

**Evaluación de rutas alternativas de aprovechamiento de la glicerina obtenida en la producción de biodiésel: una revisión**

Evaluation of using alternative routes of glycerin obtained in the biodiesel production: a review

Jorge Augusto Hernández Mora\*

Juan Camilo Acevedo Páez\*\*

*Universidad de Santander, Sede Cúcuta (Colombia)*

Carlos Francisco Valdés Rentería\*\*\*

*Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (Colombia)*

Fausto René Posso Rivera\*\*\*\*

*Universidad de Los Andes, Sede San Cristóbal (Venezuela)*

\* Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación Eureka UDES. Ingeniero químico. [jo.hernandez@mail.udes.edu.co](mailto:jo.hernandez@mail.udes.edu.co)

\*\* Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación Eureka UDES. Magíster en Gestión Integrada de la Calidad, Seguridad y Medio ambiente. [industrialcuc@campus.udes.edu.co](mailto:industrialcuc@campus.udes.edu.co)

\*\*\* Grupo de Investigación TAYEA, Facultad de Minas. Magíster en Ingeniería Química. [cfovaldes@unal.edu.co](mailto:cfovaldes@unal.edu.co)

\*\*\*\* Profesor titular, Departamento de Ciencias, Táchira, Venezuela. Doctor en Ingeniería Industrial. [fausto@ula.ve](mailto:fausto@ula.ve)

**Correspondencia:** Jorge Augusto Hernández Mora, Teléfono: 5791008 Ext: 227, Universidad de Santander, Sede Cúcuta, Av. 4 Esquina Calle 10N Urb. El Bosque, Cúcuta.

## Resumen

Producto del creciente mercado del biodiésel, se genera un incremento en la oferta de glicerina sin refinar, obtenida como subproducto del proceso, lo que ha motivado el estudio de su utilización. En este trabajo se aplicó un método cualitativo por puntos, considerando tres factores para clasificar las opciones de aprovechamiento de glicerina: (i) análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas, Amenazas), (ii) análisis de costos y (iii) evaluación del impacto ambiental. A cada factor se asignó una ponderación cuyo resultado permite concluir sobre la viabilidad de cada alternativa estudiada para una planta de producción de biodiésel de 20.000 l/día, que genera aproximadamente 2000 kg/día de glicerina cruda. Como resultado se obtiene un orden jerárquico de factibilidad de implementación de las alternativas en el que el uso de la glicerina cruda en la producción de fertilizantes constituye la mejor opción, ya que mejora la fertilidad del suelo con la incorporación de subproductos y residuos agroindustriales, y es una de las opciones de menor costo de implementación. El método de evaluación aplicado resulta apropiado para una estimación inicial de los diferentes usos de la glicerina cruda, aunque posteriormente requiere un análisis más detallado de la mejor opción.

**Palabras clave:** biodiésel, costos, DOFA, glicerina cruda, ingeniería verde.

## Abstract

As a result of the growing biodiesel market, an increase in the supply of crude glycerin obtained as a byproduct of the process is occurring. This has motivated the study of its use. In this work, we applied a Qualitative Method for Points, considering three factors to classify the options of glycerin utilization: (i). SWOT analysis (Strengths, Weaknesses, Opportunities y Threats), (ii). Cost analysis and (iii). Environmental impact assessment. Each factor was assigned a weighting and whose result establishes the feasibility of each alternative studied for a biodiesel production plant of 20,000 l/day, which generates about 2000 kg /day of crude glycerin. The result is a hierarchy of feasibility of implementing the alternatives, in which the use of crude glycerin in the production of fertilizers is the best option, since it improves soil fertility by incorporating byproducts and agro-industrial waste, It is also one of the lower cost options for implementation. The evaluation method is suitable for an initial estimate of the different uses of crude glycerin, requiring a later and more detailed analysis of the best option.

**Keywords:** biodiesel, costs, crude glycerin, green engineering, SWOT.

*Fecha de recepción:* 20 de agosto de 2013  
*Fecha de aceptación:* 18 de noviembre de 2014

## INTRODUCCIÓN

En un contexto global de reservas de petróleo acotadas y de una creciente demanda para disminuir los serios problemas de contaminación ambiental asociados al uso de los derivados del petróleo y otras fuentes fósiles, en los últimos años se ha intensificado la búsqueda y desarrollo de fuentes combustibles de tipo renovable que permitan reemplazar los combustibles fósiles de manera gradual y cumplir con las estrictas regulaciones ambientales existentes en una gran cantidad de países [1]. Con esta y otras argumentaciones, de tipo social y económico, surgen los biocombustibles.

