

# Análisis del ciclo de vida para la producción de bioetanol en Colombia por medio de OpenLCA

RODRIGO BUITRAGO<sup>1</sup>  
LUIS CARLOS BELALCÁZAR<sup>2</sup>

## RESUMEN

El presente estudio presenta el análisis de ciclo de vida (ACV) para la cadena de producción de bioetanol como combustible (E100) en Colombia, utilizando como herramienta el *software* de uso libre OpenLCA. Para la elaboración del inventario de emisiones se emplearon datos de referencias bibliográficas e inventarios de emisiones de la base de datos Ecoinvent v2.2. Se cuantificó el potencial de calentamiento global (PCG) por medio de la metodología de impacto IPCC2007, y la demanda de energía no renovable por medio del método de demanda acumulada de energía (DAE). La actividad que presenta mayor aporte al PCG es la producción de fertilizantes y la liberación de estos al aire durante su aplicación en el terreno. Para la DAE el proceso con mayor demanda corresponde a la preparación del terreno y la producción de fertilizantes.

**Palabras clave:** bioetanol, análisis de ciclo de vida, caña de azúcar, OpenLCA.

<sup>1</sup> Ingeniero químico. Máster en Procesos Químicos y Desarrollo Sostenible, Universidad del País Vasco, España. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rbuitragot@unal.edu.co

<sup>2</sup> Docente, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: lcbelalcazar@unal.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 30 DE JULIO DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 21 DE OCTUBRE DEL 2013

Cómo citar este artículo: Buitrago, R. y Belalcázar, L. C. (2013). Análisis del ciclo de vida para la producción de bioetanol en Colombia por medio de OpenLCA. *Épsilon* (21), 145-156.

## *Lifecycle Analysis for the Production of Bioethanol in Colombia Using OpenLCA*

### ABSTRACT

The present study shows the lifecycle analysis (LCA) for the production chain of bioethanol as a fuel (E100) in Colombia, using the OpenLCA free software. Data from bibliographic references and emissions stock from the Ecoinvent V2.2 database was used in order to carry out the emissions stock for the present study. The Global Warming Potential (GWP) was quantified using the IPCC 2007 impact methodology, and the demand of non-renewable energy was quantified using the cumulative energy demand (CAE) method. The activity that represents the greatest contribution to GWP is the production of fertilizers and its release to the environment as they are used in agriculture. As for the CAE, the process with greatest demand corresponds to the preparation of land and the production of fertilizers.

**Keywords:** Bioethanol, Life Cycle Analysis, Sugar Cane, OpenLCA.

---

### *Análise do ciclo de vida para a produção de bioetanol na Colômbia por meio de openLCA*

### RESUMO

O presente estudo apresenta a análise de ciclo de vida (ACV) para a cadeia de produção de bioetanol como combustível (E100) na Colômbia, utilizando como ferramenta o *software* de uso livre OpenLCA. Para a elaboração do inventário de emissões foram empregados dados de referências bibliográficas e inventários de emissões da base de dados Ecoinvent V2.2. Se quantificou o potencial de aquecimento global (PCG) por meio da metodologia de deImpacto IPCC2007, e a demanda de energia não renovável por meio do método de demanda acumulada de energia (DAE). A atividade que apresenta maior entrada ao PCG é a produção de fertilizantes e a liberação destes ao ar durante sua aplicação no terreno. Para a DAE o processo com maior demanda corresponde à preparação do terreno e à produção de fertilizantes.

**Palavras chave:** bioetanol, análise de ciclo de vida, cana de açúcar, OpenLCA.

## Introducción

A los biocombustibles se les atribuyen algunos beneficios ambientales como la reducción de emisiones vehiculares. Sin embargo, cuando se estudia el impacto en el ambiente de toda su cadena productiva, se puede encontrar que las emisiones atmosféricas pueden aumentar significativamente en etapas previas a su uso. El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que permite determinar las etapas del proceso que presentan un alto impacto ambiental y, por tanto, proporciona una orientación del tipo de materias primas y tecnologías por emplear, es decir, es una herramienta de decisión en etapas tempranas de diseño (Niederl-Schmidinger y Narodslawsky, 2008).

