

## EVALUACIÓN AMBIENTAL PARA PROCESOS QUE USAN RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES COMO MATERIAS PRIMAS

MÓNICA JULIETH VALENCIA BOTERO\*  
CARLOS ARIEL CARDONA ALZATE\*

### RESUMEN

La industria creciente de los biocombustibles genera grandes cantidades de residuos que tienen alto potencial para la obtención de productos con alto valor agregado. En el presente documento se lleva a cabo el análisis de ciclo de vida (ACV) para el glicerol y el bagazo de caña de azúcar durante su producción y para su uso como materia prima en cuatro procesos diferentes. El objetivo fue determinar el impacto ambiental de los cuatro procesos, por medio de la cuantificación de gases de efecto invernadero (GEI) asociados al ciclo de vida. Los resultados indican que las emisiones de GEI asociadas a los procesos que utilizan el glicerol como materia prima son mayores que las emisiones de GEI para los procesos que involucran bagazo de caña de azúcar, pero que el aprovechamiento del glicerol podría considerarse más eficiente, ya que las emisiones por unidad de masa en el uso del glicerol son 75% inferiores a las emisiones calculadas para los procedimientos utilizando bagazo de caña como materia prima.

**PALABRAS CLAVES:** análisis de ciclo de vida (ACV); gases de efecto invernadero (GEI); glicerol; bagazo de caña de azúcar; polihidroxibutirato.

---

\* Candidata a M.Sc. en Ingeniería – Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Ingeniera química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Instituto de Biotecnología y Agroindustria, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia. mjvalenciab@unal.edu.co

\*\* Profesor titular, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Ingeniero químico, M.Sc. en Ingeniería Química y Ph.D. en Ingeniería Química, Academia Estatal Lomonosov de Ingeniería de la Química Fina, Rusia. Instituto de Biotecnología y Agroindustria, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales, Colombia. ccardonaal@unal.edu.co

### *Historia artículo*

Artículo recibido 24-V-2012

Aprobado 11-XII-2012

Discusión abierta hasta 01-VI-2014

## ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF PROCESSES USING BIOFUELS BYPRODUCTS LIKE FEEDSTOCK

### ABSTRACT

The industry of biofuels generates a lot of amounts of residues, which could be used to produce added-value products. In this work, a Life Cycle Assessment (LCA) methodological approach was used in the cases of glycerol and sugarcane bagasse during their productions and their uses as raw materials in four different processes. The aim of this work was to determine the environmental impact of those processes, by calculating the Greenhouse Gases (GHG) associated to their lifecycles. The results indicated that the GHG emissions from glycerol processes were larger than processes involving sugarcane bagasse. Nevertheless, the processes using glycerol as raw material could be considered as more efficient, since the GHG emissions associated with the glycerol use per mass unit were 75% lower than GHG emissions when the glycerol is used, with regard to sugarcane bagasse.

KEYWORDS: life cycle assessment; greenhouse gases; glycerol; sugarcane bagasse; polyhydroxybutyrate.

## AVALIAÇÃO AMBIENTAL PARA PROCESSOS QUE USAM RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DOS BIOCOMBUSTÍVEIS COMO MATÉRIAS-PRIMAS

### RESUMO

A indústria crescente dos biocombustíveis gera grandes quantidades de resíduos que têm alto potencial para a obtenção de produtos com alto valor agregado. No presente documento leva-se a cabo a análise de ciclo de vida (ACV) para o glicerol e o bagazo de cana de açúcar durante sua produção e para seu uso como matéria prima em quatro processos diferentes. O objetivo foi determinar o impacto ambiental dos quatro processos, por meio da quantificação de gases de efeito estufa (GEE) associados ao ciclo de vida. Os resultados indicam que as emissões de GEE associadas aos processos que utilizam o glicerol como matéria prima são maiores que as emissões de GEE para os processos que envolvem bagazo de cana de açúcar, mas que o aproveitamento do glicerol poderia ser considerado mais eficiente, já que as emissões por unidade de massa no uso do glicerol são 75% inferiores às emissões calculadas para os procedimentos utilizando bagazo de cana como matéria prima.