De hecho, numerosos países han implementado una legislación que obliga a la producción y comercialización de un combustible que contenga cantidades preestablecidas de biocombustible, en mezclas con derivados del petróleo, y que además contempla un incremento gradual de tales cantidades para los próximos años[2].

Para el caso particular de la producción de biodiésel, cuando se realiza mediante el proceso convencional de transesterificación de aceites, se obtiene la glicerina como producto secundario, en aproximadamente un 10% de la cantidad de aceite utilizado [3], lo que, en concordancia con el creciente mercado de este sector, también produce un aumento en la oferta de glicerina [4]. La escala de producción considerada corresponde a una planta productiva de biodiésel con una capacidad de 20.000 l/día, correspondiente a la escala de las plantas entregadas por el Estado colombiano con el fin de fortalecer la producción de biodiésel a partir de aceite de palma, de la que se obtendrían aproximadamente 2.000 kg/día de glicerina. En este escenario, resulta interesante evaluar nuevas alternativas de uso de la glicerina de baja calidad de una forma sostenible, y generar con ello un valor agregado a la producción de biodiésel [5]. Entre las diferentes alternativas analizadas, se evaluó el uso de glicerina como energético [6], como suplemento alimenticio [7] y como materia prima para la industria química y fertilizantes [8]; aunque la evaluación de un conjunto de posibles usos de la glicerina no procesada es el principal propósito de este artículo.

## GLICERINA COMO SUBPRODUCTO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

La glicerina cruda de la producción de biodiésel presenta una concentración máxima del 60% de glicerina, es de poco valor, ya que contiene gran cantidad de jabones, catalizador alcalino y metanol [9], y debido a este último compuesto es ambientalmente peligrosa; por tanto, para poder aprovecharla, debe llevarse al menos a un grado técnico (85% p/p de pureza) [10].

Una alternativa común es someterla a un proceso de acidulación con ácido fosfórico para separar las tres fases presentes: la glicerina (con el metanol aún disuelto); los ácidos grasos libres (provenientes del aceite); y una fase sólida consistente de sales formadas por la reacción entre el catalizador alcalino y el ácido agregado [11]. La glicerina resultante debe ser separada del metanol hasta alcanzar una pureza de aproximadamente 85% (p/p). En esta condición ya está lista para su uso directo o como insumo en otros procesos industriales [12].

### ALTERNATIVAS DE USO

Se consideraron 12 alternativas de uso de la glicerina, agrupadas según su condición: como energético (combustión directa, pirólisis, producción de bioetanol, biogás e hidrógeno, aditivo de combustibles); como suplemento alimenticio y como insumo para la industria química y de fertilizantes. A continuación se presenta la descripción técnica de cada uno de estos procesos productivos.

#### Combustión directa en calderas

La combustión de glicerina con fuel oil reduce las emisiones de  $\text{SO}_2$  hasta seis veces menos que las producidas en la combustión de fuel oil puro. Además, las concentraciones de  $\text{NO}_x$  en los gases de combustión caen en el rango de 250-280 mg/m<sup>3</sup> y la emisión de partículas también disminuye significativamente [13]. La glicerina debe quemarse mezclada con el diésel, ya que por su composición, y a pesar de su bajo poder calorífico, es incapaz de mantener estable la llama en un quemador convencional, por lo tanto, requiere de la utilización de quemadores especiales [14]. Según el tipo de quemador utilizado, la presencia de sales puede causar problemas de corrosión en las

boquillas de los quemadores[15]. Además, los quemadores deben permitir la combustión completa a una temperatura cercana a 1.000 °C para evitar la emisión de vapores tóxicos de acroleína, que se producen al quemar la glicerina a temperaturas entre 200 y 300 °C [16].

### **Combustión de aglomerados tipo pellets y/o briquetas**

Se ha explorado la combinación de residuos de áreas productivas agrícolas (biomasa) y la glicerina para la producción de pellets y briquetas [17]. Al respecto, Raslavicius [18] evaluó la utilización de glicerina y residuos de madera en la producción de briquetas combustibles, y encontró que un 10% de glicerina cruda no afecta las propiedades físicomecánicas de las briquetas. Asimismo, Sricharoenchaikul *et al.* [19] elaboraron pellets con adición de glicerina como adhesivo o aglutinante, y obtuvieron que al aumentar la concentración de glicerina por encima del 10%, se incrementaba la tasa de descomposición, la contracción y la porosidad de los pellets utilizados. Por su parte, Chaiyaomporn y Chavalparit [20] utilizaron fibra y cuesco de palma como materia prima para producir pellets como combustible, con glicerina como adhesivo o aglomerante, y encontraron la relación óptima 50:10:40, correspondiente a fibra de palma, glicerina y agua, respectivamente.

