

# ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A BASE DE ACEITE DE HIGUERILLA EMPLEANDO LA METODOLOGÍA “DE LA CUNA A LA CUNA” ESCENARIO SABANA DE TORRES, SANTANDER

M. GÓMEZ OLACHICA\*; L. ZURIQUE NARVAEZ; P. ACEVEDO PABÓN; V. KAFAROV

Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander.  
\*mariadelpilargomezolachica@gmail.com

Fecha Recepción: 21 de Octubre de 2009

Fecha Aceptación: 3 de Marzo de 2010

---

## RESUMEN

En el presente estudio se aplica la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el enfoque denominado “de la cuna a la cuna” a la producción de Biodiesel de higuierilla con el objetivo de identificar las etapas del ciclo de vida que afectan más al medio ambiente y elaborar el respectivo perfil ambiental. El enfoque “de la cuna a la cuna” permitió conocer el tiempo necesario de recuperación del terreno, considerando que un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente, son fijados en la naturaleza gracias a los diferentes ciclos biogeoquímicos. Las etapas contempladas en el ACV son: cultivo e integración de los ciclos biogeoquímicos, extracción del aceite, transformaciones industriales, uso y disposición de residuos. Se estudiaron las siguientes categorías de impacto: Cambio climático, acidificación, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos, efectos respiratorios y energía no renovable, identificando las etapas relevantes relacionadas al consumo de energía y emisiones al medio ambiente.

**Palabras claves:** ACV, biocombustibles, emisiones, impacto ambiental.

## ABSTRACT

In this study we work with the Life Cycle Assessment (LCA), is applied with the approach known as “from the cradle to the cradle” to the production of biodiesel from castor oil the objective with of to identify the phases of the life cycle which more affect the environment and make the respective environmental profile.” From the cradle to the cradle” allowed us to know the necessary time of recovery of terrain, considering that one percentage of the discharges residues to the environment are fixed by the nature thank to the different biogeochemical cycles. The phases of the life cycle assessment (LCA) are: cultivation and integration of the cycles biogeochemical, oil extraction, the industrial transformation, the use as biofuel and the residue disposal. The categories of impact studied were: change climatic, acidification, eutrophication, photochemical smog formation, respiratory effects and non-renewable energy, identifying relevant phases related with the consumption energy and emissions to the environment.

**Keywords:** LCA, biofuel, emissions, environmental impact

---

## INTRODUCCIÓN

La actual situación ambiental hace que el hombre tenga que tomar medidas urgentes debido al gran deterioro del medio ambiente. Aunque los

problemas ambientales se dan en diferentes ámbitos, la mayoría de veces poseen un factor común: los combustibles fósiles; los subproductos originados durante la combustión, han causado gran daño al medio ambiente, pero lastimosamente

son combustibles de gran importancia debido a la incesante demanda energética mundial. Es necesaria una estrategia que permita seguir aprovechando este recurso no renovable pero que a la vez reduzca impactos medioambientales como la alteración de hábitats, la degradación de suelos, el uso de agroquímicos y la contaminación de efluentes. Con esta idea en mente, viramos hacia el uso de combustibles ecoeficientes, tomando mayor relevancia la utilización de mezclas con biocombustibles, como el etanol y el biodiesel.

El biodiesel ha tenido como principal materia prima los aceites provenientes de semillas oleaginosas, que si bien son utilizadas para consumo humano este es mínimo. La producción a gran escala de oleaginosas compite con el uso de tierras para la producción de alimentos y es por ello que se buscan para la producción de biocombustibles aceites que posean alta productividad y que a la vez satisfagan las demandas existentes. Se apunta entonces a reducir el área sembrada para su producción dando uso óptimo a las tierras, intentando a la vez reducir el impacto que pueda tenerse sobre la biodiversidad y biomasa de las tierras de cultivo.

El presente estudio tiene como escenario el municipio de Sabana de Torres, localizado geográficamente, al noroeste del departamento de Santander. Siendo su principal vía de acceso la carretera transversal a Barrancabermeja, empalmando con la Troncal del Magdalena medio. El municipio se puede considerar estratégico en su localización por varias razones; como lo son: la fertilidad de sus tierras, sus recursos en un punto nodal de encuentro de importantes proyectos de infraestructura vial que articulan al país como la Troncal del Magdalena medio [10].