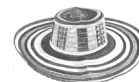
PALAVRAS-CÓDIGO: análise do ciclo de vida (ACV); gases de efeito estufa (GEE); glicerol; bagaço de cana; polihidroxibutirato.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos productivos, independientemente de su naturaleza (química, biológica o biotecnológica), generan cantidades apreciables de residuos cuya disposición final es el origen de serios problemas ambientales y económicos (Cardona *et al.*, 2004). Debido a la necesidad de mejorar la eficiencia de los procesos, de disminuir las cargas contaminantes y de reutilizar todo aquello que sea aprovechable, se han planteado esquemas de reciclaje, reconversión y uso de los residuos de procesos como materias primas para otros (Fatta *et al.*, 2003; Beach *et al.*,

2009; Kollikkata *et al.*, 2009). Las rutas de reutilización de residuos dependen de su caracterización físico-química.

Debido a las políticas energéticas de país, se producen biocombustibles desde el año 2005 y 2008 (bioetanol a partir de caña de azúcar y biodiésel a partir de palma de aceite, respectivamente). Con el fin de diversificar la matriz energética, disminuir las emisiones de gases de efecto estufa (GEE) y reducir la dependencia a las fuentes energéticas convencionales, se proyectó el incremento gradual del contenido en las mezclas (UPME, 2012). Sin embargo, la producción de biocombustibles implica el aumento en la cantidad de residuos generados: para el



caso del bioetanol producido a partir de caña de azúcar, se estima que 100 t de caña de azúcar cosechada produce 25 t de bagazo de caña; para el caso de biodiésel, se calcula que por cada 20,9 t de aceite crudo de palma se obtienen 2,9 t de glicerol (CUE, 2012).

La cadena de suministro actual está constituida de tal manera que el bagazo de caña de azúcar se quema en un sistema de turbina para producir vapor y electricidad; el glicerol se vende crudo o en algunas plantas se purifica. El aumento en las mezclas incrementará la producción de residuos y podría llegarse al escenario donde la cantidad producida exceda la demanda del uso convencional de los mismos. Por lo tanto, se hace necesario estudiar rutas alternativas de conversión, ya sea por una disposición final diferente a la actual, o esquemas donde se aumente el valor agregado de los residuos. Estas alternativas de proceso, adicionalmente, deben ser esquemas ambientalmente amigables, sobre todo en la reducción de emisiones de GEI, ya que este fue una de las motivaciones iniciales para la producción y uso de biocombustibles.

En el presente documento se utiliza el enfoque metodológico del análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar las emisiones de GEI producidas durante el ciclo de vida de los biocombustibles hasta la obtención del residuo principal asociado al biocombustible, a saber: bagazo, en el caso de producción de bioetanol a partir de

caña de azúcar y, glicerol, para biodiésel a partir de palma de aceite. Adicionalmente, se estudiaron técnicamente rutas que involucran el uso de estos residuos como materia prima para la obtención de productos de valor agregado. Los resultados indican que la evaluación del ciclo de vida tanto del bagazo de caña de azúcar como del glicerol está fuertemente influida por el tipo de proceso relacionado con la transformación del residuo.

## 2. PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES Y SUS SUBPRODUCTOS

Las tecnologías de producción de bioetanol y biodiésel son diferentes: el bioetanol se produce a través de un proceso biotecnológico (Börjesson, 2009) y, el biodiésel, es obtenido a través de una ruta química (Börjesson y Tufvesson, 2011). Sin embargo, ambos se agrupan en la misma cadena de abastecimiento, la cual está compuesta de las mismas etapas principales. (Figura 1): obtención de materias primas, normalmente de origen agronómico; proceso de producción, uso del biocombustible. El aprovechamiento de los residuos posibilita la interacción entre las principales etapas (Sánchez y Cardona, 2007; Smeets *et al.*, 2008; Hoefnagels *et al.*, 2010; Cardona *et al.*, 2011).