### **Pirólisis**

La pirólisis de la glicerina constituye una vía con un alto potencial para la producción de gas de síntesis (una mezcla de CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y de hidrógeno, dependiendo de las condiciones del proceso y tecnologías utilizadas; sobre ello, Valliyappan *et al.* [21] observaron que la temperatura, las tasas de flujo de gas de arrastre y el diámetro de partícula de material del lecho empacado tenían profundos efectos en la conversión de glicerina, así como en la distribución del producto. El mayor inconveniente de la pirólisis de glicerina es la formación de un residuo sólido que puede obstruir el sistema, por lo tanto, suele ser necesario un tratamiento posterior o la regeneración del catalizador. Una posible manera de resolver este problema es el empleo de craqueo catalítico en lecho fluidizado (FCC) en la pirólisis de glicerina [22]. Igualmente, Fernández *et al.* [23] estudiaron la pirólisis de glicerina sobre catalizadores de carbón activado: el efecto catalítico fue probado y comparado con fragmentos de vidrio de cuarzo como material de empaque en un reactor de lecho fijo. De igual forma, Skoulou

*et al.* [24] sugieren que la pirólisis combinada de glicerina cruda con la biomasa puede producir un combustible gaseoso rico en H<sub>2</sub>. De esta forma, el aprovechamiento de la glicerina por medio de tratamientos termoquímicos podría ser una opción viable para la valorización de la glicerina en plantas de biodiésel a baja escala.

### **Suplemento alimenticio directo**

Sobre este uso alternativo, Wang *et al.* [25] demuestran que la glicerina es un componente estructural importante de los triglicéridos y fosfolípidos, que proporciona energía para el metabolismo celular y puede ser convertido en glucosa en el hígado y riñones. También Kovács *et al.* [26] determinan que la digestibilidad aparente y la energía metabolizable no se ve afectada al incluir la glicerina en la dieta de alimentación de cerdos de engorde. De la misma manera, Kim *et al.* [27] concluyen que la suplementación dietética con glicerina cruda no tiene efectos sobre el tiempo de tránsito intestinal de las aves y sobre la absorción de nutrientes en las dietas de pollos de engorde. Igualmente, en el caso del ganado vacuno se evaluaron los efectos de los suplementos de glicerina en vacas lecheras Holstein: permanecen constantes el consumo de alimento, la producción y la composición de la leche, y se presenta un incremento en la glucosa como fuente de energía para el metabolismo celular [28]. Por el contrario, DeFrain *et al.* [29] y Ogborn [30] afirman que no se revela mejoría alguna de la suplementación con glicerina de la dieta alimenticia de vacas periparturientas en etapa de lactancia. La glicerina con una concentración de 5% inhibe el crecimiento y la actividad celulolítica de las bacterias rumiales, lo que evidencia que esta alternativa requiere de una mayor investigación y que su implementación aún debe ser evaluada.

### **Suplemento alimenticio indirecto (pellets)**

La glicerina puede incorporarse con éxito a los concentrados peletizados. Südekum *et al.* [31] realizaron un conjunto de evaluaciones en las que se añadía glicerina al concentrado y se lograba estabilizar la calidad higiénica de los compuestos granulados sin comprometer la calidad física de los pellets. De igual forma, Shields *et al.* [32] incorporaron la glicerina en la conformación de pellets para la dieta de lechones, con lo que mejoraron la fluidez de la harina, la eficiencia de la compactación y la conservación del pellet.

## Bioetanol

En varias investigaciones, la glicerina se ha propuesto como materia prima en reemplazo del maíz y la caña de azúcar para la fermentación anaeróbica, como una alternativa para la producción de bioetanol, a partir de la cual se ha obtenido etanol al 99,5% de pureza, Dharmadi *et al.* [33]. Esto es concordante con los estudios de Ito *et al.* [34], quienes utilizaron un proceso en etapas. Buscando conocer la fenomenología del proceso, Nwachukwu *et al.* [35] estudiaron una cepa de *Enterobacter aerogenes*, diseñada para la conversión eficiente de glicerina en etanol, y llegaron a obtener 1,02 mol etanol/mol de glicerina después de 120 horas de proceso. Por su parte, Yazdani y González [36] identificaron las condiciones ambientales que permiten la fermentación metabólica de glicerina en *Escherichia coli*, junto con las vías y los mecanismos que median este proceso, para lograr la conversión eficiente de glicerina en etanol a un costo menor que los procesos tradicionales que utilizan la caña de azúcar.