Desde hace aproximadamente 50 años, en el Magdalena Medio existe agroindustria, investigación y desarrollo de la producción de aceite de palma. Sin embargo, se ha llegado a un punto en donde las tierras aptas para el cultivo de palma aceitera son escasas, abriendo espacios para cultivos menos exigentes en calidad de tierras. Estas son las razones que nos lleva a plantear a la higuera, semilla local, como alternativa para la producción de biodiesel con metanol. Hacer el ACV de “la cuna a la cuna” nos permite calcular las emisiones potenciales en cada etapa del proceso y ver cuánto tiempo es necesario para

la recuperación del terreno que se utiliza para el cultivo con las condiciones ambientales del municipio de Sabana de Torres.

El método del ACV cuantifica las corrientes de entrada y salida durante la vida de un producto, empezando desde la producción de la materia prima hasta la disposición final de los desechos generados a lo largo de todo el ciclo. Por poseer estas características el ACV es una herramienta clave para programas de sostenibilidad y para evaluar la competitividad de productos en mercados internacionales. Al enfocarlo hacia los biocombustibles se busca la protección de ecosistemas, la reducción de emisiones, la seguridad energética y el bienestar social en las áreas rurales donde se implementan los proyectos.

El ACV cuantifica emisiones potenciales pero los valores reales de estas emisiones dependen de cuándo, cómo y dónde se liberan al medio ambiente, es decir, del escenario. Al utilizar un enfoque como el que se propone “de la cuna a la cuna”, se tiene en cuenta que la naturaleza toma como insumos las descargas del sistema productivo y contando o no con ellos, puede seguir siendo fuente sostenible de los suministros naturales para el sistema productivo.

## METODOLOGÍA

Basándonos en los lineamientos estipulados en las normas ISO 14040 y realizando las respectivas modificaciones para tener el enfoque “de la cuna a la cuna”, la metodología empleada se encuentra dividida en cuatro fases secuenciales e iterativas. Gracias a que los cuatro pasos metodológicos son iterativos se logra aumentar el nivel de detalle a medida que avanzamos en el ACV, como se puede observar en la Figura 1.



Fuente: ISO 14040, 1998  
**Figura 1.** Etapas del ACV

## DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El propósito de este estudio fue examinar la sostenibilidad ambiental del sistema de producción de biodiesel a partir del aceite de higuierilla, utilizando ACV con el enfoque “de la cuna a la cuna”.

Con tal fin se tomó como unidad funcional una capacidad de producción de la planta de biodiesel

de 80.000 toneladas/año. Por otra parte, la evaluación realizada tuvo como objeto de estudio un escenario definido, es por ello que se hace imperante establecer límites en el sistema y de esta manera establecer los sistemas funcionales que deben ser incluidos dentro del ACV. Para el presente trabajo se incluyeron: la actividad agrícola e integración de los ciclos biogeoquímicos, la extracción del aceite de ricino, la transesterificación del aceite de higuierilla y la distribución y uso del biocombustible.

