903.4
0.9	765066.5
0.95	765784.7

**Figura 3.** Comportamiento de los costos en la simulación

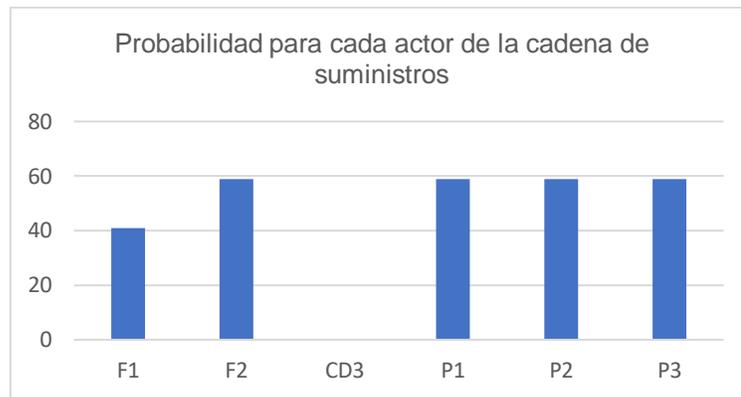
Los desvíos de la meta de costos resultantes en la optimización por metas presentan un comportamiento de distribución Log Logistic, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Comportamiento de los desvíos en la meta de costos

1. Efecto de la variabilidad de los parámetros de entrada simulados sobre la configuración óptima de la cadena de suministros

Los análisis anteriores permiten determinar el efecto que tiene la variabilidad en los parámetros analizados sobre la configuración óptima. Es de interés identificar la probabilidad de mantenerse que tienen las fábricas y centros de distribución propuestos en la configuración óptima encontrada en el capítulo IV, el de los resultados, para la optimización multiobjetivo por metas de los costos y emisiones de la cadena de suministros. En la Figura 5, se muestra la probabilidad de mantenerse de las fábricas, del centro de distribución 3 y de la selección de proveedores.



**Figura 5.** Probabilidad de que cada actor se mantenga en la configuración de la cadena de suministros según la simulación

En resumen:

La fábrica 2 se presenta con una probabilidad de 59%.

La fábrica 1 se escoge el 41% de las veces (\*)

El proveedor 1 (P 1) se escoge el 59% de las veces para suministrar el material 1 a la fábrica 2.

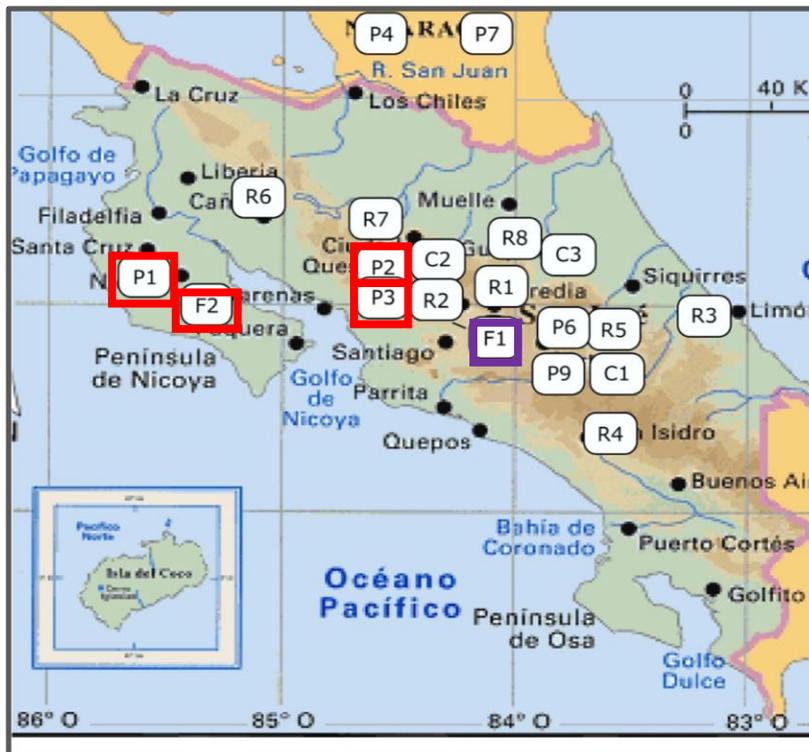
El proveedor 1 (P 2) se escoge el 59% de las veces para suministrar material 2 a la fábrica 2.