## Hidrógeno

El hidrógeno es una fuente limpia de energía sin subproductos nocivos de su combustión. La glicerina cruda generada durante el proceso de fabricación de biodiésel puede ser utilizada como materia prima para la producción de hidrógeno mediante procesos microbianos [37]. Asimismo, Mangayil *et al.* [38] investigaron los parámetros óptimos de cultivo para la producción de H<sub>2</sub>, tales como pH inicial, temperatura de cultivo y la concentración de glicerina cruda (6,5; 40 °C y 1 g/L, respectivamente), con lo que produjeron 1,1±0,1 mol H<sub>2</sub>/mol glicerina consumida. De igual forma, Markov *et al.* [39] utilizaron la glicerina como sustrato para la producción de hidrógeno por *Enterobacter aerogenes* en biorreactores. La tasa de producción de H<sub>2</sub> más alta se observó con una adición de 2% de glicerina en el medio de cultivo.

## Producción de 1, 3-propanodiol

El 1,3-propanodiol (1,3-PD) es un compuesto orgánico simple usado como insumo para múltiples aplicaciones industriales debido a sus propiedades especiales. El 1,3-PD tiene un papel importante en muchas reacciones de síntesis, especialmente policondensaciones, como la síntesis de poliésteres y poliéteres [40]. Este hecho ha impulsado el estudio de la conversión de

glicerina a 1,3-PD por diferentes especies de bacterias, tales como la *Klebsiella pneumoniae* [41], *Citrobacter freundii* [42] y *Clostridium spp.* [43], para la su implementación dentro del concepto de las biorrefinerías. De igual forma, el 1,3-PD es sintetizado por vía química y biológica, con predominio de la ruta química. El proceso químico requiere catalizadores caros, de alta temperatura, alta presión y medidas de seguridad extremas de operación. El proceso fermentativo utiliza materias primas relativamente económicas comparado con el proceso químico [44]. Una de las aplicaciones de mayor éxito consiste en la formulación lograda por Pachauri y He [45] para la producción de polímeros llamados Corterra, pertenecientes a la familia de los poliésteres aromáticos, conocidos generalmente como PTT (Politrimetileno tereftalato).

### Producción de ácido succínico

El ácido succínico puede ser utilizado para la fabricación de resinas sintéticas y polímeros biodegradables y como producto intermedio para la síntesis química [46]. Se ha desarrollado la obtención de ácido succínico por la fermentación de glicerina por medio de *Actinobacillus succiniciproducens* en biorreactores por lotes [47]. Asimismo, en estudios realizados por Roca *et al.* [48] se obtuvo ácido succínico por la fermentación de *Anaerobiospirillum succinognenes*, utilizando glicerina en cultivos batch y cultivos continuos, con el fin de obtener una cepa capaz de mantener el rendimiento de la producción de ácido succínico y de alta productividad.

### Biogás

Otra alternativa de la utilización de la glicerina es la producción de biogás anaeróbica en biodigestores. Por su alto contenido de carbono fácilmente degradable, la glicerina tiene propiedades favorables para la digestión en procesos productivos por lotes y continuos [49]. La glicerina se asocia con los residuos orgánicos con alto contenido en nitrógeno como el estiércol porcino, actuando como cosustrato en el proceso de digestión [50]. Además, Hutňan *et al.* [51] investigan las posibilidades de la producción de biogás a partir de glicerina cruda, concluyen que la operación por degradación anaeróbica mesófila de glicerina como único sustrato orgánico es viable y que la operación del proceso es muy sensible al exceso de carga orgánica del reactor. Siles *et al.* [52] emplearon tres porcentajes de glicerina (2%, 5%



y 8%) para observar su efecto en la producción de biogás, obtuvieron que en el 8% existía un colapso en la actividad bacteriana y concluyeron que el punto óptimo se encuentra entre el 5 y el 8% de glicerina. Esto concuerda con el estudio de Castrillón *et al.* [53], quienes consiguieron los mejores resultados de producción de biogás, en condiciones termófilas, con mezclas sometidas a ultrasonidos de estiércol de ganado con un 6% de glicerina añadida, y en condiciones mesófilas, con la adición de 4% de glicerina al estiércol, lo cual aumentó la producción de biogás hasta en un 400%.