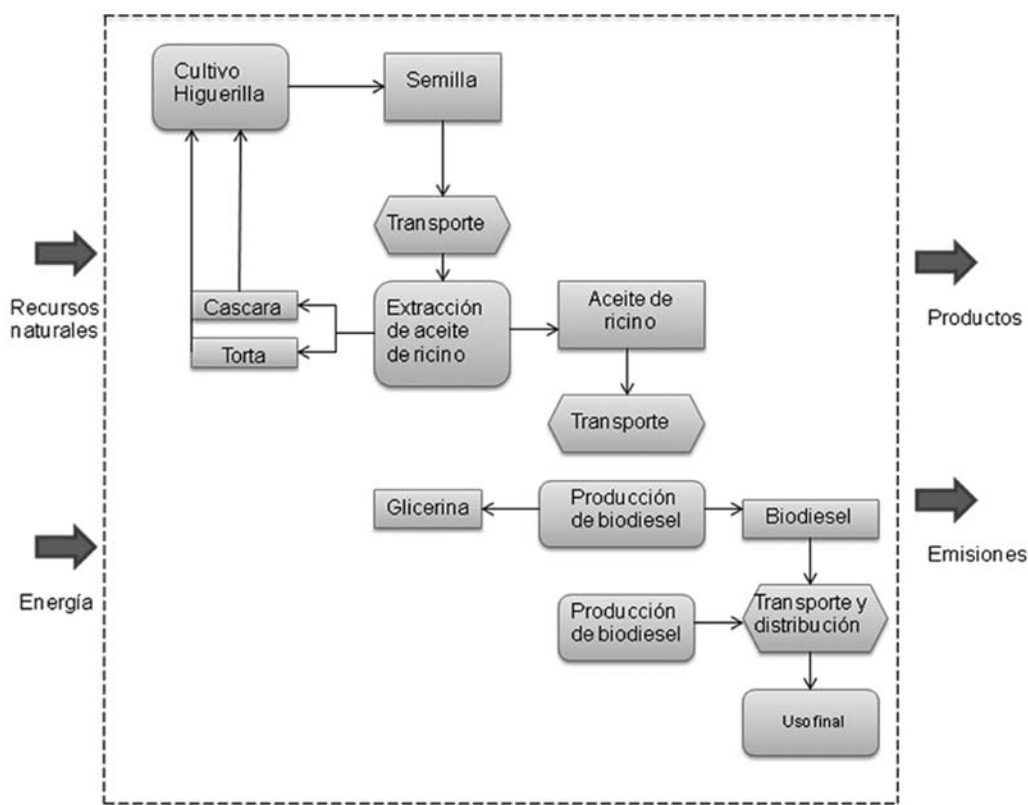


Figura 2. Diagrama de los procesos implicados en el sistema de estudio

En el sistema objeto de estudio se fijaron los siguientes límites geográficos: cultivo, planta extractora de aceite y planta productora de biodiesel ubicados en el municipio de Sabana de Torres (Santander), la distribución y uso del biodiesel abarca todo el territorio nacional. Se tomó como horizonte temporal 60 años, con el fin de servir de punto de comparación con otros estudios. El escenario está constituido por un terreno de partida tipo sabana y con un tipo de semilla negra [6]. No se tuvo en cuenta la

etapa de construcción ni el mantenimiento de la infraestructura de la planta, no se tomaron en cuenta factores económicos, factores sociales, o fenómenos naturales catastróficos.

A los insumos empleados en el proceso que no provienen de la cadena de higuierilla se les aplicó ACV “de la cuna a la tumba”. Dada las dificultades encontradas en la recolección de datos para condiciones locales de algunos impactos ambientales, estos no pudieron ser cubiertos en

totalidad. El método de asignación másica (regla de asignación basada en las fracciones presentes de cada co-producto en el flujo total de salida de un sistema) fue empleado para la extracción y transesterificación del aceite, tal y como se recomienda en la norma ISO 14040. Se utilizó el método reportado por Antón (2004) [4] para la evaluación de los diferentes impactos: cambio climático, formación de oxidantes foto-químicos, acidificación, eutrofización, efectos respiratorios y energías no renovables. Para el estudio no se desestimaron datos, se procedió a discretizar la información teniendo en cuenta las limitaciones propias del análisis. Se buscaron datos recientes y acordes con la zona geográfica correspondiente, recurriendo a diferentes fuentes debido a la relativa dificultad, que se presentó en relación a algunas partes de la investigación.

### ANÁLISIS DEL INVENTARIO

Para esta etapa del ACV se contabilizaron los flujos ambientales y energéticos de las diferentes materias primas y procesos involucrados en el ciclo de vida del biodiesel de higuera mediante el desarrollo de los balances de masa y energía. Para la recolección de los datos, el ciclo de vida fue dividido en las etapas antes mencionadas, siendo la fase de cultivo la etapa el punto de partida. Para esta etapa se consideró un terreno que posee como unas condiciones iniciales a las cuales se pretende regresar considerando los tiempos y etapas necesarias para recuperar este estado, lo anterior se representa en la Figura 3.

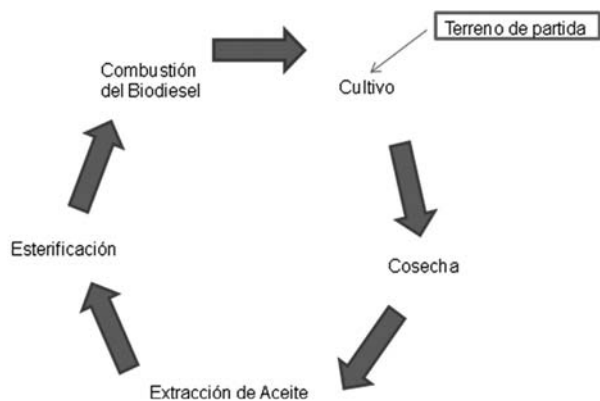


Figura 3. Esquema del Ciclo de Vida de la producción de Biodiesel de Higuera.