El proveedor 1 (P3) se escoge el 59% de las veces para suministrar material 3 a la fábrica 2.

El CD 3 en ningún momento se escoge para operar.

La fábrica 1 operó cuando su costo fue menor que el costo de operar de la fábrica 2. En estas simulaciones, como se variaron los costos fijos de ambas fábricas, se presentó la dicha situación. En el caso base, se habían considerado los costos iguales. Por ende, es relevante que, aun variando los costos fijos de operar ambas simultáneamente, la mejor decisión es mayoritariamente ubicar a la fábrica 2 para operar y no a la fábrica 1. Este resultado corrobora la configuración que se había encontrado en el caso base presentado en el Capítulo IV, para la optimización por

metas de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros. En la Figura 6, se enmarcaron en color rojo los actores más seleccionados.



**Figura 6.** Actores seleccionados para la configuración de la cadena de suministros según la simulación.

Nota final: *Los análisis de esta sección se realizaron utilizando la plataforma de Análisis Avanzada: Analytic Solver de Frontline Systems®*

## **APÉNDICE 15**

**Simulación de las demandas de los clientes en la optimización de costos y de las emisiones de carbono de la cadena de suministros**

En el caso del estudio presentado en el capítulo de Resultados, se consideraron los valores de las demandas de los detallistas o clientes como valores conocidos y sin variación. En muchas ocasiones, el comportamiento de la demanda de los clientes es variable y, como mucho, se dispone de valores. Al ser las demandas de los clientes un parámetro influyente para la configuración de la cadena de suministros, surge la duda sobre si se mantendría o no la configuración óptima encontrada para esta. Para analizar la robustez de la configuración propuesta incorporando la variación de las demandas de los clientes, se condujo una simulación Montecarlo. En la revisión de literatura, se encontró que la variabilidad de la demanda de los clientes ha sido un parámetro incorporado en estos análisis. Altmann y Bogaschewsky (2014), Gao y Ryan (2013) y Wang *et al.* (2013) analizaron el efecto de la incertidumbre en las demandas de los clientes en la configuración óptima.

La simulación conducida requirió la generación de las demandas de los clientes bajo una distribución de probabilidad triangular. Esta última se seleccionó por ser la más adecuada para aproximar casos en los que los datos reales no son bien conocidos. La distribución triangular trabaja con el valor medio como más probable. Para la simulación, el valor medio de demanda de cada cliente fue el valor de demanda del caso base presentado en el Capítulo IV. Además, se añadieron valores máximos y mínimos esperados para la demanda de cada cliente, con un rango de variabilidad de  $\pm 20\%$  sobre el valor más probable.

De esta forma, los siguientes valores mínimos, máximos y más probables se aplicaron a las demandas de los clientes (en toneladas para el periodo):

**Cuadro 1.** Valores mínimos, máximos y más probables de las demandas de los clientes.

Parámetro	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5	Cliente 6	Cliente 7	Cliente 8
Valor más probable	100	40	25	20	18	15	15	17
Mínimo	80	32	20	16	14	12	12	14
Máximo	120	48	30	24	22	18	18	20

La simulación se condujo para las opciones de optimización de las emisiones de carbono de la configuración, de optimización de los costos y de optimización multiobjetivo, por metas para los costos y las emisiones de carbono.

1. Simulación Montecarlo de las demandas para la opción de optimización de las emisiones de carbono

Primero, se investigó simulando 10 combinaciones aleatorias de los parámetros indicados. Para mejorar la precisión, se aumentó la cantidad, por lo que posteriormente se condujeron más simulaciones, hasta completar un total de 28 combinaciones de los parámetros. Los resultados de emisiones de carbono óptimas de la configuración, así como los costos, la participación de fábricas y centros de distribución para cada simulación se evidencian en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Resultados de la simulación variando las demandas de los clientes

