



Una formación de calidad  
en ingeniería para el futuro

Centro de Convenciones Cartagena de Indias  
15 al 18 de Septiembre de 2015

# **OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PALMA DE ACEITE EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER Y SUR DEL CESAR**

**María Teresa Castañeda Galvis, Nelson Enrique Moreno Gómez, Jesús Andrés Abril  
Cantero**

**Universidad Pontificia Bolivariana  
Bucaramanga, Colombia**

**Rafael Guillermo García Cáceres  
Universitaria Agustiniana  
Bogotá, Colombia**

**Óscar Orlando Ortiz Rodríguez**

**Universidad de Pamplona  
Pamplona, Colombia**

## **Resumen**

El estudio de las cadenas de abastecimiento de productos agrícolas o sus derivados merece mayor atención debido a que el diseño y operación de éstas está siendo objeto de estricta reglamentación y supervisión dada su relación con productos destinados al consumo humano. Para hacer frente a estos nuevos desafíos, es necesario revisar con mirada crítica al estado actual de la misma y a las herramientas que determinan las estrategias para competir dadas las nuevas condiciones del mercado mundial. Un caso concreto es la cadena de abastecimiento de biocombustibles cuya materia prima son los aceites vegetales. Esta cadena tiene dos actores importantes: los aceites vegetales en especial el aceite de palma, por cuanto su implementación podría implicar una ventaja competitiva para un país como Colombia que se clasifica como el quinto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América; y los biocombustibles, cuyo consumo paulatinamente entra a hacer parte de la cultura mundial dados sus efectos favorables en la reducción de sustancias contaminantes y la disminución de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global. El proceso de optimización se desarrolla en cuatro fases, en la primera fase se realiza la concepción teórica de la cadena de abastecimiento, en la

segunda se detalla cada uno de los eslabones y procesos en busca de relaciones, en la tercera se presenta el diseño e implementación del modelo de optimización, finalmente se llevará a cabo un análisis del ciclo de vida de la industria.

**Palabras clave:** optimización; cadena de abastecimiento; biodiesel

### **Abstract**

*The study of supply chains of agricultural products or their derivatives deserves more attention due to its design and operation is under strict regulation and supervision as it relates to products intended for human consumption. To address these new challenges, it is necessary to take a critical view of its current state and the tools that are used to determine the strategies to compete under the new conditions of the global market. An example of this is biofuels' supply chain which raw materials are vegetable oils. This supply chain has two major products: vegetable oils especially palm oil, as its implementation would mean a competitive advantage for a country like Colombia that ranks as the fifth largest producer of palm oil in the world and first in Latin; and biofuels, which consumption gradually has become part of world culture given its positive effects in reducing pollutants and greenhouse gases responsible for global warming. The optimization process takes place in four phases, the first phase involves the theoretical concept of the supply chain, in the second one each of the links and processes are detailed looking for relationships that may take place, in the third part the optimization model design and implementation is presented, finally a life cycle analysis of the industry is executed.*

**Keywords:** optimization; supply chain; biodiesel

## **1. Introducción**

En Colombia, a diferencia de los países líderes de la agroindustria de la palma, el costo de la mano de obra es elevado, participa con el 25,5% de los costos de la fase de cultivo. Cabe aclarar que buena parte de ese costo, el 60% es consecuencia de las labores de cosecha. Por su parte, el transporte de los racimos de fruta fresca (RFF) tiene una participación del 5% en los costos de producción del aceite crudo de palma (ACP). Sin embargo, la interrelación del transporte con la cosecha y la extracción de aceite en la planta de beneficio, lo puede llevar a afectar un 37% adicional del costo de producción (16% de la cosecha y 21% de la extracción), a lo que se le debe sumar las pérdidas por calidad de fruto (Duarte Guterman & Cía. Ltda., 2009).

Las herramientas de optimización como soporte a la toma de decisiones pueden ser aplicadas en el largo, mediano y corto plazo, dependiendo de si se utilizan para la planeación estratégica, táctica u operacional, respectivamente (Ahumada & Villalobos, 2009). Harrison, Lee, & Neale (2004) afirman que las decisiones estratégicas son las más importantes, sin embargo, éstas deben estar acompañadas por una

apropiada planeación táctica y operativa, para evitar que se incurra en sobrecostos por una deficiente utilización de los recursos.