### ACTIVIDAD AGRÍCOLA E INTEGRACIÓN DE LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

En esta etapa se encuentran resumidas todas las labores relacionadas con la parte agrícola. Debido a su correlación natural durante el tiempo esta etapa puede ser tratada como parte de un subsistema, presentándose la identificación y contabilización de los flujos ambientales y energéticos relacionados tanto con la semilla, con las actividades realizadas, así como los procesos de producción, y transporte de insumos agrícolas. Tomamos como punto de partida un terreno considerado como terrazas bajas, con una alta fertilidad, un pH de 5.5, en el cual no se presenta rotación con otro cultivo. Se estableció que la productividad del terreno es de cuatro años, pasado este tiempo, se realiza una limpieza, entrando posteriormente el terreno en un período de recuperación de cuatro años. Este ciclo se repitió hasta terminar el tiempo de estudio del ACV establecido en 60 años. Debido a lo anterior se utilizó un cultivo alterno con el fin de mantener constante la producción de semilla. Dado que para este tipo de cultivos no se tienen mucha información [4] y también se sabe que su aporte es mínimo [5], éstos no fueron incluidos en los balances.

Un porcentaje de los residuos vertidos al medio ambiente son fijados en la naturaleza debido a los diferentes ciclos biogeoquímicos. Siendo de mayor importancia en nuestro estudio los ciclos del carbono y del nitrógeno.

A medida que se desarrolla el cultivo, las plantas van fijando  $\text{CO}_2$  que obtienen de la atmósfera, el cual es utilizado en su crecimiento, siendo a su vez utilizado en diferentes funciones; como retornar nuevamente a la atmósfera mediante el mecanismo de respiración, fijarse en la biomasa que se cosecha o formar parte de la biomasa que se queda en el terreno, siendo esta última la de mayor utilidad ya que este carbono absorbido y transferido al suelo en forma de rizodepositos ("formas inmovilizadas de C que se consideran como una fijación neta de  $\text{CO}_2$  atmosférico por el cultivo), convirtiéndose así en la contribución de la planta en la disminución del  $\text{CO}_2$ , debido al no transformarse nuevamente en  $\text{CO}_2$  se consideran una fijación neta [9]. La cual se representa como

un porcentaje de  $\text{CO}_2$  incorporado por la planta con un valor de 56.8%. Siendo también de importancia el mencionar que la fijación del  $\text{CO}_2$  por parte del rastrojo se considero de 56.8% [8]. Figura 4.

El nitrógeno podemos encontrarlo en varios compartimientos, en la planta, en los residuos vegetales, en el nitrógeno mineral, y en la materia orgánica humificada. Los flujos de entrada de nitrógeno entre estos compartimientos y también con el medio fuera de ellos se ven representados por la fijación biológica de nitrógeno, la fertilización y el ingreso por lluvia. Los flujos de salida de mayor

magnitud son la exportación, volatilización, desnitrificación y lixiviación [2]. Consideramos que existe una fijación neta de nitrógeno en el suelo, esto debido a la presencia de bacterias no simbióticas que superan los 15 kg/ha año [1]. Además se calcularon las emisiones debidas al uso de los fertilizantes ( $\text{N}_2\text{O}$ ) se calcularon de acuerdo a lo propuesto en la metodología IPCC [5]; esta metodología expresa las pérdidas de nitrógeno en forma de oxido nitroso como un porcentaje del nitrógeno aplicado, [4] propone esta metodología en función del tipo de fertilizante y la época de aplicación. También se tomo como referencia ECETOC, (1994) para estimar las emisiones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$ .