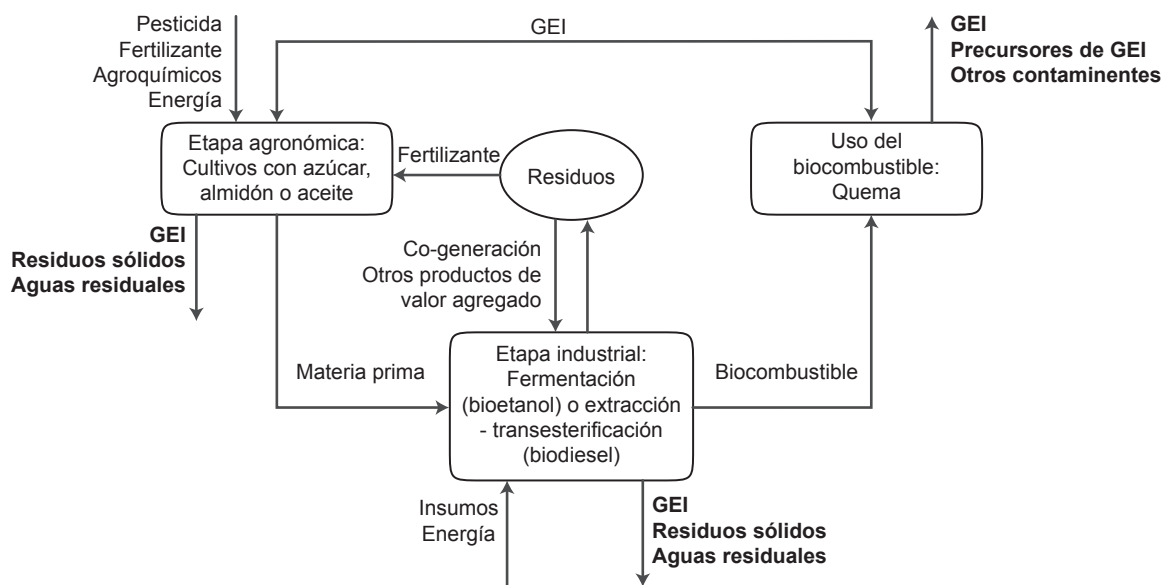


Figura 1. Ciclo de vida de los biocombustibles

El proceso de obtención de bioetanol a partir de caña de azúcar produce como residuo el bagazo de caña durante los primeros procedimientos de la etapa de transformación. Este bagazo puede utilizarse como formulación para alimento animal o, mayormente, como elemento para la cogeneración de energía y, por ende, reducción de costos energéticos (Ojeda *et al.*, 2011). En el caso del biodiésel, el glicerol es un subproducto común para cualquier materia prima de primera generación. A diferencia de los rastrojos y subproductos de la producción de etanol cuyo principal uso está referido a sistemas de cogeneración energética, el glicerol también puede ser empleado como materia prima en diferentes industrias como la farmacéutica, alimenticia y cosmética, entre otras (Posada y Cardona, 2010a).

### 3. ANÁLISIS CICLO DE VIDA (ACV)

Se refiere a un enfoque metodológico utilizado para la evaluación de procesos químicos, bioquímicos, biológicos y biotecnológicos, en relación con su desempeño másico, energético y/o ambiental (von Blottnitz y Curran, 2007). Llevar a cabo el ACV de un proceso implica la consecución de cuatro etapas: definición del sistema, análisis del inventario, evaluación de impactos e identificación de soluciones (Cardona *et al.*, 2007, Cherubini, 2010).

La primera etapa, correspondiente a la definición del sistema, es crítica para la obtención de los resultados, pues a partir de ella se define la unidad funcional y los procesos primarios y secundarios para considerar, afectando el análisis de inventario y las etapas subsecuentes. La transformación a variables de impacto puede ser, por ejemplo, la determinación de potenciales de impacto (potencial de calentamiento global, potencial de ecotoxicidad, potencial de oxidación fotoquímica, potencial de deterioro de ozono, entre otros) (von Blottnitz y Curran, 2007). Los resultados obtenidos permitirán la evaluación de cambios en los esquemas de producción e, incluso, una redefinición del sistema.

### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente trabajo se utiliza el ACV como metodología para cuantificar las emisiones de GEI

asociadas al ciclo de vida de los residuos provenientes de la industria de biocombustibles en Colombia, tomando en cuenta cuatro rutas tecnológicas diferentes, dos por cada residuo. La evaluación de las emisiones de GEI se dividió en dos partes:

- La cuantificación de las emisiones de GEI procedentes de los procedimientos para la obtención del bagazo de caña de azúcar y de glicerol. El bagazo de caña de azúcar es obtenido como subproducto del procesamiento de extracción de jugo de la caña de azúcar. El glicerol es el subproducto final en la producción de biodiésel.
- El uso del bagazo de caña de azúcar y del glicerol como materias primas para la obtención de productos con mayor valor agregado.

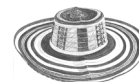
#### 4.1. Objetivo y alcance del análisis

El objetivo de este trabajo fue la comparación del desempeño ambiental de distintas opciones tecnológicas para el uso eficiente de residuos generados en la industria de producción de biocombustibles. Los sistemas incluyen los procedimientos relacionados con la obtención de la materia prima (residuos) y el proceso de transformación de los productos propuestos en las siguientes secciones, a saber: cogeneración y bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar, etanol y polihidroxibutirato a partir de glicerol. Para los procedimientos de obtención de residuos se tomaron en cuenta las tecnologías convencionales que se utilizan en el país; el uso de los residuos está basado en algunos trabajos previos de aprovechamiento eficiente de los mismos.

Para los casos en los cuales se producían GEI diferentes de dióxido de carbono (por ejemplo, en el sistema de cogeneración a partir de bagazo de caña de azúcar), se considera el óxido nitroso, el metano y el monóxido de carbono como GEI, con los potenciales de calentamiento global correspondientes a un tiempo horizontal de 100 años.

#### 4.2. Descripción del sistema: obtención del residuo

La tabla 1 muestra los parámetros utilizados para la obtención de cada uno de los residuos. Debido a que ambos residuos provienen del procesamiento de una materia prima agronómica, el análisis del sistema



comienza con el cultivo de estas materias primas. En el caso del bagazo de caña de azúcar, el sistema está compuesto por el cultivo y cosecha de la caña de azúcar (las consideraciones están resumidas en la tabla 1) y una etapa de acondicionamiento (molienda y extracción del jugo). Para el glicerol se tomó en cuenta el cultivo y cosecha de los racimos de fruto fresco de la palma de aceite, la extracción del aceite crudo de palma, la refinación del aceite, la transesterificación del aceite para producción de biodiésel y la recuperación del glicerol puro en una concentración del 88%.

**Tabla 1.** Parámetros tomados en cuenta en este estudio

Parámetro	Bagazo de caña de azúcar	Glicerol
Materia prima	Caña de azúcar	Palma de aceite
Fertilizante N-P-K	Incluye producción y uso	Incluye producción y uso
Pesticida	Incluye producción	Incluye producción
Unidad funcional	Un (1) kg de bagazo	Un (1) kg de glicerol
Tecnología	Cosecha manual. Molienda y obtención del bagazo de caña.	Cosecha manual. Extracción y transesterificación.

El cálculo de las emisiones de GEI de la etapa de cultivo y cosecha se llevó a cabo de acuerdo con los requerimientos de fertilizantes, pesticidas y cal propios de cada cultivo (CUE, 2012), utilizando el nivel dos explicado en las directrices del Panel Inter-gubernamental sobre Cambio Climático (Cherubini *et al.*, 2009). Los factores de emisión para la producción del fertilizante fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent (Ecoinvent, 2006). Se asumió que la planta de producción del biocombustible está cerca del campo, con una distancia no mayor a 30 km del cultivo (CUE, 2012). En el caso de la transformación, los balances de materia y energía fueron obtenidos a través de simulación utilizando el *software* Aspen Plus versión 7.2.