Simulación	F1	F2	CD3	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Costos (\$)
1	1	1	1	43361.0	782227.7
2	1	1	1	45687.8	819122.1
3	1	1	1	47611.7	847783.5
4	1	1	1	47872.4	850829.0
5	1	1	1	44423.6	799214.6
6	1	1	1	47471.0	847529.1
7	1	1	1	45331.6	813481.8
8	1	1	1	45739.7	819239.0
9	1	1	1	45684.1	819148.8
10	1	1	1	46108.4	824961.8
11	1	1	1	45422.7	813619.4
12	1	1	1	48080.4	856147.6
13	1	1	1	45968.1	822202.1
14	1	1	1	44084.0	793549.8
15	1	1	1	45553.7	816397.6
16	1	1	1	44769.6	804857.6
17	1	1	1	44567.1	801987.5
18	1	1	1	47836.6	850750.4
19	1	1	1	48531.7	862078.8
20	1	1	1	44478.6	799387.4
21	1	1	1	46972.5	839077.5
22	1	1	1	47865.2	853313.8
23	1	1	1	48508.6	862019.6
24	1	1	1	46536.9	830781.6
25	1	1	1	46527.0	830800.9
26	1	1	1	44602.0	802040.7
27	1	1	1	48533.6	862058.7
28	1	1	1	49953.3	884791.5

Como se puede ver, la configuración óptima en cada corrida de simulación fue la misma que la obtenida en los resultados en el Capítulo IV para la optimización de las emisiones. Sin embargo, concretamente el valor de emisiones de carbono y de costos de cada corrida se modifica de acuerdo con la variación de las demandas de los clientes.

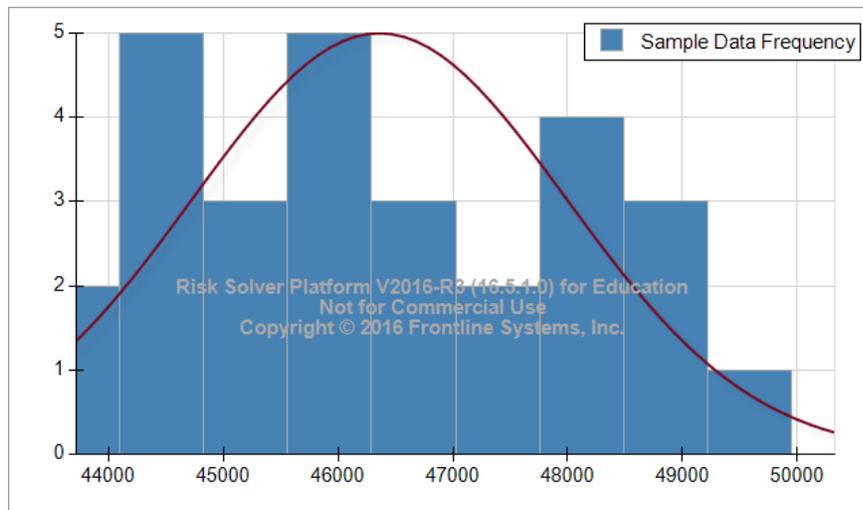
Las estadísticas de las emisiones de carbono de las 28 simulaciones de demandas de los detallistas (clientes) son las que se observan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Estadísticas de la simulación de demandas de los clientes

Estadística	Valores
Promedio	46360.1 kgCO <sub>2</sub> e
Desviación estándar	1658.8 kgCO <sub>2</sub> e
Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbón promedio de la configuración al optimizarlas	45745.6 a 46974.5 kgCO <sub>2</sub> e

El error en la estimación del promedio de emisiones de carbono es de 600 unidades, o bien, 600 kgCO<sub>2</sub>e o 0.6 tCO<sub>2</sub>e. Esto se considera aceptable, pues para la estimación de emisiones de la producción, 250 toneladas, estas serían de 185,4 kgCO<sub>2</sub>e e implicaría un error de 3 kgCO<sub>2</sub>e, es decir, rondaría entre 182.4 y 188.4 kgCO<sub>2</sub>e.

El comportamiento de las emisiones de carbono óptimas de la simulación de acuerdo con una prueba Kolgomorov es de distribución de probabilidad normal, como se presenta en la Figura 1:



**Figura 1.** Comportamiento de las emisiones de carbono óptimas de la simulación

De acuerdo con la optimización de emisiones de carbono del caso de estudio, expuesto en el Capítulo IV, el valor mínimo de emisiones de carbono para la configuración de la cadena de suministros es de 46855 kgCO<sub>2</sub>e. En la simulación de demandas, 19 datos de los 28 datos calculados, 68%, presentaron un monto menor, mientras que un 32% lo superó.