Varios estudios de ACV de biocombustibles de primera generación (Kendall y Yuan, 2013; Gnansounou *et al.*, 2009; Reijnders, 2011; Kim y Dale, 2005) han demostrado que muchas de las cadenas planteadas para los biocombustibles presentan un beneficio marginal, nulo o incluso negativo sobre diferentes categorías de impacto ambiental (gases de efecto invernadero, demanda de energía, entre otras) en comparación con los combustibles convencionales. Este déficit es más marcado cuando se consideran efectos indirectos como el cambio directo e indirecto del uso de suelo por actividades agrícolas (Broch *et al.*, 2013). Sin embargo, estas cuantificaciones están sujetas a la variabilidad e incertidumbre en los datos recopilados y al país o a la zona de estudio. A pesar de los problemas de variabilidad e incertidumbre que se pueden presentar en el ACV de biocombustibles, resulta ser una herramienta útil para la mejora continua de las materias primas actuales y futuras y de las tecnologías de conversión (Kendall y Yuan, 2013).

En Colombia se han desarrollado ACV para algunos productos o servicios, sin embargo, son pocas las publicaciones científicas relacionadas con este tema. A pesar de esto, en nuestro país ya se cuenta con experiencias previas en las que se realizó el ACV para los biocombustibles colombianos. Recientemente, el Consorcio conformado por el Centro de Producción más Limpia, Universidad Pontificia Bolivariana y EMPA (CUE) realizó la evaluación del ACV para la cadena de producción de biocombustibles en Colombia (CUE, 2012). En dicho estudio se realizó una recopilación completa de toda la información necesaria para la elaboración del mencionado ACV, sin embargo, al igual que en muchos otros estudios, la herramienta que se utilizó fue el *software* comercial Simapro v7.2.

Aunque existen múltiples herramientas de *software* para desarrollar ACV (Boureira *et al.*, 2007; International Society of Sustainability Professionals, 2011), algunas presentan un alto costo, dado que son herramientas comerciales (Simapro, Gabi o Umberto). Por otra parte, aquellas de uso libre presentan otras limitaciones en cuanto a las bases de inventarios que pueden llegar a manejar (como es el caso de GREET) o no son amigables para el usuario (como es el caso de CMCLA) y, por tanto, su uso no se ha difundido en nuestro país.

Últimamente se desarrolló una herramienta de uso libre conocida como OpenLCA (GreenDelta, 2012), dicha herramienta ofrece la posibilidad de desarrollar cualquier ACV; algunas de las características de este *software* son, a saber:

- El programa no cuenta con una base de datos para el inventario, pero se puede importar cualquier dato en formato Ecospold01 o ILCDD como es el caso de la base de datos Ecoinvent y la European Reference Life Cycle Database (ELCD).
- Permite la creación de nuevos flujos y procesos y maneja sistemas con más de 2000 procesos.
- Tiene la opción de crear o modificar métodos de análisis de impacto, por medio de la creación de nuevas categorías de impacto, flujos, o factores de caracterización, normalización o ponderación.
- Permite la importación de los métodos de análisis de impacto presentes en la base de datos Ecoinvent, y permite la creación de nuevos métodos.
- Posee 3 métodos de asignación para procesos con múltiples productos de salida: método físico (masa, energía), económico y causal (factor individual para cada flujo).

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el impacto del bioetanol (E100) en toda su cadena productiva por medio del ACV, empleando OpenLCA. Adicionalmente, se busca evaluar de manera crítica el *software* OpenLCA.