### 4.3. Descripción del sistema: uso del residuo como materia prima de otros procesos

Para cada uno de los residuos se evaluaron dos posibles rutas de transformación. El bagazo de caña de azúcar se estudió para los procesos de producción de energía directamente en un sistema de cogeneración y para la producción de bioetanol. El glicerol se utilizó para la producción de bioetanol y polihidroxibutirato (PHB). En todos los casos la simulación del proceso fue llevada a cabo utilizando Aspen Plus versión 7.2, Matlab versión R2008b y Excel 2007. A continuación, se describe cada uno de los sistemas utilizando los parámetros reportados en trabajos previos (Posada *et al.*, 2009; Cardona *et al.*, 2010; Posada y Cardona, 2010b; Posada *et al.*, 2011; Posada *et al.*, 2012):

- Bagazo de caña para producción de vapor y electricidad por combustión directa, tal como se lleva a cabo en los ingenios azucareros en la actualidad.
- Producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar: pretratamiento con ácido diluido, detoxificación por *overliming* con cal, fermentación y cofermentación simultáneas con *Zimmomonas mobilis* ZM4 ( $\rho$ ZB5), separación por destilación y deshidratación con tamices moleculares hasta llegar a una concentración de 99,5% en masa.
- Producción de bioetanol a partir de glicerol: el proceso comprende la purificación del glicerol por destilación, fermentación para la producción del etanol utilizando *Escherichia coli*, separación del bioetanol por destilación y deshidratación con tamices moleculares hasta llegar a la concentración de 99,5% en masa.
- Producción de PHB a partir de glicerol: el proceso consiste en el acondicionamiento de la materia prima, fermentación con *Bacillum megaterium*, digestión para la liberación del PHB y purificación del producto por lavado y destilación.

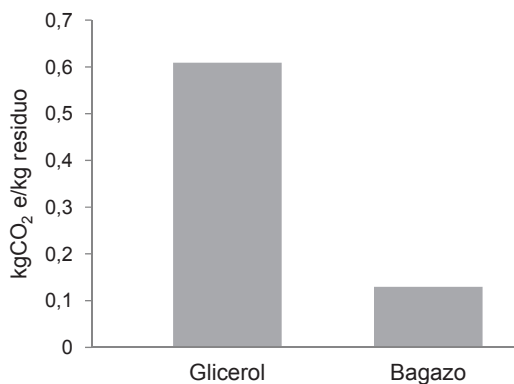
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se muestran las emisiones de GEI durante la producción del bagazo y del glicerol. Las emisiones relacionadas con la producción de glicerol son alrededor de cinco veces mayores a las emisiones en la obtención de bagazo de caña de azúcar, debido

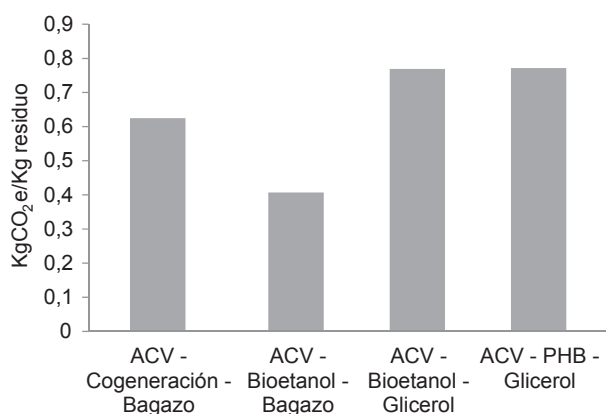


a que la obtención de glicerol requiere mayor cantidad de energía que la producción de bagazo de caña de azúcar lo que representa mayores emisiones de gases efecto invernadero.

En la figura 3 se muestran los resultados para las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida para los cuatro procesos en estudio (incluyendo la etapa de obtención del residuo). Las emisiones correspondientes a los dos procesos los cuales usan glicerol son muy similares, pero las mayores emisiones se presentan en el ACV para la producción de PHB a partir de glicerol (2% superiores con respecto a las emisiones del ACV del bioetanol a partir de glicerol). Las menores emisiones se obtienen para el sistema de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar.



**Figura 2.** Emisiones de la producción de bagazo y glicerol



**Figura 3.** Emisiones de GEI para todo el ciclo de vida para los cuatro procesos en estudio

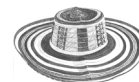
Comparando los resultados que corresponden a la segunda parte de la evaluación (los procesos partiendo del residuo), el uso de glicerol como materia prima genera menos emisiones de GEI (0,16-0,17 kgCO<sub>2</sub>e/kg residuo), con respecto a los procesos donde se involucra el bagazo (0,41-0,62 kgCO<sub>2</sub>e/kg residuo).