## 2. Simulación Montecarlo de las demandas para la opción de optimización de los costos de la configuración

Para esta opción, también se simularon preliminarmente 10 combinaciones aleatorias de los parámetros antes indicados. Sin embargo, para reducir el error se después se condujeron más simulaciones, hasta completar un total de 28 combinaciones de los parámetros indicados. El resultado de los costos óptimos de la configuración, así como las emisiones, participación de las fábricas y los centros de distribución son los que se muestran en el Cuadro 4:

**Cuadro 4.** Resultado de la simulación en la optimización de los costos al variar las demandas

Simulación	F1	F2	CD3	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Costos (\$)
1	1	0	0	81871.0	681496.7
2	1	0	0	86353.5	717363.9
3	1	0	0	89737.2	744850.8
4	1	0	0	90433.2	748173.7
5	1	0	0	83967.3	698094.9
6	1	0	0	89835.0	745007.8
7	1	0	0	85812.5	712084.5
8	1	0	0	86376.7	717401.2
9	1	0	0	86415.0	717462.6
10	1	0	0	87047.2	722888.6
11	1	0	0	85827.8	712109.1
12	1	0	0	90762.2	753112.8
13	1	0	0	86805.5	720295.0
14	1	0	0	83202.6	692456.3
15	1	0	0	86007.8	714603.5
16	1	0	0	84586.2	703499.4
17	1	0	0	84275.6	700795.4
18	1	0	0	90255.2	747887.9
19	1	0	0	91699.9	759029.0
20	1	0	0	83926.7	698029.7
21	1	0	0	88703.2	736574.4
22	1	0	0	90554.5	750573.8
23	1	0	0	91628.4	758914.3
24	1	0	0	87778.6	728473.7
25	1	0	0	87852.9	728593.0
26	1	0	0	84297.2	700830.0
27	1	0	0	91458.1	758640.9
28	1	0	0	94437.9	781068.3

Como se puede ver, la configuración óptima de cada corrida de simulación fue la misma que la obtenida en los resultados en el Capítulo IV para la optimización de los costos. Sin embargo, los costos y las emisiones de carbono de cada corrida se modificaron según la variación de las demandas de los clientes.

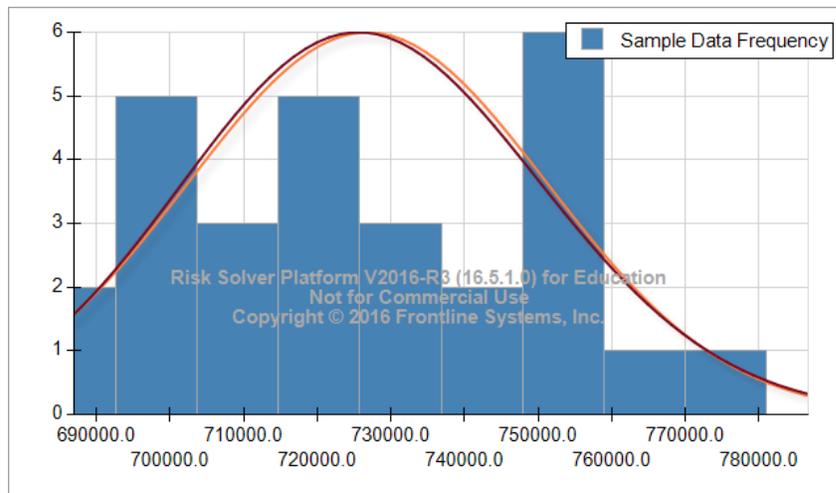
Las estadísticas de los costos de la configuración de acuerdo con las 28 simulaciones de demanda de los detallistas son las que se muestran en el siguiente cuadro.

**Cuadro 5.** Estadísticas de la simulación de demandas

Estadística	Valores
Promedio	\$726796.8
Desviación estándar	\$24815.9
Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbón promedio de la configuración al optimizarlas	\$717604.9 a \$735988.8

El error de estimación del valor promedio de los costos de la configuración para la producción es de 9100 unidades, eso es que el costo se ubica entre \$717696.8 a \$735896.8 para el periodo. Para la producción, se tiene una estimación de \$2907 con un error de \$36; este, se considera aceptable.

El comportamiento de los costos óptimos de acuerdo con una prueba de Kolgomorov es Inversa Gaussiana, como se presenta en la Figura 2 con la curva azul. Por su parte, la anaranjada aproxima la distribución de los costos a la de probabilidad normal que se ajusta bien.



**Figura 2.** Comportamiento de los costos óptimos según la simulación.

En la optimización de los costos presentada en el Capítulo IV, el valor mínimo de costos de la configuración de la cadena de suministros del caso de estudio es de \$730998. En la simulación de demandas de los clientes, 17 veces, un 61%, se obtuvieron costos menores a este valor y 39% superiores.