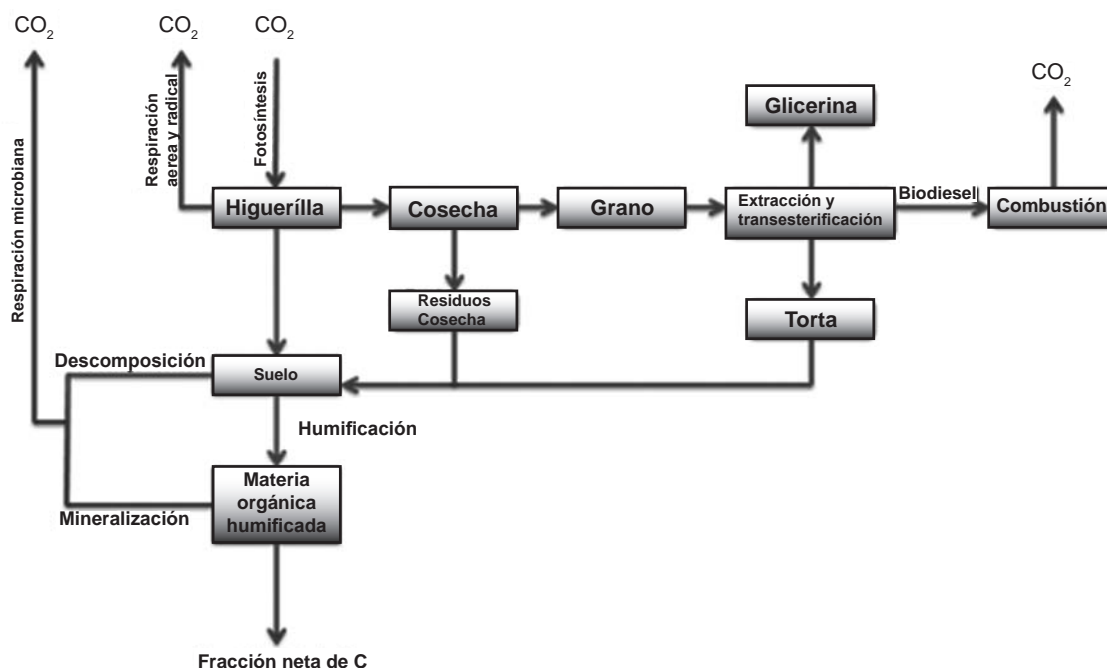


Figura 4. Ciclo del Carbono para la cadena de producción de biodiesel

## EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE RICINO

Se utilizo inicialmente un mecanismo de prensado seguido de una extracción por solvente, debido al carácter dehiscente de nuestra semilla no se tomo en cuenta el sistema de descascarado.

## TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE

Nuestro proceso se fundamenta en la obtención de Biodiesel a partir del aceite de higuierilla,

empleándose esterificación y transesterificación simultáneas, en medio ácido con ácido sulfúrico como catalizador utilizándose para la reacción alcohol metílico (metanol).

## DISTRIBUCIÓN Y USO DEL BIOCOMBUSTIBLE

En esta etapa se incluyen los impactos relacionados con la distribución de nuestro biodiesel el cual esta formado en una mezcla 10% v y 90% v, lográndose de esta manera una disminución en las

emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al ser utilizado en vehículos de carga pesada.

### EVALUACIÓN DE IMPACTOS

Para poder valorar los resultados del análisis de inventario es necesario hacer una selección de las categorías de impacto, las cuales se representan por medio del indicador de categoría

el cual es la adición de diferentes intervenciones ambientales ocasionadas por las diferentes sustancias que lo conforman.

### INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

En esta fase se combinan los resultados del análisis de inventarios con la evaluación de impacto, para realizar una evaluación de las incertidumbres.

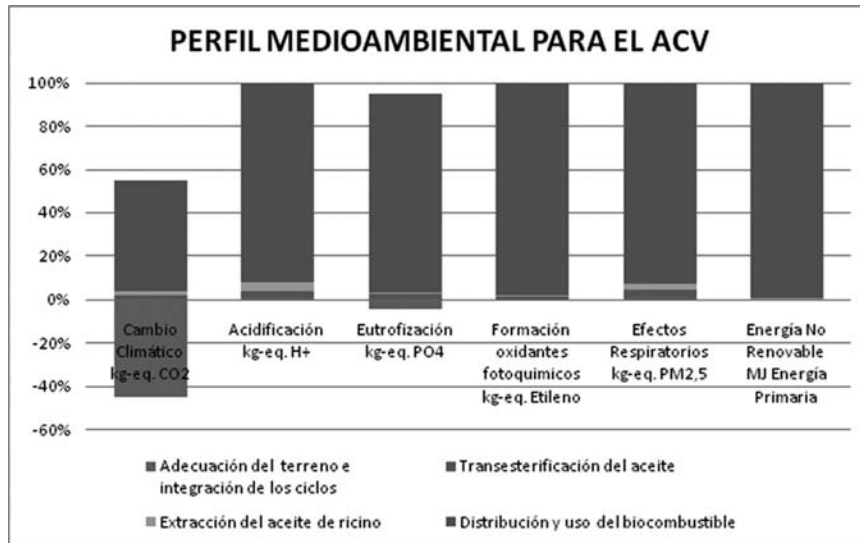


Figura 5. Perfil medioambiental para el ACV

### EVALUACIÓN DE IMPACTOS

Para poder valorar los resultados del análisis de inventario es necesario hacer una selección de las categorías de impacto, las cuales se representan por medio del indicador de categoría el cual es la adición de diferentes intervenciones ambientales ocasionadas por las diferentes sustancias que lo conforman.