### **Aditivo para combustibles (GTBE)**

Otra de las aplicaciones atractivas de la glicerina es la producción de aditivos oxigenados, tal como la síntesis del GTBE (gliceril-tert-butil-eter) mediante una reacción de eterificación [54]. Esto se fundamenta en la existencia de una gran variedad de aditivos oxigenados con alto contenido de mono, di y tri-éteres que actúan como mejoradores de la combustión de combustibles diésel (biodiésel, diésel y sus mezclas) al aportar oxígeno. Una ventaja adicional es la disminución de la emisión de partículas contaminantes en forma de humo y hollín [55]. Asimismo, la transformación de glicerina en nuevos compuestos oxigenados como el GTBE fue estudiada por Jaecker-Voirol *et al.* [56]; estos compuestos fueron utilizados como aditivos para combustible diésel y mostraron una disminución de emisiones contaminantes en motores nuevos

### **Fertilizante**

En estudios realizados por Alotaibi y Schoneau [57] sobre los efectos de tipo biológico, microbiológico, enzimático y tóxico en las plantas, observaron que cuando se añade glicerina al suelo, se obtiene una respuesta positiva significativa de los parámetros microbianos que indican que tal adición tiene un efecto beneficioso sobre la calidad del suelo, en lo referente al crecimiento y actividad microbiana. Posteriormente, Alotaibi y Schoneau [58] establecen una forma posible para la regulación de la fertilización de nitrógeno mediante la adición de glicerina como una fuente de carbono disponible para la relación C:N, que mejora la actividad microbiana y reduce las emisiones de  $N_2O$ . De igual forma, Qian *et al.* [59] señalan que la glicerina puede incrementar el contenido de carbono orgánico del suelo al mezclarla con un fertilizante nitrogenado, lo que proporciona el nitrógeno

suficiente para satisfacer los requerimientos de plantas y microbios durante la descomposición. Igualmente, Tolner *et al.* [60] utilizaron glicerina en suelos y obtuvieron como resultado una disminución considerable de la lixiviación de nitratos en aguas subterráneas.

## EVALUACIÓN DE LOS USOS ALTERNATIVOS DE LA GLICERINA

Encontrar usos alternativos de la glicerina cruda derivada de la industria del biodiésel es un campo de estudio abierto, ya que la selección e implementación de cualquiera de las alternativas requiere un análisis particular que permita concluir sobre su viabilidad[61].

### Análisis DOFA

El análisis DOFA permite diagnosticar las diferentes alternativas a partir de la identificación de factores internos (fortalezas y debilidades) y factores externos (oportunidades y amenazas) de la utilización de la glicerina como energético, suplemento alimenticio e insumo para la industria química.

Tabla 1. Análisis DOFA

| ALTERNATIVAS  | FORTALEZAS   | DEBILIDADES  |
|---|--|--|
| Combustible para calderas, pellets combustible, pirólisis | <p>Generación de vapor y/o suministro térmico.</p> <p>Para la conformación de pellets, se utiliza fibra y cáscara, subproductos de la extracción de aceite de palma y actividades agrícolas.</p> <p>El proceso no requiere de entrada de calor o cambio químico.</p>   | <p>Bajo poder calorífico.</p> <p>Generación de acroleína (&lt; 280°C).</p> <p>Presencia de sales que afectan la combustión.</p> <p>En el caso de los pellets combustible, el consumo de potencia y maquinaria utilizada es elevado, al requerirse un gran esfuerzo para su conformación.</p> <p>La tecnología requiere personal especializado y su infraestructura es de alto costo.</p> |
| Biogás  | <p>Los estudios desarrollados en diferentes ámbitos muestran resultados favorables.</p> <p>Eliminación biológica de residuos orgánicos.</p>  | <p>El proceso no utiliza gran cantidad de glicerina, un 8% de glicerina ocasiona una disminución en la producción de biogás.</p> <p>Tecnología altamente especializada, de poca aplicación industrial.</p>   |
| Bioetanol, hidrógeno, 1,3 - propanodiol, ácido succínico  | <p>Mercado creciente por ser productos con un alto valor comercial.</p> <p>Producto de alto costo proveniente de materia prima de bajo valor comercial.</p> <p>El propanodiol y el ácido succínico son utilizados para la fabricación de resinas sintéticas y polímeros biodegradables.</p> <p>El bioetanol producido tiene baja toxicidad y fácil manejo.</p> | <p>Son tecnologías que requieren gran inversión, alta capacidad de producción y estricto control para asegurar su funcionalidad y rendimiento.</p> <p>Mercado especializado, su principal uso es como precursor de otros productos de uso limitado.</p> <p>Bioetanol, presenta una menor densidad de energía por unidad de volumen que las naftas.</p>                                   |

Continúa...