## Materiales y métodos

EL ACV se llevó a cabo conforme a las normas ISO 14040 y 14044 (ISO 2006a, 2006b). El objetivo es cuantificar el potencial de calentamiento global y la demanda energética no renovable de la cadena de producción de etanol en Colombia. El alcance incluye las condiciones de cultivo de 5 plantaciones de caña que destinan

su producción a ingenios azucareros, y las condiciones de producción de azúcar y etanol de 4 ingenios azucareros (CUE, 2012). El límite del sistema incluye la extracción de materias primas, transporte, cultivo de caña, producción, transporte, distribución y uso del etanol como combustible en vehículos (figura 1). Los datos de entrada de materias primas y emisiones para la cadena de producción se tomaron de referencias bibliográficas (CUE, 2012; BNDES y CGEE, 2008). La unidad funcional escogida fue 1 km recorrido con etanol al 100 % como combustible en un vehículo Renault tipo Logan, representativo para el caso colombiano, según la revista *Motor* (2013); este modelo fue el segundo vehículo más vendido en los años 2011 y 2012 en Colombia.

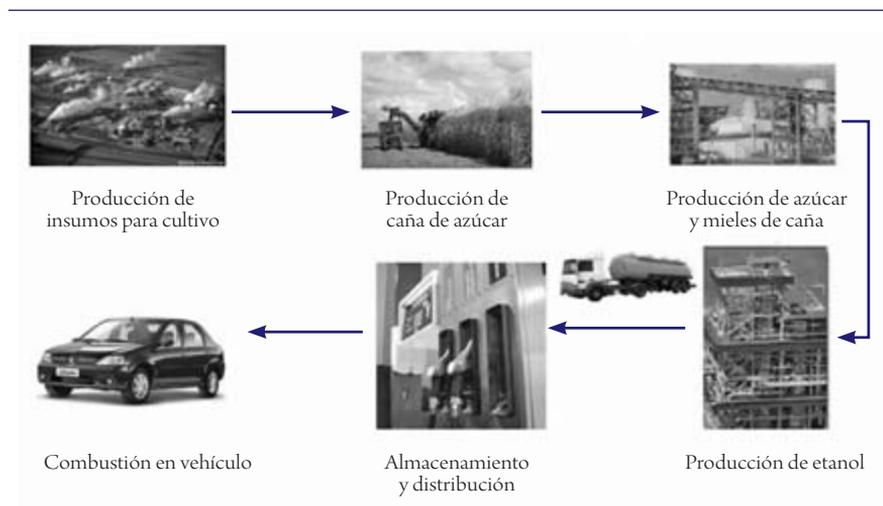


Figura 1. Límites del sistema para el análisis de ciclo de vida de bioetanol en Colombia

Fuente: elaboración propia.

El inventario de emisiones asociado con la producción de materias primas, tratamiento de efluentes, actividades agrícolas y sistemas de transporte se desarrolló empleando la base de datos Ecoinvent v2.2 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010a). El año de referencia para el estudio es el 2000, por tanto, no se consideró el impacto ambiental generado por el cambio indirecto en el uso del suelo (CUE, 2012), dado que las plantaciones se establecieron en años anteriores.

La evaluación de los impactos causados se determinó utilizando el método IPCC y *cumulative energy demand* (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010b). Se

consideraron los siguientes impactos: potencial de calentamiento global (*global warming potential*) y demanda acumulada de energía (*cumulative energy demand*).

La cadena de producción de bioetanol en Colombia incluye la elaboración de otros productos como azúcar especial, azúcar refinada, compost, electricidad generada y etanol. Para este tipo de sistemas con múltiples productos existen dos alternativas de tratamiento: la primera consiste en la ampliación de los límites del sistema, incluyendo el uso y disposición final de todos los subproductos; la segunda se trata de la asignación de factores a cada producto basados en relaciones físico-causales, una propiedad física (masa o valor energético) o su valor económico (Luo *et al.*, 2009). La serie ISO 14040/44 (2006) recomienda evitar la asignación de factores en lo posible, sin embargo, dado que no se cuenta con la información de las emisiones generadas por los subproductos, se realizó una asignación económica, teniendo en cuenta la cantidad producida de cada subproducto por kilogramo de caña y el costo de cada subproducto en el mercado (CUE, 2012).