categoría. Para la clasificación de las emisiones cada intervención ambiental se asoció con las categorías de impacto en las cuales tienen un efecto. Una vez realizada esta clasificación se procede a la adición de los datos para cada una de las categorías empleando los factores de equivalencia y el siguiente modelo:

$$Ind. \text{ categoría impacto} = \sum_i m_i * (\text{factor caracterización categoría})_i$$

### INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

En esta fase se combinan los resultados del análisis de inventarios con la evaluación de impacto, para realizar una evaluación de las incertidumbres.

Donde  $m_i$  es la emisión del recurso utilizado y (factor de caracterización de la categoría de impacto)<sub>i</sub> es propio para cada recurso. Como siguiente paso se calcula el porcentaje de participación que tiene cada una de las etapas del ciclo de producción del biodiesel en las diferentes categorías de impacto.

### RESULTADOS

Para realizar la interpretación de los datos obtenidos, es necesario evaluar el impacto ambiental asociado con las emisiones y usos de las fuentes naturales. Cada categoría de impacto se representó utilizando un indicador de

El perfil medio ambiental obtenido nos muestra una participación significativa de la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos, presentándose un impacto positivo debido a la disminución de los kg-eq

de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera. Este efecto es contrario al presentado en las otras etapas obteniéndose un impacto negativo principalmente en la etapa de distribución y uso.

### CAMBIO CLIMÁTICO

Con el objeto de obtener una mayor comprensión del impacto ambiental generado se analizaron los efectos causados por diferentes categorías. Los resultados obtenidos se representan en

las siguientes gráficas. La categoría de cambio climático se muestra en la Figura 6.

Durante la evaluación de esta categoría se tuvo cuenta parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO son fijadas en la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos, apreciándose una disminución en los kg-eq netos de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmosfera. Aunque esta disminución no es suficiente para contrarrestar las emisiones producidas por las otras etapas.

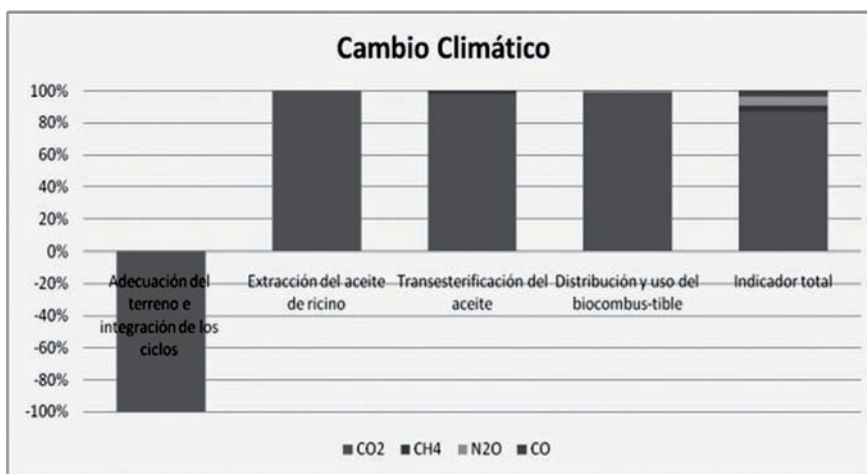


Figura 6. Emisiones consideradas para la categoría de cambio climático

### ACIDIFICACIÓN

En la categoría de acidificación se apreció que las emisiones que contribuyen en mayor proporción son las de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, mientras que las emisiones de HCL, HF y NH<sub>3</sub> son casi nulas.

De los resultados obtenidos podemos concluir que en todas las etapas se presenta impacto ambiental negativo.