| ALTERNATIVAS  | FORTALEZAS  | DEBILIDADES   |
|---|---|---|
| Alimentación animal                                       | <p>Es la alternativa más barata y de mayor disponibilidad para la alimentación animal.</p> <p>La adición en pellets produce inhibición del crecimiento fúngico, por lo cual adquiere propiedades preservativas.</p> <p>El proceso no requiere de calor o cambio químico; por tanto, su fabricación es más rápida, comparada con otros procesos.</p> | <p>El proceso utiliza un máximo del 10% de glicerina en la alimentación</p> <p>La investigación aún se encuentra en fase de desarrollo, por lo cual es una alternativa de mediano y largo plazo.</p>  |
| Aditivo para combustibles (GTBE)                          | <p>Estudios demuestran una mejora de la eficiencia de la combustión de combustibles diésel.</p> <p>Su uso en la combustión de diésel disminuye la producción de material particulado.</p>   | <p>Uso y manejo de reactivos e insumos de alto costo y manejo especializado.</p> <p>Procesos que requieren gran inversión, alta capacidad de producción y estricto control para asegurar su funcionalidad y rendimiento.</p>  |
| Fertilizantes   | <p>El proceso no requiere adición de calor o cambio químico, por tanto, el proceso de producción es más corto al compararla con otros procesos.</p> <p>Evita la lixiviación de nitratos a aguas subterráneas.</p>   | <p>Tecnología aún en proceso de investigación, tal que su aplicación industrial es aún incipiente.</p>  |
| ALTERNATIVAS  | OPORTUNIDADES   | AMENAZAS  |
| Combustible para calderas, pellets combustible, pirólisis | <p>Ahorro en calderas auxiliares.</p> <p>Generación de vapor y energía eléctrica.</p> <p>Permite dar respuesta efectiva a problemas de disposición de residuos.</p> <p>Utilización de los productos de la pirólisis para la generación de vapor y energía eléctrica.</p>  | <p>Riesgo ambiental debido a emisiones atmosféricas de sustancias tóxicas, tales como la acroleína y el metanol.</p> <p>Alto costo del quemador especial de glicerina.</p> <p>En la pirólisis de glicerina, el combustible producido puede no compensar la energía consumida.</p> |
| Biogás  | <p>Estudios muestran un gran incremento en la producción de biogás al adicionar glicerina.</p>  | <p>En la bibliografía encontrada, existen resultados contradictorios del punto óptimo de adición de glicerina para biogás.</p> <p>Potencial de uso bajo, comparado con la oferta del mercado.</p>   |
| Bioetanol, hidrógeno, 1,3 - propanodiol, ácido succínico  | <p>Tienen un alto valor comercial y pueden ser base para futuras biorrefinerías.</p> <p>Obtención de bioetanol sin usar materias primas utilizadas en alimentación.</p> <p>Posibilidad de aprovechamiento de los incentivos gubernamentales de la política de desarrollo de biocombustibles.</p>  | <p>En los próximos años, en Colombia no se usará una combinación mayor de etanol-gasolina debido a la falta de infraestructura para mezclado y distribución.</p> <p>Para su utilización en mayor proporción, se requiere la adecuación de algunos automóviles.</p>                |
| Alimentación animal                                       | <p>La glicerina cruda proporciona igual o más calorías que el maíz en grano, por tanto, podría formar parte de la canasta alimenticia animal.</p>   | <p>La bibliografía muestra resultados contradictorios y no concluyentes sobre el punto óptimo de adición de glicerina para alimentación animal.</p>   |
| Aditivo para combustibles (GTBE)                          | <p>Nuevo aditivo con gran potencial en el mercado.</p>  | <p>Uso de reactivos peligrosos como el isobutileno, que es extremadamente inflamable.</p>   |
| Fertilizantes   | <p>Para su procesamiento utiliza subproductos y residuos agroindustriales, lo que reduce los costos de producción.</p> <p>Uso beneficio directo en la planta de producción de biodiésel.</p>  | <p>Poca información, debido a criterios de secreto industrial, patentes y <i>know-how</i>.</p>  |

Fuente: elaboración propia.

## Costos

La estimación de los costos procede mediante un análisis detallado de cada alternativa de aprovechamiento, en el cual se contabilizan los costos de recursos, productos, capital, ambientales, mantenimiento y combustible, entre otros. Una de las principales dificultades para el análisis es disponer de la información; por ello, en este trabajo se considera una simple aproximación, partiendo de que el capital fijo de inversión es la suma del costo total de diseño, construcción e instalación de una planta [63] y las modificaciones necesarias asociadas con el sitio de preparación de la planta [64].