Es de anotar que, aunque tres de los procesos son fermentativos (por lo que se esperaría emisiones relacionadas con este procedimiento) el uso del glicerol como sustrato implica rutas bioquímicas en las cuales no se generan dióxido de carbono, lo que disminuye drásticamente las emisiones de GEI y el conteo está relacionado en su mayoría a las emisiones del balance de energía. En contraste, el uso de bagazo de caña de azúcar para los procesos propuestos genera grandes cantidades debido a la fermentación y al quemado.

Los resultados del procedimiento de simulación del uso de bagazo de caña de azúcar para el sistema de generación de vapor y electricidad muestran que la participación de los gases en las emisiones de GEI se debe a la presentación de dióxido de carbono, óxido nitroso y monóxido de carbono.

Los subproductos son importantes en el contexto de un proceso porque normalmente su composición química los habilita para ser materias primas de otros procesos, como son los casos presentados en este trabajo. Si estos nuevos procedimientos se toman en cuenta dentro de la cadena de suministro del producto al cual está asociado el subproducto, el balance de emisiones de GEI dentro de la cadena suministro podría cambiar positivamente. Por ejemplo, si la cogeneración de energía se incorpora al proceso de producción de bioetanol (utilizando todo el bagazo, en lugar de la mezcla bagazo-carbón que usan los ingenios azucareros colombianos (CUE, 2012)), la reducción global de emisiones sería alrededor del 70%, en lugar de 68% (CUE, 2012).

En el caso del glicerol, como el uso no está directamente relacionado con el proceso, la reducción de emisiones no se evidencia fácilmente. La ventaja de utilizar glicerol para la producción de bioetanol es que podría suplir los requerimientos energéticos de la planta de producción de biodiésel y, a su vez, dinamizar el mercado del glicerol que, como se dijo anteriormente, se ha visto afectado por el incremento de la producción de biodiésel.



## 6. CONCLUSIÓN

En el presente documento se cuantificaron las emisiones de GEI del ciclo de vida de los subproductos principales en el procesamiento de los biocombustibles colombianos. Los resultados indican que las emisiones de GEI asociadas a la obtención del glicerol son mayores, debido a la etapa del proceso donde se obtienen. Así mismo, las emisiones de GEI asociadas al uso del bagazo de caña de azúcar pueden ser compensadas por sistemas de cogeneración, ahorrando, incluso, emisiones de los balances de materia y energía. Revisando los procedimientos del uso de glicerol, las emisiones por unidad de masa del residuo son menores que las emisiones asociadas al uso del bagazo de caña de azúcar. Este tipo de enfoques, en los cuales los residuos de las industrias pueden aprovecharse dentro de las mismas, direcciona al concepto de biorrefinería, el cual puede ser una de las soluciones para la verdadera sostenibilidad de un proceso, cuando cada una de las sustancias involucradas es aprovechada al máximo, dejando pocos residuos y, en cambio, gran cantidad de productos de valor agregado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales y a la Gobernación de Caldas por el soporte financiero dado a este trabajo.

## REFERENCIAS

- Beach, E. S.; Cui, Z. and Anastas, P. T. (2009). "Green Chemistry: A design framework for sustainability", *Energy & Environmental Science*, vol. 2, No. 10, pp. 1038-1049.
- Börjesson, P. (2009). "Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective - What determines this?", *Applied Energy*, vol. 86, No. 5 (mayo), pp. 589-594.
- Börjesson, P. and Tufvesson, L. M. (2011). "Agricultural crop-based biofuels - resource efficiency and environmental performance including direct land use changes", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, No. 2-3 (enero-febrero), pp. 108-120.
- Cardona, C. A.; Posada, J. A. y Quintero, J. A. (2010). *Aprovechamiento y subproductos y residuos agroindustriales:*

*glicerina y lignocelulósicos*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales.