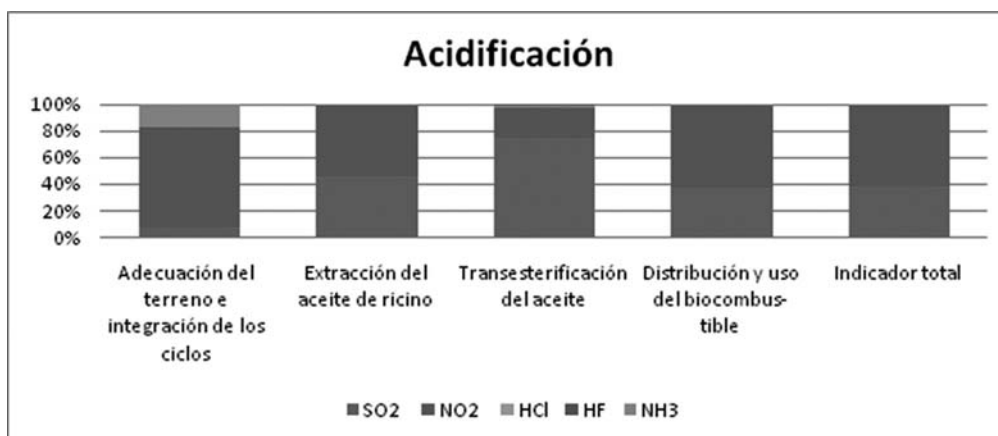


Figura 7. Emisiones consideradas para la categoría de acidificación

## EUTROFIZACIÓN

En la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos, la categoría de eutrofización presenta un balance ambiental positivo gracias a la fijación

de  $N_2$  en el suelo por el ciclo de nitrógeno. Por otra parte se puede apreciar la contribución del  $NO_2$  en las demás etapas.

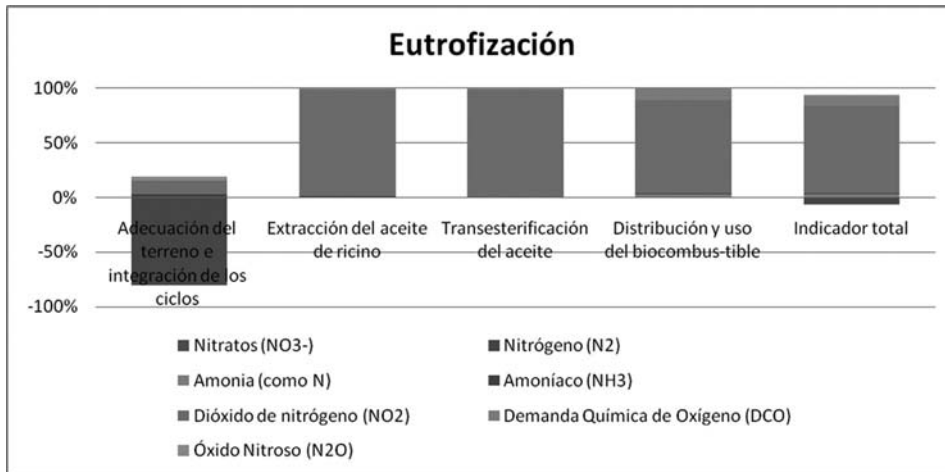


Figura 8. Emisiones consideradas para la categoría de eutrofización

## FORMACIÓN DE OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

La categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, se caracteriza por el predominio de

las emisiones representadas por los hidrocarburos en las diferentes etapas del proceso.