Además, como referencia se han utilizado los costos reportados en trabajos desarrollados en diferentes ámbitos y fechas [65], y traídos al presente mediante el uso del índice CEPCI actual (*Chemical Engineering Plant Cost Index*, abril de 2013 [66]) y los factores de localización, de acuerdo con el *Manual Internacional de Factores de Construcción Richardson™* [67]. Sólo se han considerado los costos de inversión y montaje para cada alternativa como factor de decisión del criterio económico. Del procedimiento señalado y de las herramientas utilizadas, se calculan y obtienen los costos para una planta que procese 2.000 kg/día de glicerina de cada una de las alternativas que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Costos del montaje de una planta de aprovechamiento de la glicerina para cada alternativa

| Alternativa                  | Costo planta (USD) |
|------------------------------|--------------------|
| Alimentación animal directa  | 172.496,22         |
| Fertilizante                 | 360.547,80         |
| Alimentación animal(pellets) | 694.791,60         |
| Pirólisis                    | 837.828,52         |
| Pellets o briquetas          | 1.012.702,44       |
| Combustible para calderas*   | 1.034.437,81       |
| Biogás                       | 1.331.863,60       |
| GTBE                         | 2.404.472,32       |
| Hidrógeno                    | 5.983.148,35       |
| Bioetanol                    | 6.206.795,34       |
| Ácido succínico              | 7.492.113,16       |
| 1,3-propanodiol              | 14.907.536,34      |

(\*)Sólo es el costo del quemador de glicerina

Fuente: elaboración propia

## El impacto ambiental según los postulados de la ingeniería verde

Según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [68], la ingeniería verde parte del concepto de que las decisiones para proteger la salud humana y el ambiente pueden tener un mayor impacto y costo-efectividad cuando se aplican ciertos principios en el diseño y desarrollo de un proceso industrial o de producto. El objetivo de la ingeniería verde es la incorporación de conceptos relacionados con el riesgo en los procesos químicos y productos diseñados por la academia y la industria [69].

Los criterios pueden ser positivos o negativos, de acuerdo con las cualidades intrínsecas que hacen que una sustancia, producto o proceso sea preferible o deba rechazarse [70].

Según las características de las sustancias, productos, procesos, biósfera o tecnologías consideradas, se pueden definir cualidades intrínsecas que permitan seleccionar las alternativas adecuadas. De esta forma, se evaluó el impacto negativo de las alternativas de procesamiento de glicerina, de acuerdo con los postulados de la ingeniería verde (tabla 3).

**Tabla 3.** Impacto negativo del procesamiento de la glicerina según los postulados de la ingeniería verde

| Alternativas de procesamiento                  | Combustible de Calderas | Pellets Combustible | Pirólisis | Alimentación Animal | Alimentación animal(Pellets) | Hidrógeno | Bioetanol | 1,3 - propanodiol | Ácido succínico | Biogás | GTBE | Fertilizante |
|--|-------------------------|---------------------|-----------|---------------------|------------------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|--------|------|--------------|
| Postulados de la ingeniería verde              |                         |                     |           |                     |                              |           |           |                   |                 |        |      |              |
| Formación de sustancias peligrosas             | X                       | X                   | X         |                     |                              | X         | X         | X                 | X               |        | X    |              |
| Generación de residuos                         | X                       | X                   |           |                     |                              | X         | X         | X                 | X               |        | X    |              |
| Requiere procesos de separación y purificación |                         |                     |           |                     |                              | X         | X         | X                 | X               |        | X    |              |
| Elevados consumos de energía                   |                         | X                   | X         |                     | X                            | X         | X         | X                 | X               |        | X    |              |
| Utiliza reactivos estequiométricos             |                         |                     |           |                     |                              |           |           |                   |                 |        |      | X            |
| Generación de subproductos                     | X                       | X                   | X         |                     |                              | X         | X         | X                 | X               | X      | X    | X            |
| Productos no biodegradables                    |                         |                     |           |                     |                              |           |           |                   |                 |        |      | X            |
| Baja demanda de materia prima (glicerina)      |                         |                     |           | X                   | X                            |           |           |                   |                 | X      |      |              |
| Alta diversidad de materiales                  |                         | X                   |           | X                   | X                            | X         | X         | X                 | X               | X      | X    | X            |
| Pérdidas de materia y energía                  |                         |                     |           |                     |                              |           |           |                   |                 |        |      |              |
| No reutilización tras vida útil                |                         |                     |           |                     |                              | X         | X         | X                 | X               |        |      |              |
| Fuentes no renovables de energía               | X                       | X                   | X         |                     |                              |           |           |                   |                 |        |      |              |