El proyecto incluye una caracterización detallada de la cadena de abastecimiento del biodiesel en el departamento de Santander y sur del Cesar, su optimización y Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la cual se hará a través de un modelo matemático que permita soportar, mejorar y facilitar los procesos de toma de decisiones a nivel táctico del sector industrial en estudio, en cuanto características de demanda y oferta, caracterización de entes logísticos y determinación del impacto ambiental y económico de los eslabones de la cadena.

## 2. Marco teórico

**Cadena de abastecimiento:** hace referencia a las funciones y procesos a través de los cuales se transforma la materia prima y los recursos naturales en productos o servicios, se entregan y se consumen; las funciones a las que se hace referencia son las áreas que tienen una relación directa con alguna parte de la cadena de suministro y los procesos son el conjunto de actividades que cubren las necesidades que se presentan en la cadena de suministro (Ballou, 2004).

**Logística:** de acuerdo con Ballou (2004) agrega valor a los productos o servicios esenciales para la satisfacción del cliente a través de la dirección coordinada de actividades relacionadas. Consiste en la administración de la cadena de suministro, que a su vez consiste en el conjunto de actividades encargadas o que se encuentran en relación con el flujo y transformación de productos desde la extracción de la materia prima hasta su comercialización, y de los flujos de información.

**Palma de aceite:** (*elaeis guineensis*) es una planta oleaginosa cuyo tallo puede alcanzar más de 30 metros de altura y produce racimos de frutos compactos que pueden pesar entre 10 y 40 kilogramos. Se caracteriza por ser la oleaginosa más productiva del planeta: en promedio, una hectárea sembrada produce entre seis y diez veces más aceite que otras. Aunque la vida productiva de la palma es mayor a cincuenta años, la altura que alcanza a los 20 ó 25 años dificulta las labores de cosecha, lo cual indica el comienzo de la renovación en las plantaciones comerciales (Superintendencia de Industria y Comercio, 2011).

Con el fruto producido por la palma de aceite se puede extraer una gran cantidad de productos, sin embargo los principales son: dos tipos de aceite (el aceite de palma que posteriormente es utilizado para el biodiesel y el aceite de palmiste), y la torta de palmiste; de estos tres productos se derivan un gran número de subproductos como la oleína y estearina, la primera utilizada para alimentos y la segunda para aseo (Mingorance, Minelli, & Le Du, 2004).

**Biodiesel:** según Méndez (2008), es el nombre que reciben los compuestos procedentes de aceites vegetales o grasas animales, que pueden ser usados como combustible en motores de presión por ignición o en cualquier maquinaria con motor diésel. En la

producción de biodiesel es necesario elaborar una mezcla de aceite vegetal o grasa animal con un alcohol y un catalizador, a este proceso se le conoce como transesterificación, proceso del cual también resulta glicerina.

**Análisis del ciclo de vida:** el enfoque de ciclo de vida o análisis de la cuna a la tumba, se constituye en una herramienta de diseño que investiga y evalúa los aspectos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia (Secretaría distrital de ambiente, 2015).

### 3. Materiales y métodos

**Fase 1:** concepción teórica de la cadena de abastecimiento de biodiesel en Santander y Sur del Cesar. En la primera fase se partirá del análisis y estudio de la literatura sobre caracterización y conformación de cadenas de abastecimiento agrícolas, así como visitas a plantaciones de palma y extracción de la región objeto de estudio. De este análisis y estudio se obtendrá la caracterización de la cadena de abastecimiento del biodiesel en Santander y Sur del Cesar. Resultado del análisis anterior se determinarán los actores que inciden de manera directa e indirecta en el desempeño de la cadena.

**Fase 2:** diseño detallado de la cadena de abastecimiento de biodiesel. Partiendo de la concepción teórica de la cadena, obtenida en la fase 1, se definirán los requerimientos operacionales dentro de los mismos, así mismo como los compromisos de cada uno de ellos para el adecuado desempeño e integración de la cadena. Al resultado de esta fase se llamará diseño detallado de la cadena de abastecimiento de biodiesel.