Se realizó la comparación de la cadena de producción de etanol de Brasil y Colombia, tomando el inventario de emisiones reportado en la base de datos Ecoinvent para Brasil. Para este análisis se fijó una unidad funcional de 1 kg de etanol producido en planta.

## Resultados

La figura 2 muestra las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> para la cadena de producción de bioetanol obtenidas por el método IPCC 2007, al tomar como unidad funcional un kilómetro recorrido en un vehículo convencional que utiliza como combustible etanol al 100 %. El proceso se analizó tomando 4 etapas de producción: cultivo de caña, incluyendo la producción transporte y uso de insumos químicos (fertilizantes y pesticidas); la producción de mieles en ingenio azucarero; la producción de etanol, incluyendo su transporte y distribución en la ciudad de Bogotá; y el consumo de etanol como combustible en un vehículo convencional.

Se observa que la combustión de etanol en el vehículo no tiene un aporte significativo. Las principales emisiones se generan en las actividades relacionadas con el cultivo de caña; se destaca en este punto que el proceso presenta un rendimiento de 4,7 kg de caña de azúcar/km recorrido por el vehículo.

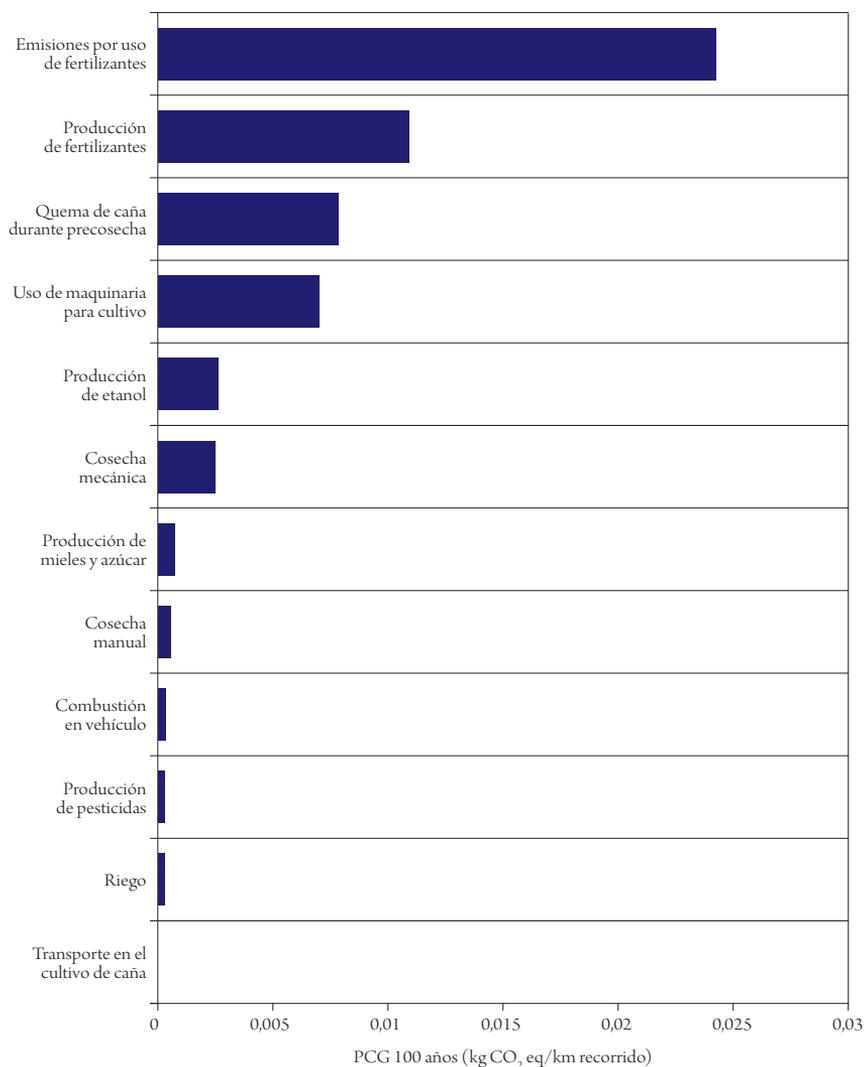


Figura 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> eq kilogramos por kilómetro recorrido con etanol al 100 %, caso Colombia

Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra un diagrama de Sankey donde se seleccionan los procesos con un aporte mayor o igual al 5 % de CO<sub>2</sub> eq acumulado (kg/km recorrido); de igual manera, el diagrama muestra el N<sub>2</sub>O acumulado (kg/km recorrido) en cada proceso. Se destaca el aporte que tiene el uso de fertilizantes en el suelo (42 % del CO<sub>2</sub> eq); la presencia de estos compuestos nitrogenados genera la liberación

de óxido nitroso en la atmósfera (98 % del N<sub>2</sub>O emitido en el proceso); este gas de efecto invernadero presenta un factor de emisión de 298 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg de N<sub>2</sub>O emitido.

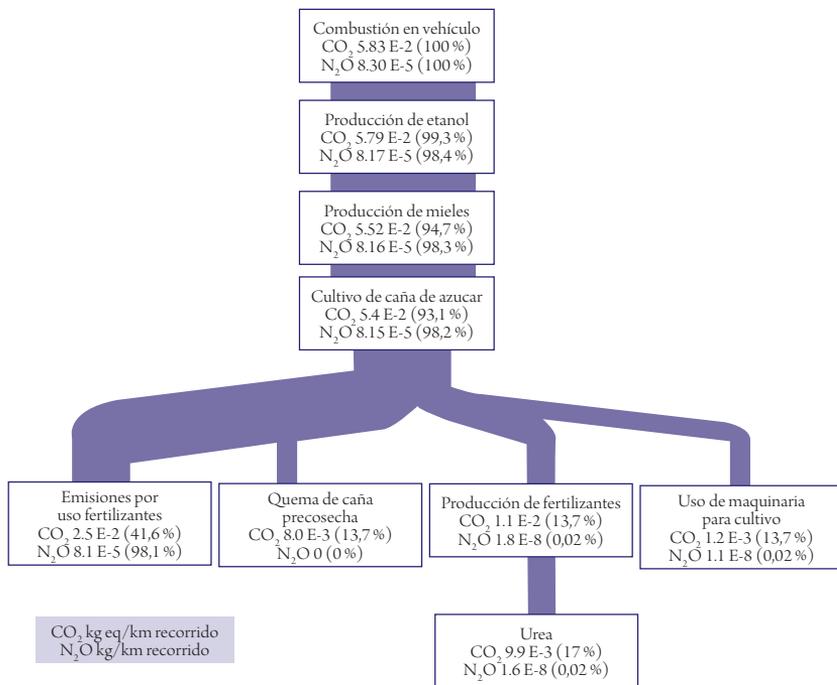


Figura 3. Diagrama de Sankey para las emisiones de CO<sub>2</sub> eq y N<sub>2</sub>O por kilómetro recorrido con etanol al 100 %, caso Colombia

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> eq generadas por la producción de fertilizantes alcanzan un 19 % del dato global. Entre los fertilizantes empleados, la urea presenta el mayor aporte (17%), dadas las cantidades empleadas durante el cultivo (321 kg/ha año). Sin embargo, las principales fuentes de elementos esenciales para el suelo provienen de la vinaza y el compost, generados en la obtención de etanol. Cabe mencionar que las emisiones generadas por la producción de estos dos fertilizantes son consideradas en el proceso de producción de etanol.