3. Simulación Montecarlo de las demandas para la opción de optimización multiobjetivo por metas de las emisiones de carbono y de los costos de la configuración de la cadena de suministros

Para el análisis de la optimización de este tipo, se propuso como meta económica el mínimo obtenido en la optimización de los costos de la configuración, \$730998. La meta ambiental, emisiones de la configuración, fue la mínima encontrada al optimizarlas, 46856 kgCO<sub>2</sub>e. El resultado de fábricas y centros de distribución a operar, así como desvíos en las metas y valores finales que resultaron aparecen en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Resultados de la simulación**

Simulación	F1	F2	CD2	CD3	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e)	Desvió en emisiones	Costos (\$)	Desvió en costos
1	1	0	1	0	46856.0	0.0	704938.4	0.0
2	0	1	0	0	47023.1	167.1	739441.7	8442.7
3	0	1	0	0	49032.2	2176.2	768214.4	37215.4
4	0	1	0	0	49360.2	2504.2	771295.6	40296.6
5	1	0	1	0	46041.1	0.0	720141.1	0.0
6	0	1	0	0	48803.8	1947.8	767847.6	36848.6
7	0	1	0	0	46856.0	0.0	733784.0	2785.0
8	0	1	0	0	47123.5	267.5	739602.8	8603.8
9	0	1	0	0	47045.2	189.2	739477.2	8478.2
10	0	1	0	0	47523.9	667.9	745355.1	14356.1
11	0	1	0	0	46856.0	0.0	733950.8	2951.8
12	0	1	0	0	49404.7	2548.7	776476.5	45477.5
13	0	1	0	0	47404.1	548.1	742608.1	11609.1
14	1	0	1	0	45596.5	0.0	714317.4	0.0
15	0	1	0	0	46936.3	80.3	736747.7	5748.7
16	1	0	1	0	46339.9	0.0	725730.8	0.0
17	1	0	1	0	46189.4	0.0	722934.2	0.0
18	0	1	0	0	49287.6	2431.6	771179.2	40180.2
19	0	1	0	0	49987.6	3131.6	782521.8	51522.8
20	1	0	1	0	46000.5	0.0	720075.9	0.0
21	0	1	0	0	48342.8	1486.8	759443.4	28444.4
22	0	1	0	0	49237.3	2381.3	773653.1	42654.1
23	0	1	0	0	49934.5	3078.5	782436.5	51437.5
24	0	1	0	0	47996.6	1140.6	751223.5	20224.5
25	0	1	0	0	47978.1	1122.1	751193.8	20194.8
26	1	0	1	0	46856.0	0.0	723613.8	0.0
27	0	1	0	0	50003.8	3147.8	782547.9	51548.9
28	0	1	0	0	51402.7	4546.7	805231.4	74232.4

Como se puede ver, la configuración óptima de cada corrida de simulación cambió conforme variaron las demandas de los clientes. Cuando la demanda total fue baja, la configuración óptima escogió la fábrica 1 y operar el centro de distribución 2. Mientras que, al ser la demanda alta, la configuración fue la misma que la obtenida

en los resultados en el Capítulo IV para la optimización por metas de los dos objetivos, la cual se basó en la fábrica 2.

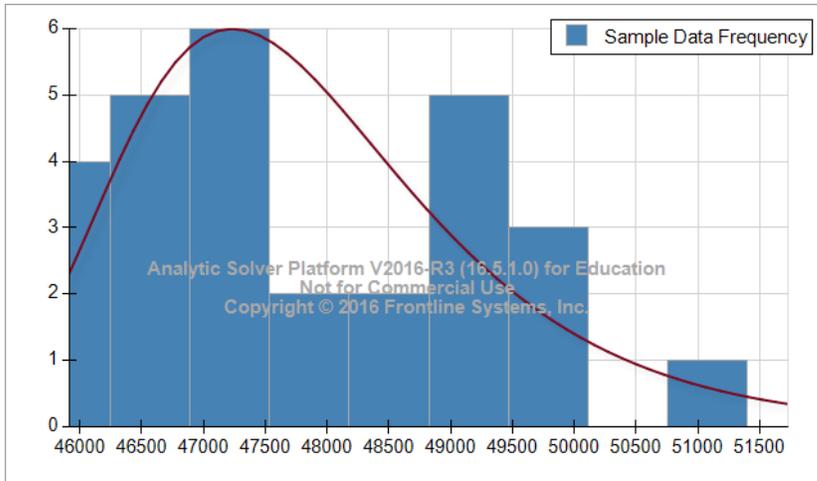
Las estadísticas de las emisiones de las 28 simulaciones de demanda de los detallistas son las siguientes:

**Cuadro 7. Estadísticas de las simulaciones de demanda**

Estadística	Valores
Promedio de emisiones (sin contar casos del extremo bajo)	48454 kgCO <sub>2</sub> e
Desviación estándar	1318 kgCO <sub>2</sub> e
Promedio de costos	\$759725
Desviación estándar	\$20299
Desvió de la meta de costos (promedio)	\$28726
Desviación de la meta de las emisiones (promedio)	1598 kgCO <sub>2</sub> e
Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbón promedio de la configuración al optimizarlas	47965 a 48343 kgCO <sub>2</sub> e
Intervalo de confianza del 95% para las emisiones de carbón promedio de la configuración al optimizarlas	\$752206.1 a \$767243.9

El error en la estimación de las emisiones de carbono es de 490 unidades. Esto se considera aceptable, pues la variación en el indicador de emisiones de la producción sería de 1.96 kgCO<sub>2</sub>e.

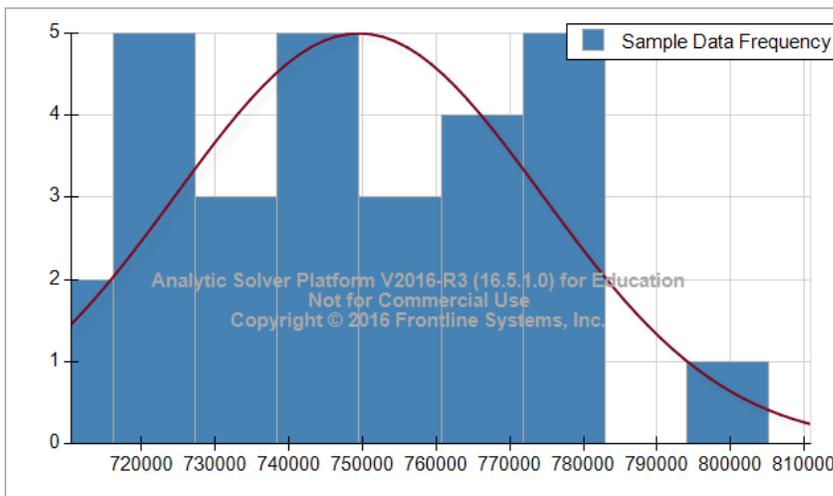
El comportamiento de las emisiones de carbono en la optimización por metas, de acuerdo con una prueba de Kolmogorov, corresponde a una distribución de probabilidad Max Extreme (Gumbel) como se presenta en la Figura 3:



Percentil	Valor
0.1	46037.05
0.15	46242.11
0.2	46752.79
0.25	46856
0.3	46856
0.35	46949.36
0.4	47036.34
0.45	47137.48
0.5	47463.98
0.55	47955.38
0.6	48135.06
0.65	48734.6
0.7	49093.74
0.75	49275.04
0.8	49369.07
0.85	49749.04
0.9	49989.22
0.95	50773.23