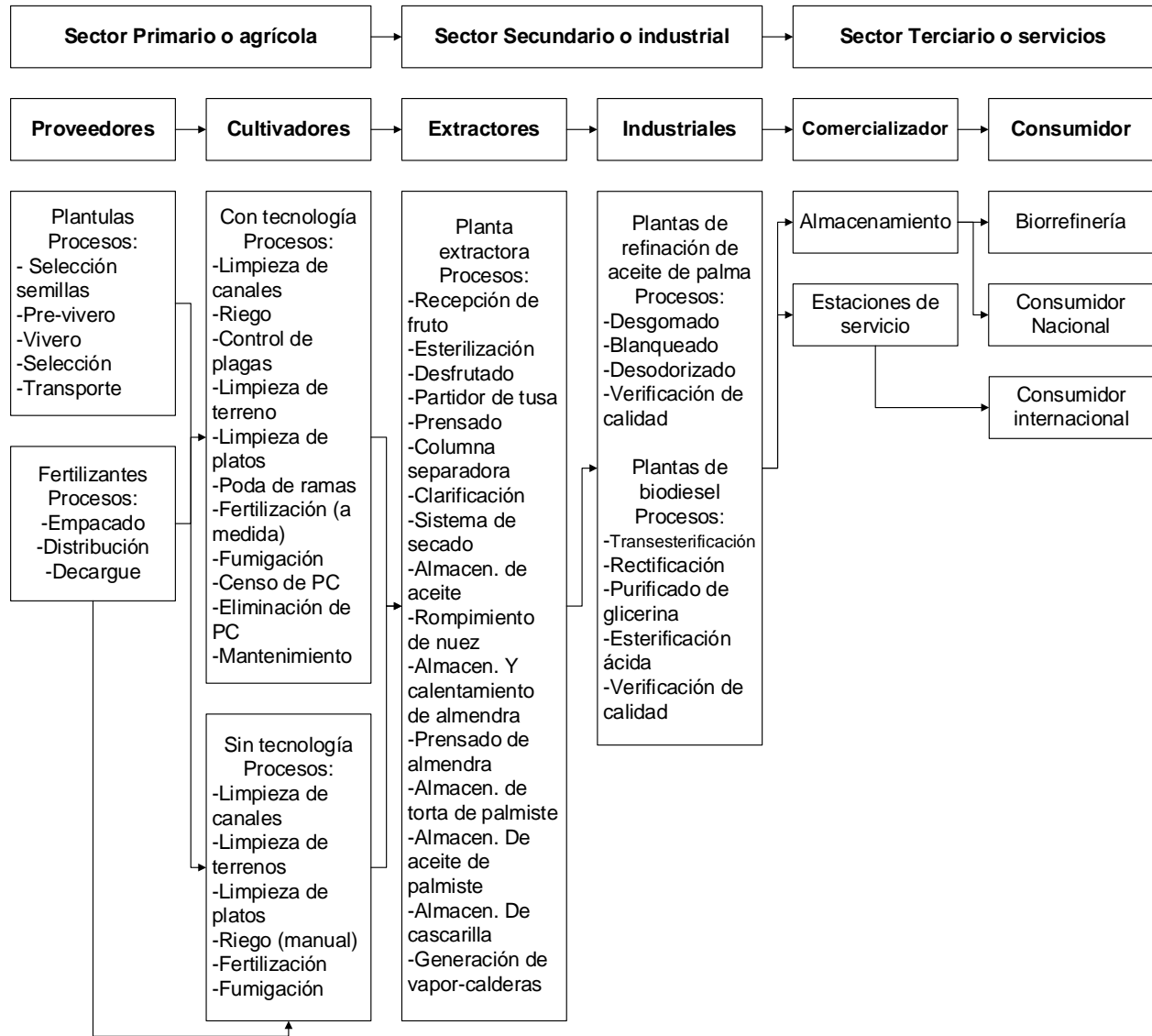
**Fase 3:** en esta fase se partirá del análisis y estudio de la literatura sobre modelos diseñados para cadenas de abastecimiento agrícolas. Una vez determinado el tipo de modelo a usar se definirán las diferentes partes del modelo: variables de decisión, función objetivo y restricciones a medir para los diferentes eslabones.

**Fase 4:** evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida del Biodiesel en Santander y Sur del Cesar a través de la Metodología Análisis de Ciclo de Vida ACV ISO 14040.