La quema de caña como operación previa a la cosecha presenta un aporte de 0,008 kg de CO<sub>2</sub> eq/ km recorrido (14%). El aporte se genera principalmente por la liberación de metano al ambiente. Según el método de IPCC 2007, el CO<sub>2</sub>

generado en la quema no se considera, dado que su procedencia es biogénica (su fuente es de origen fotosintético y es absorbido durante el crecimiento de la caña de azúcar) (BNDES y CGEE, 2008). El empleo de maquinaria para la adecuación del terreno (grada, corte de raíz, laminación, surcado, fertilización, tractor para siembra) presenta un aporte del 12 %, como consecuencia del consumo de combustible fósil (diésel).

Los resultados obtenidos en este estudio se compararon con la cadena de producción de bioetanol en Brasil, reportada en la base de datos Ecoinvent; en este caso, la unidad funcional corresponde a la producción de un kilogramo de etanol. La figura 4 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes para la producción de 1 kg de etanol en los dos países.

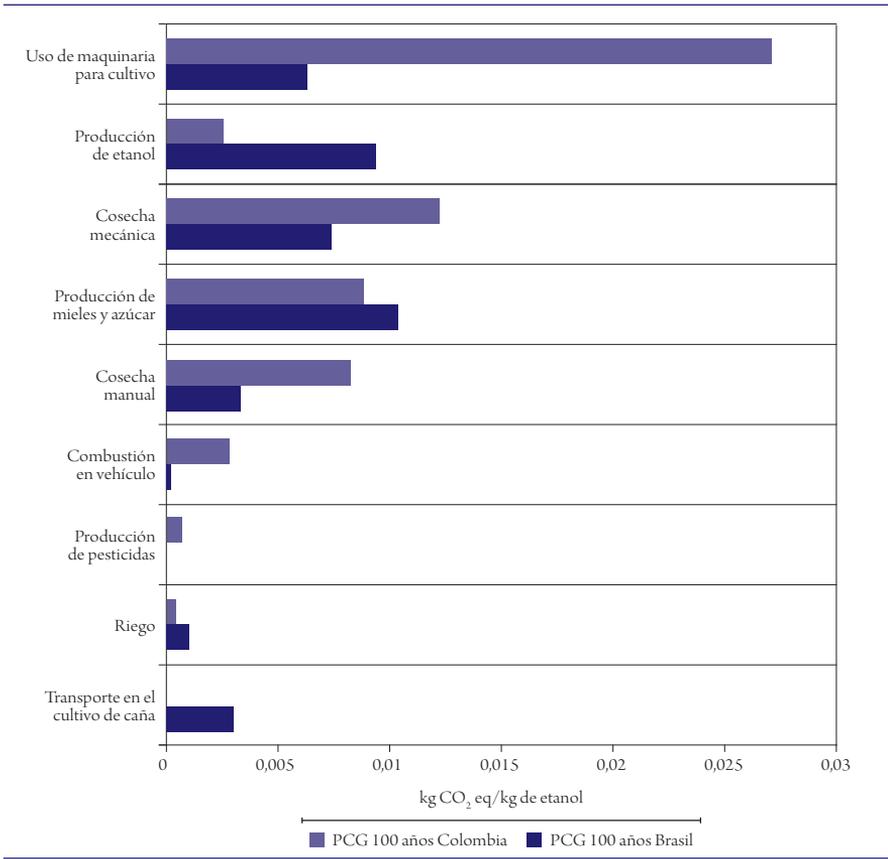


Figura 4. Emisiones de CO<sub>2</sub> eq kilogramos para la producción de etanol carburante en Colombia y Brasil

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones reportadas en la base de datos Ecoinvent para el proceso de cultivo de caña en Brasil no se encuentran clasificadas según su origen, por tanto, se asumió que la cantidad de  $N_2O$  reportado proviene de la emisión por uso de fertilizantes, mientras que el  $CH_4$  y el  $CO$  emitido provienen de la quema durante la precosecha. La principal diferencia entre los 2 procesos se encuentra en la cantidad de fertilizantes empleados, dado que en Brasil se emplea una menor cantidad de urea, la emisión de  $N_2O$  se reduce considerablemente. En los 2 casos, el principal aporte al proceso se encuentra en la fabricación y uso de fertilizantes para el cultivo de caña y en la producción de etanol, la cual incluye la producción de mieles (figura 4).