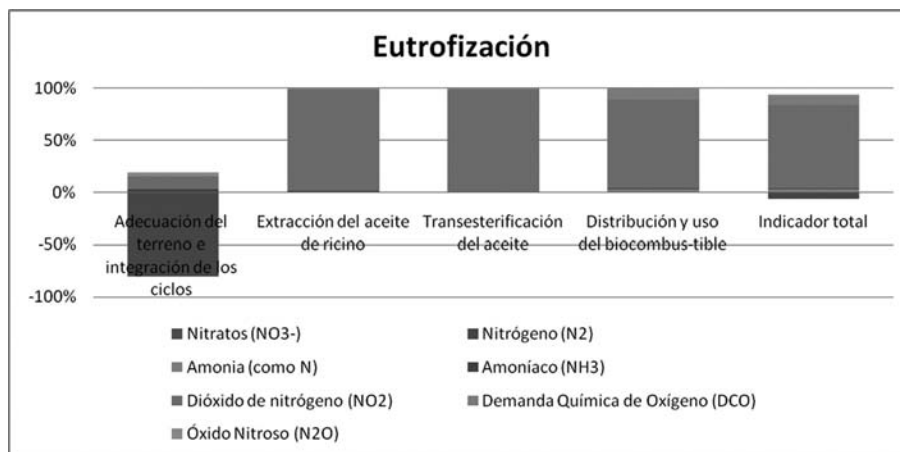


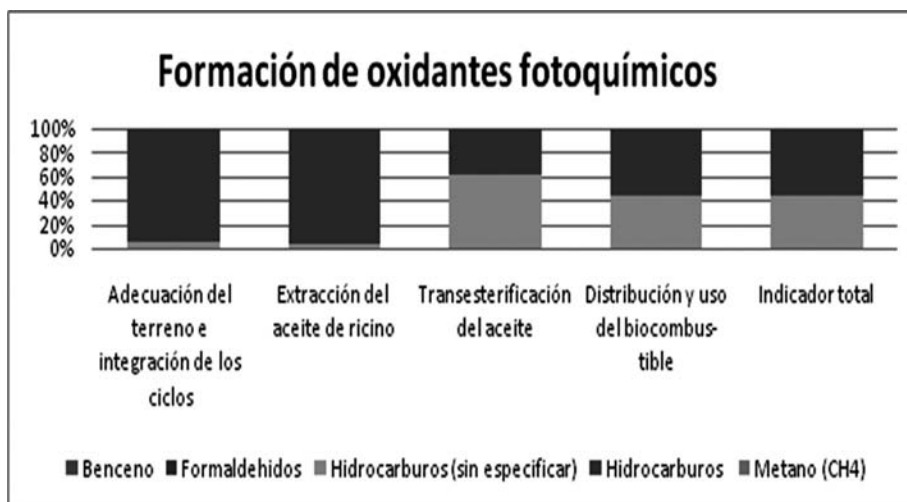
Figura 9. Emisiones consideradas para la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos

## EFFECTOS RESPIRATORIOS

Podemos apreciar en la categoría de efectos respiratorios, una contribución proporcional de

las emisiones de  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_4$ ,  $N_2O_2$ , Y partículas sin especificar en las diferentes etapas.





**Figura 10.** Emisiones consideradas para la categoría de efectos respiratorios

## CONCLUSIONES

El mayor gasto de energía se presenta en la etapa de distribución y uso del biocombustible.

El impacto ambiental representado por las categorías de cambio climático y eutrofización disminuye significativamente por la fijación neta del carbono y nitrógeno en la etapa de adecuación del terreno e integración de los ciclos biogeoquímicos.

La etapa de distribución y uso del biocombustible representa el mayor aporte de las emisiones generadas a cada una de las categorías de impacto ambiental estudiadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abela, J. E. Importancia y función de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) en el cultivo de soya. [http://www.fundacruz.org.bo/documents/informacion/10\\_Fijacion\\_biologica.pdf](http://www.fundacruz.org.bo/documents/informacion/10_Fijacion_biologica.pdf). 2004.
- [2] Alvarez, R. Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. En: INTA – estación Experimental Agropecuaria Rafaela. INFORMACION TECNICA DE TRIGO CAMPAÑA 2006. Publicación Miscelánea, 105. [http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/misc105/trigo2006\\_23.pdf](http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/misc105/trigo2006_23.pdf). 2006.
- [3] Anton, M. A. Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis de Doctor en Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. 2004.
- [4] Audsley, E. et al. Harmonization of environmental life cycle assessment for agriculture: Final Report. Concerted Action AIR3-CT94-2028. European Commission DG VI Agriculture, Silsoe, UK. 2003, p. 98.
- [5] Da Costa, R. E. The energy balance in the production of palm oil biodiesel – Two case studies: Brazil and Colombia. CENIPALMA, 1-5. <http://www.galeon.com/francisko3/balancebio.pdf>. 2005.
- [6] Franco, G. et al. Introducción y evaluación de materiales de higuera (Ricinus communis), para la producción de biodiesel en diferentes zonas de Colombia. Medellín, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2007.
- [7] Gomez, M. Y Zurique, L. Análisis del Ciclo de Vida para la producción de Biodiesel a partir de Aceite de Higuera (Escenario 1: cultivo en Sabana de Torres, Esterificación en medio ácido y con metanol). Tesis de Pregrado para

la obtención del título de Ingeniero Químico, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia. 2008.

- [8] Kuzyakov, Y Y Domaski, G. Carbon input by plants into the soil. Review [Abstract]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163 (4), 2000, pgs. 421-431.
- [9] Lechon, Y. Y Domanski, G. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. (Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diesel). España: Ministerio de Medio Ambiente – Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y tecnológicas. 2000.
- [10] Municipio De Sabana De Torres. Esquema de Ordenamiento Territorial de Sabana de Torres – Santander. <http://www.sabanadetorres-santander.gov.co/planeacion.shtml?apc=p1z1--&m=l>. 2004.