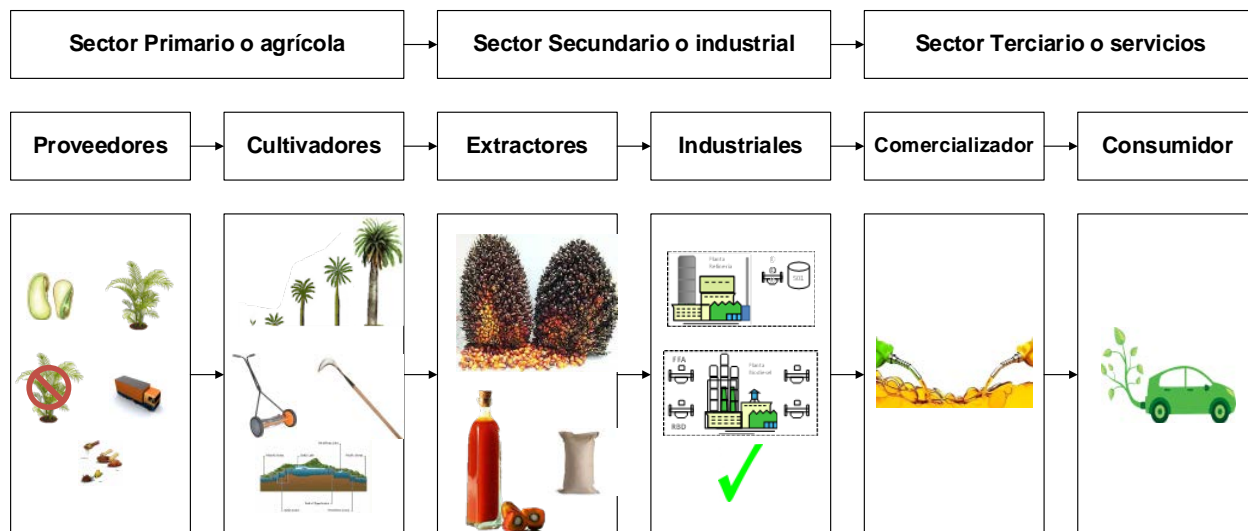
### 4. Resultados

**Fase 1:** en la cadena de abastecimiento del biodiesel se destacan los diferentes eslabones pertenecientes al proceso productivo, a la comercialización del biodiesel y a sus interacciones. Esta cadena productiva se divide en tres grandes sectores de la economía: el agrícola, el industrial y el de servicios; y cada uno de ellos se subdivide en otros eslabones los cuales conforman la totalidad de la cadena.

Ilustración 1 Cadena de abastecimiento del Biodiesel



Fuente: basado en (Gualteros Sánchez, 2011)



Fuente: basado en (Gualteros Sánchez, 2011)

De acuerdo con (Gualteros Sánchez, 2011), en Colombia las materias primas de biomasa son transportadas en la mayoría de los casos desde las fincas directamente a la refinería. Las materias primas de biomasa se convierten en productos terminados.

## Fase 2

Tabla 1 Diseño detallado de la cadena de abastecimiento del Biodiesel

Nodo de la cadena de abastecimiento	Requerimientos y compromisos
<b>Proveedores</b>	Los proveedores de semillas, plántulas y fertilizantes tienen el compromiso de llevar materias primas con las características solicitadas por cada uno de los cultivadores puesto que dadas las condiciones climáticas y del suelo, cada cultivo tiene requerimientos únicos.
<b>Cultivadores</b>	Los cultivadores tienen el compromiso de transportar fruto con las características óptimas para el proceso de extracción. Cuando el fruto está sin madurar o en contraste sobremaduro, la calidad del aceite de palma disminuye al pasar por los controles de la extractora.
<b>Extractores</b>	Tienen el compromiso de analizar y enviar aceite de palma a los industriales cumpliendo con la reglamentación y los parámetros solicitados por las plantas extractoras.
<b>Industriales</b>	Los industriales se comprometen a retirar a través de un pre-tratamiento los fosfolípidos y jabones así como blanquear y desodorizar el aceite de palma para posteriormente crear una mezcla de biodiesel de acuerdo con la reglamentación de la región y el país de destino para finalmente enviarlo a los comercializadores.
<b>Comercializador</b>	Los comercializadores se comprometen a realizar controles al producto recibido y calibrar constantemente la instrumentación utilizada en la cadena de custodia hacia los consumidores.
<b>Consumidor</b>	El consumidor se compromete a hacer un uso adecuado del biodiesel y cumplir con las normas en el manejo del mismo de acuerdo a su región o país.