En cuanto al consumo de energía no renovable, la figura 5 muestra los MJ equivalentes consumidos para cada etapa de la producción de etanol. Se observa que el principal consumo de energía se encuentra en la fabricación de fertilizantes. De igual manera, la preparación de terreno representa el 22,1 % de la energía no renovable consumida por el proceso colombiano, debido al consumo de diésel para la operación de la maquinaria agrícola.

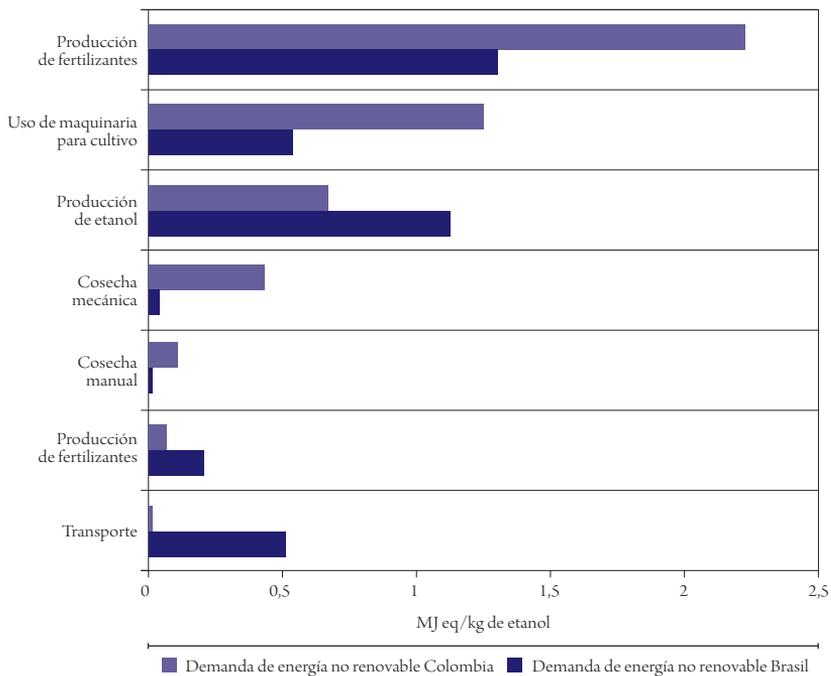


Figura 5. Demanda acumulativa de energía no renovable para la producción de etanol carburante en Brasil y Colombia

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, y como se observa, OpenLCA mostró ser una herramienta de gran utilidad para el desarrollo de ACV. Los resultados obtenidos y sus tendencias son similares a los obtenidos con *software* comercial como en el caso de Brasil y los obtenidos por el CUE (2012). El uso de este *software* permitió comprender mejor el problema estudiado y, por tanto, se recomienda altamente su uso para el estudio de otras categorías de impacto, e incluso para el desarrollo de ACV de otros procesos o productos.

## Conclusiones

Se identificó que la fase de cultivo de caña presenta el mayor aporte a la categoría de *potencial de calentamiento global*, debido a las emisiones ( $N_2O$ ) generadas por los fertilizantes usados, y a su fabricación. Las actividades agrícolas como la adecuación del terreno para la siembra y la quema de los cultivos previamente a la cosecha son también una fuente importante de emisiones. Se observa también que las emisiones generadas por el vehículo durante su uso son poco significativas, comparadas con las generadas en las etapas previas; esto muestra lo importante que es la realización del ACV cuando se evalúan los impactos ambientales de un proceso o producto. De igual manera, la mayor demanda de energía no renovable se da por la fabricación de los fertilizantes empleados en el cultivo y por el empleo de maquinaria para la adecuación del terreno.