- Cardona, C. A.; Sánchez, D. L. y Sánchez, O. J. (2007). "Análisis de ciclo de vida y su aplicación en la producción de bioetanol: una aproximación cualitativa", *Revista Universidad EAFIT*, vol 43, No. 146 (abril-junio), pp. 59-79.
- Cardona, C. A.; Sánchez, O. J.; Ramírez, J. A. y Alzate, L. E. (2004). "Biodegradación de residuos orgánicos de plazas de mercado", *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. VI, No. 2, pp. 78-89.
- Cardona, C. A.; Valencia, M. J. and Quintero, J. A. (2011). "Influence of biofuels production and use on the climate change". *World Renewable Energy Congress 2011 - Sweden*. mayo 08-13. Universidad Linköping. Suecia.
- Cherubini, F. (2010). "GHG balances of bioenergy systems - Overview of key steps in the production chain and methodological concerns", *Renewable Energy*, vol. 35, No. 7 (julio), pp. 1565-1573.
- Cherubini, F.; Bird, N. D.; Cowie, A.; Jungmeier, G.; Schlamadinger, B. and Woess-Gallasch, S. (2009). "Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, No. 8 (junio), pp. 434-447.
- Cue. (2012). "Capítulo II: Estudio ACV – Impacto Ambiental". En: *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo, Ministerio de Minas y Energía.
- Ecoinvent (2006). *Ecoinvent database*. Switzerland, Swiss Center for Life Cycle Inventory.
- Fatta, D.; Marneri, M.; Papadopoulos, A.; Moustakas, K.; Haralambous, K. J. and Loizidou, M. (2003). "Development of guidelines on best practices for the slaughter of animals in Cyprus", *Waste Management*, vol. 23, No. 2, pp. 157-165.
- Hoefnagels, R.; Smeets, E. and Faaij, A. (2010). "Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, No. 7, (septiembre), pp. 1661-1694.
- Kollikkathara, N.; Feng, H. and Stern, E. (2009). "A purview of waste management evolution: Special emphasis on USA", *Waste Management*, vol. 29, No. 2, pp. 974-985.
- Ojeda, K.; Ávila, O.; Suárez, J. and Kafarov, V. (2011). "Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production-Part 1", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, No. 3 (marzo), pp. 270-279.

- Posada, J. A. y Cardona, C. A. (2010a). "Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiésel", *Ingeniería y Universidad*, vol. 14, No. 1 (enero-junio), pp. 9-28.
- Posada, J. A. and Cardona, C. A. (2010b). "Design and analysis of fuel ethanol production from raw glycerol", *Energy*, vol. 35, No. 12 (diciembre), pp. 5286-5293.
- Posada, J. A.; Cardona, C. A.; Cetina, D. M. and Orrego, C. E. (2009). "Capítulo 6. Bioglicerol como materia prima para la obtención de productos de valor agregado" En: *Avances investigativos en la producción de biocombustibles*, editado por C. A. Cardona and C. E. Orrego. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales. pp. 102-122.
- Posada, J. A.; Naranjo, J. M.; López, J. A.; Higueta, J. C. and Cardona, C. A. (2011). "Design and analysis of poly-3-hydroxybutyrate production processes from crude glycerol", *Process Biochemistry*, vol. 46, No. 1 (Enero), pp. 310-317.
- Posada, J. A.; Rincón, L. E. and Cardona, C. A. (2012) "Design and Analysis of Biorefineries Based on Raw Glycerol: Addressing the Glycerol Problem", *Bioresource Technology*, vol. 111, No. 0, pp. 282-293.
- Sánchez, O. J. y Cardona Alzate C. A. (2007). *Producción de alcohol carburante. Una alternativa para el desarrollo agroindustrial*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Manizales. Smeets, E.; Junginger, M.; Faaij, A.; Walter, A.; Dolzan, P. and Turkenburg, W. (2008). "The sustainability of Brazilian ethanol-An assessment of the possibilities of certified production", *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, No. 8 (agosto), pp. 781-813.
- UPME. (2012). *Proyección de demanda de biocombustibles líquidos y GNV en Colombia*. Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Ministerio de Minas y Energía.
- Von Blottnitz, H. and Curran, M. A. (2007). "A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective", *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, No. 7, (mayo), pp. 607-619.