**Figura 3.** Comportamiento de las emisiones de carbono según la simulación

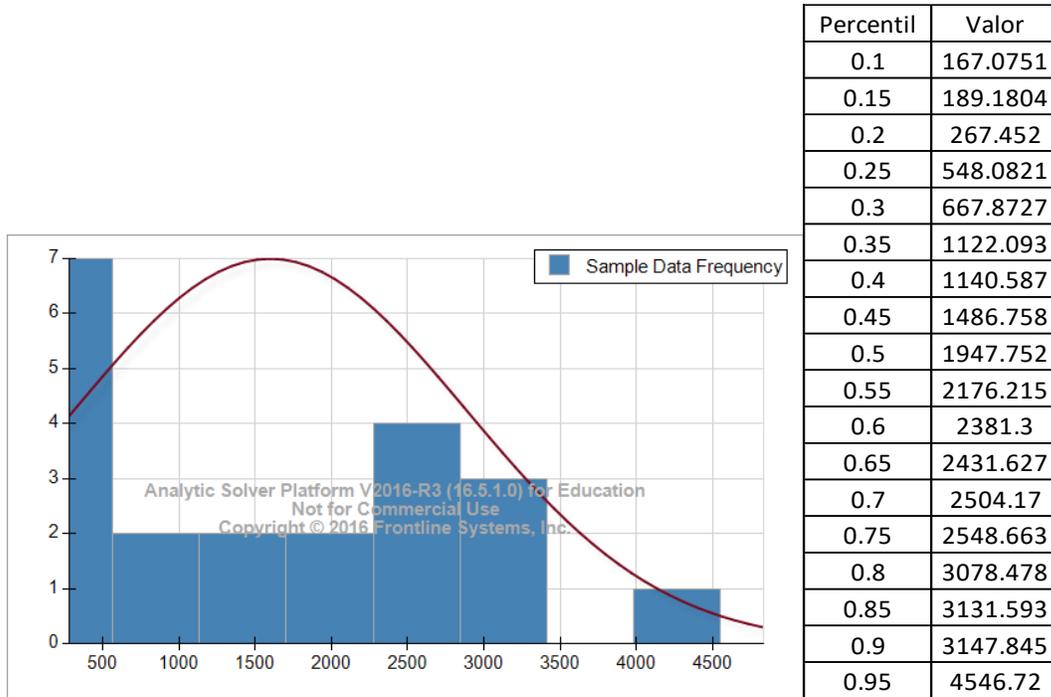
El comportamiento de los costos de la configuración en la optimización por metas, de acuerdo con una prueba de Kolmogorov, corresponde a una distribución de probabilidad normal, tal cual se observa en la Figura 4:



Percentil	Valor
0.1	719500
0.15	721118.7
0.2	723477.9
0.25	727744.1
0.3	733900.8
0.35	737151.8
0.4	739463
0.45	739753.1
0.5	743981.6
0.55	750901.8
0.6	754511.4
0.65	766587
0.7	769103.8
0.75	771266.5
0.8	774217.8
0.85	780350.5
0.9	782524.4
0.95	795023.8

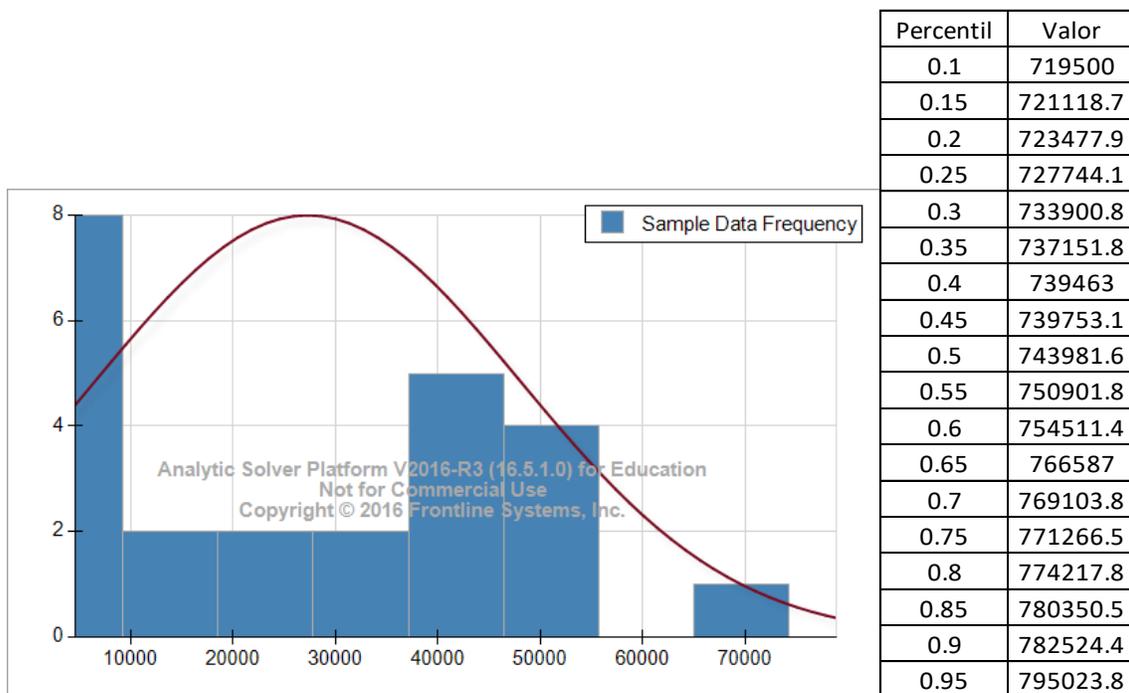
**Figura 4.** Comportamiento de los costos de la configuración según la simulación

Los desvíos de la meta de emisiones, de acuerdo con una prueba Kolgomorov, tienen un comportamiento de distribución normal, como lo muestra la Figura 5.