Fuente: Autores

## Fase 3: Modelo matemático

### Variables de decisión

$p_k$ : Nivel de inventario del centro de acopio (CAI)  $k$  (mallas)

$w_{kl}$ : Cantidad de fruto transportado por los tractores que se mueven en el arco  $(k, l)$  (mallas)

$x_{ij}$ : Cantidad de cuadrillas que se mueven en el arco  $(i, j)$  (unidades)

$g_{ij}$ : Cantidad de fruto recolectado en el arco  $(i, j)$  (unidades)

$x_{ik}$ : Cantidad de cuadrillas que se mueven en el arco  $(i, k)$  (unidades)

$g_{ik}$ : Cantidad de fruto recolectado en el arco  $(i, k)$  (unidades)

$z_{kl}$ : Cantidad de tractores que se mueven en el arco  $(k, l)$  (unidades)

## Objetivos

Objetivo 1: La función objetivo minimiza los costos de operación de la actividad de recolección, entre los cuales se cuenta el costo del servicio incurrido por parte de las cuadrillas y los tractores y por el almacenamiento de fruto en los CAI.

Objetivo 2: La función objetivo minimiza los tiempos de operación de la actividad de recolección, entre los cuales se cuenta el tiempo de servicio por parte de las cuadrillas y los tractores y por el almacenamiento de fruto en los CAI.

## Restricciones

*Disponibilidad de flota*: relacionada con la disponibilidad de cuadrillas y tractores

*Recolección completa en arcos*: aseguran que el fruto de los arcos sea recolectado en su totalidad por la flota de cuadrillas.

*Acumulación de fruto*: registra la acumulación de fruto en los nodos recorridos por las cuadrillas.

*Balance de masa del fruto*: tanto para el balance de masa del fruto como en los acopios (CAI).

*Capacidad de inventario CAI*: establece que el nivel de inventario en los CAI no sobrepase su capacidad.

*Balance de flujo vehículos*: La restricción asegura que tanto las cuadrillas como el número de tractores que entran y salen de un nodo se conserve.

*Recolección completa en CAI's*: aseguran que la flota de tractores a utilizar recoja el fruto almacenado en cada CAI.

*Demanda*: asegura que la cantidad recolectada de fruto sea mayor o igual a la demanda ubicada en el nodo sumidero, asociado a la planta de extracción.

*Cotas de tiempo*: el tiempo estimado para realizar una operación logística de recolección o traslado no puede superar una cota establecida.

*No negatividad*: las variables pueden tomar valores de cero o superiores a este.

## Avance

En la actualidad y durante el segundo semestre del 2015 el modelo matemático será alimentado con datos obtenidos en dos unidades de observación: La Caica Ltda. y Promipalma S.A. adjuntas a la empresa Agroince Ltda. Y Cia. S.C.A. a través de un estudio de tiempos y movimientos en la integración de estos dos eslabones de la cadena de suministros.

Cabe resaltar que hasta el momento no se han aplicado modelos matemáticos para optimizar la cadena de abastecimiento de Biodiesel en Santander y sur del Cesar, por lo cual este proyecto se convierte en un elemento innovador en este campo del conocimiento haciéndolo crucial en el desarrollo de esta industrial en dichas regiones.

**Fase 4:** el biodiesel es un combustible renovable fabricado de aceite vegetal. El biodiesel es más ventajoso frente al diésel convencional, ya que no es tóxico, es biodegradable, no inflamable, económico y más seguro de manejar y utilizar. Conocer los parámetros y cada una de las etapas del proceso de obtención de biodiesel: esterificación, transesterificación, centrifugación, neutralización, lavado, purificación de glicerina y recuperación de metanol, son elementos esenciales para que una planta logre obtener altos rendimientos, amigables con el entorno y resultados financieros favorables al final de la operación.

Por lo tanto resultados aplicando la metodología medio ambiental del Análisis del Ciclo de Vida, norma internacional que sigue lineamientos de la ISO 14040 ha sido aplicada. Para la realización del inventario se tomaron dos tipos de fuentes: primarios y secundarios. La fuente primaria fue la adquisición de información directamente en la empresa soportada en documentación, y la adquirida en visualización de cada una de las etapas mediante visitas realizadas a la planta. Las fuentes secundarias fueron suministradas para proporcionar la información necesaria y elaborar el inventario tomada de Ecoinvent. Para el cálculo del perfil ambiental se validaron los datos en el software LCA-Data Manager.