Los resultados obtenidos en este estudio son similares a los obtenidos por el CUE (2012), en donde se empleó Simapro v7.2; esto indica que OpenLCA es una herramienta útil y que genera resultados similares a los obtenidos con *software* comercial. OpenLCA permitió realizar el ACV de un biocombustible y obtener resultados que son de gran utilidad para la comprensión de los impactos ambientales de un biocombustible en el medio ambiente.

## Referencias

- BNDES y CGEE. (2008). *Sugarcane-Based Bioethanol: Energy for Sustainable*. Río de Janeiro: BNDES.
- Boureima, F, Sergeant, N., Wynen, V. y Van Mierlo, J. (2007). LCA Software Selection. *Belspo*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de <http://www.belspo.be/>.

- Broch, A., Hoekman, S. y Unnasch, S. (2013). A Review of Variability in Indirect Land use Change Assessment and Modeling in Biofuel Policy. *Environmental Science & Policy*, 29, 147-157.
- Consorsio CUE. (2012). Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia. *Fedebiocombustibles*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de <http://www.fedebiocombustibles.com>.
- Gnansounou, E., Dauriat, A., Villegas, J. y Panichelli, L. (2009). Life Cycle Assessment of Biofuels: Energy and Greenhouse Gas Balances. *Bioresource Technology*, 100 (21), 4919-4930.
- GreenDelta (2012). OpenLCA proyect. *OpenLCA*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de <http://www.openlca.org/greendelta>.
- International Society of Sustainability Professionals. (2011). Directory of Sustainability Life Cycle Assessment Tools. *Sustainability Professionals*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de <http://www.sustainabilityprofessionals.org>.
- International Standards Organisation (ISO). (2006a). ISO 14040: *Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework*. Ginebra: ISO.
- International Standards Organisation (ISO). (2006b). ISO 14044 *Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines*. Ginebra: ISO.
- Kendall, A. y Yuan, J. (2013). Comparing Life Cycle Assessments of Different Biofuel Options. *Current Opinion in Chemical Biology*, 17 (3), 439-443.
- Kim, S. y Dale, B. (2005). Life Cycle Assessment of Various Cropping Systems utilized for Producing Biofuels: Bioethanol and Biodiesel. *Biomass and Bioenergy*, 29, 426-439.
- Luo, L., Van der Voet, E., Huppes, G. y Udo de Haes, H. (2009). Allocation Issues in LCA Methodology: A Case Study of Corn Stover-Based Fuel Ethanol. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14 (6), 529-539.
- Niederl-Schmidinger, A. y Narodoslowsky, M. (2008). Life Cycle Assessment as an Engineer's Tool? *Journal of Cleaner Production*, 16 (2), 245-252.
- Reijnders, L. (2011). The Life Cycle Emission of Greenhouse Gases associated with Plant Oils used as Biofuel. *Renewable Energy*, 36 (2), 879-880.
- Revista Motor. (2013, 25 de enero). Así fue el desempeño de los fabricantes en Colombia el año pasado. *Motor*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de [http://www.motor.com.co/vehiculos-motor/ARTICULO-WEB-NEW\\_NOTA\\_INTERIOR-12549210.html](http://www.motor.com.co/vehiculos-motor/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12549210.html)
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories. (2010a). Ecoinvent v2.2. *Ecoinvent*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).
- Swiss Centre for Life Cycle Inventories. (2010b). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Ecoinvent report No. 3. *Ecoinvent*. Recuperado el 4 de agosto del 2013 de <http://www.ecoinvent.ch>.