**Figura 5.** Comportamiento de los desvíos en la meta de emisiones

Los desvíos de la meta de costos, de acuerdo con una prueba Kolgomorov, tienen un comportamiento de distribución normal. Esto se puede ver en la Figura 6.



**Figura 6.** Comportamiento de los desvíos en la simulación

4. Efecto de la variabilidad en las demandas de los clientes sobre la configuración óptima de la cadena de suministros

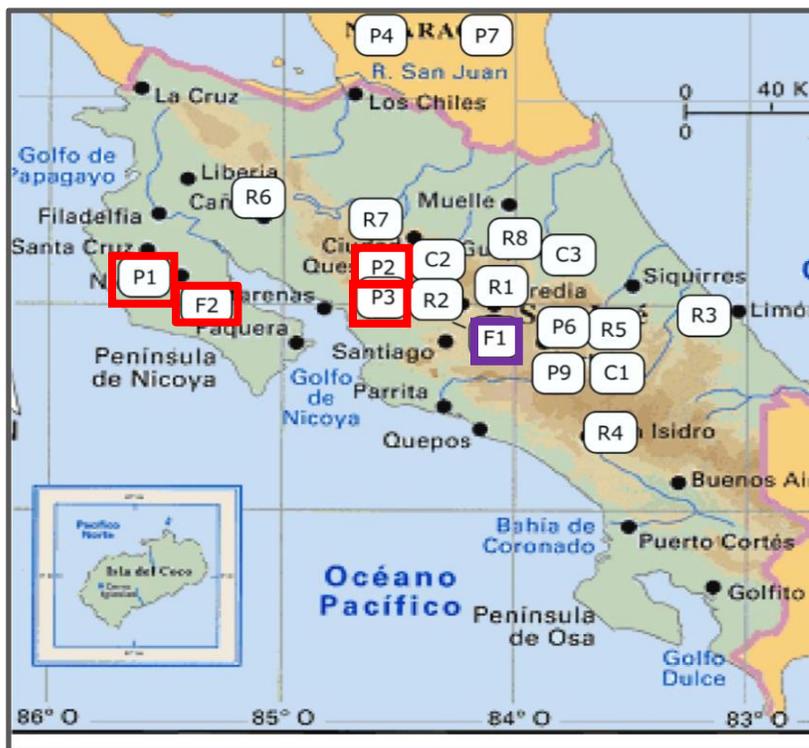
Como se señaló al inicio, es relevante determinar la probabilidad de que se mantenga la configuración óptima encontrada para la cadena de suministros en el caso base, presentado en el Capítulo IV, para la optimización multiobjetivo por metas. Esto corresponde a precisar qué tan robustos son los resultados. La simulación de la variación en las demandas de los clientes en la optimización por metas de los costos y de las emisiones de carbono de la cadena tuvo los siguientes resultados de probabilidad de selección de cada actor, proveedores, fábricas y centros de distribución:

- La fábrica 2 se escoge el 75% de las veces.
- La fábrica 1 se escoge el 25% de las veces (cuando la variabilidad de la demanda fue menor a la media propuesta en el caso base).

- El CD 3 no se escoge operar.
- El proveedor 1 (P1) se escoge el 75% de las veces para suministrar el material 1 a la fábrica 2.
- El proveedor 1 (P2) se escoge el 75% de las veces para suministrar material 2 a la fábrica 2.
- El proveedor 1 (P3) se escoge el 75% de las veces para suministrar material 3 a la fábrica 2.

Por lo tanto, la simulación corrobora la robustez de la configuración encontrada en el Capítulo IV para el caso base: la fábrica 2 es la que opera.

En el siguiente mapa, se enmarca en color rojo los actores seleccionados para la configuración óptima de la cadena de suministros.



**Figura 7.** Actores seleccionados para la configuración de la cadena de suministros  
 Nota final: Los análisis de esta sección se realizaron utilizando la plataforma de Analítica Avanzada: Analytic Solver de Frontline Systems® en Microsoft Excel®.