Resultados del impacto ambiental ocasionado por la producción de biodiesel en el presente caso de estudio de acuerdo al calentamiento global, acidificación, toxicidad humana, eutrofización, destrucción capa de ozono, oxidación fotoquímica y agotamiento de recursos abióticos, permiten ver que el metanol es el insumo de mayor impacto. Por etapas se tiene que en la esterificación, transesterificación y purificación resultados obtenidos oscilan entre el 83%, 90% y 89%, respectivamente; seguido del magnesol con un porcentaje del 92% en la etapa de lavado. De igual manera, la electricidad impacto en un 62% durante la etapa de neutralización y 100% en la de centrifugación como único insumo empleado en esta etapa. Los insumos hidróxido de sodio y antioxidante son los productos que más bajo impacto generan durante el proceso de obtención de biodiesel.

## 5. Conclusiones

Hasta la fecha se ha desarrollado la fase 1 y 2 donde se muestra la relación entre los tres sectores de la economía a través de la cadena de abastecimiento. En ésta intervienen los proveedores de semillas, plántulas y fertilizantes para cultivadores con o sin tecnología, los extractores y plantas de transesterificación, así como los comercializadores y los consumidores finales a nivel nacional o internacional.

Además, el modelo matemático actualmente se alimenta de datos tomados periódicamente con base en las temporadas del cultivo de palma de aceite para



posteriormente definir un algoritmo personalizado de acuerdo con las características propias del terreno, cultivo y el transporte optimizando en el proceso la cadena de abastecimiento.

Así mismo, el Análisis del ciclo de vida (LCA) se alimenta de datos provenientes de los insumos y salidas a lo largo de la cadena de abastecimiento buscando cuantificar el impacto ambiental de la industria en la región.

## 6. Referencias

### Artículos de revistas

- García-Cáceres, R.G., Martínez, M.E., Palacios, F. (2015). Tactical optimization of the oil palm agribusiness supply chain. In press in Applied Mathematical Modelling. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.031>
- Duarte Guterman & Cía. Ltda. (2009). Actualización de costo de producción de aceite de palma. Bogotá: Fedepalma.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2011). Agroindustria de la palma africana: diagnóstico de libre competencia. Bogotá: SIC.

### Libros

- Ballou, R. H. (2004). Logística: administración de la cadena de suministro. México: Pearson Educación.
- Gualteros Sánchez, J. M. (2011). Estudio prospectivo de la cadena productiva del biodiesel a partir de palma africana en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional.
- Harrison, T. P., Lee, H. L., & Neale, J. J. (2004). The Practice of Supply Chain Management: Where Theory and Application Converge. United States of America: Springer Science & Business Media.
- Mendez, E. R. (2008). Biodiesel - Producción y Aplicaciones. Draco.
- Mingorance, M., Minelli, F., & Le Du, H. (2004). El cultivo de palma africana en el chocó: legalidad ambiental, territorial y derechos humanos. Quibdó: Human Rights Everywhere.

### Fuentes electrónicas

- Secretaria distrital de ambiente. (2015). Enfoque de ciclo de vida Nivel IV Pread. Consultado el 20 mayo de 2015 en
- [http://ambientebogota.gov.co/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b10b7bf6-81fc-4fa9-9aeb-013f0e7cd743&groupId=24732](http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=b10b7bf6-81fc-4fa9-9aeb-013f0e7cd743&groupId=24732)

## Sobre los autores

- **María Teresa Castañeda Galvis:** Ingeniera Industrial, Master en Administración, Candidata a Doctor en Administración de la Universidad Nacional del Rosario (Argentina). Profesor Asociado. [maria.castaneda@upb.edu.co](mailto:maria.castaneda@upb.edu.co)
- **Nelson Enrique Moreno Gómez:** Ingeniero Industrial. Magister en Administración de Empresas de la Universidad Viña del Mar (Chile). Profesor Asociado. [nelson.moreno@upb.edu.co](mailto:nelson.moreno@upb.edu.co)
- **Jesús Andrés Abril Cantero:** Estudiante de Ingeniería Industrial. [jesus.abril@upb.edu.co](mailto:jesus.abril@upb.edu.co)
- **Rafael Guillermo García Cáceres:** Ingeniero Industrial. Maestría en Ingeniería Industrial. Doctor en Ingeniería Universidad de los Andes. Vicerrector de Investigación. [rafael.garcia@uniagustiniana.edu.co](mailto:rafael.garcia@uniagustiniana.edu.co)
- **Óscar Orlando Ortiz Rodríguez:** Ingeniero Industrial. Maestría en Ingeniería. Doctor en Ingeniería de procesos y ambiental de la Universitat Rovira I Virgili (URV). Profesor Asociado. [oscarortiz@unipamplona.edu.co](mailto:oscarortiz@unipamplona.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2015 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)