Fuente: elaboración propia

## METODOLOGÍA

Para evaluar las alternativas de uso potencial, se utilizó el método cualitativo por puntos, que consiste en asignar calificaciones a una serie de factores cualitativos que se consideran relevantes para el proyecto, teniendo en cuenta literatura técnica y científica mundial de bases de datos como Science Direct, Scopus, tesis y datos técnicos de empresas productivas. El método permite ponderar factores de preferencia preliminar al tomar la decisión. Se sugiere aplicar el siguiente procedimiento para jerarquizar los factores cualitativos, asignando una ponderación para cada factor evaluado: a) el análisis de costos (0,4); b) el análisis DOFA (0,2) y c) el impacto ambiental, basado en los postulados de ingeniería verde (0,4), de acuerdo con investigadores y profesionales de la industria de los biocombustibles y las energías renovables. Según el impacto, positivo o negativo, de la alternativa, se asignó una calificación individual para obtener una calificación ponderada, con el valor de uno (1) para la alternativa menos viable y el valor de diez (10) para la alternativa más viable de acuerdo con cada factor evaluado.

Así, para las alternativas que presentan costos elevados de implementación y montaje de una planta de baja escala de aprovechamiento de la glicerina, se asignó una calificación menor, como para el procesamiento de 1,3-propanodiol; de la misma manera para aquellas que muestran debilidades y amenazas de mayor dificultad para llevar a cabo su implementación, por ejemplo, los procesos de combustible para calderas. Por último, se adjudicó una calificación mayor para aquellas alternativas que no reflejan un impacto negativo para el medio ambiente, como la generación de sustancias tóxicas, peligrosas, residuos, entre otras, caso de los fertilizantes

Como resultado se obtiene un orden jerárquico de factibilidad de implementación de las alternativas.

## ALTERNATIVAS

El método de evaluación aplicado resulta adecuado para una estimación inicial de los diferentes usos de la glicerina cruda, que requiere posteriormente un análisis más detallado de la mejor opción.

**Tabla 4.** Método cualitativo por puntos aplicados al procesamiento de la glicerina

| ALTERNATIVAS                  | FACTORES           |                  |                          |                  |                   |                  | TOTAL |
|-------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------|
|                               | Análisis de costos |                  | Análisis juicio de valor |                  | Impacto ambiental |                  |       |
|                               | Calif. individual  | Calif. ponderada | Calif. individual        | Calif. ponderada | Calif. individual | Calif. ponderada |       |
| Fertilizante                  | 9,0                | 3,6              | 10                       | 2,0              | 10,0              | 4,0              | 9,6   |
| Alimentación animal           | 10,0               | 4,0              | 8,5                      | 1,7              | 9,0               | 3,6              | 9,3   |
| Alimentación animal (pellets) | 8,0                | 3,2              | 8,5                      | 1,7              | 7,0               | 2,8              | 7,7   |
| Pellets combustible           | 6,0                | 2,4              | 3,5                      | 0,7              | 3,5               | 1,4              | 4,5   |
| Bioetanol                     | 3,0                | 1,2              | 6,5                      | 1,3              | 5,0               | 2,0              | 4,5   |
| Hidrógeno                     | 3,5                | 1,4              | 5,0                      | 1,0              | 5,0               | 2,0              | 4,4   |
| Pirólisis                     | 7,0                | 2,8              | 2,0                      | 0,4              | 3,0               | 1,2              | 4,4   |
| Biogás                        | 5,0                | 2,0              | 3,0                      | 0,6              | 4,0               | 1,6              | 4,2   |
| Propanodiol                   | 1,0                | 0,4              | 7,0                      | 1,4              | 6,0               | 2,4              | 4,2   |
| Combustible para calderas     | 5,5                | 2,2              | 3,5                      | 0,7              | 3,0               | 1,2              | 4,1   |
| Ácido succínico               | 2,0                | 0,8              | 6,0                      | 1,2              | 5,0               | 2,0              | 4,0   |
| GTBE                          | 4,0                | 1,6              | 1,0                      | 0,2              | 2,0               | 0,8              | 2,6   |

El resultado de la evaluación de las alternativas de aprovechamiento de la glicerina es un orden jerárquico de las alternativas para una planta de producción de biodiésel a baja escala.

### Fertilizantes

Desde el punto de vista ambiental es una de las mejores alternativas, ya que es un proceso que no requiere entrada de calor ni cambio químico ni procesos a presión, su procesamiento es a temperatura ambiente, no genera residuos ni subproductos en su producción que contaminen el ambiente, no utiliza ni genera sustancias tóxicas, no emplea disolventes ni equipos o agentes de separación y no presenta elevados consumos de energía. Adicionalmente, no requiere de materiales no renovables, lo cual la hace una alternativa viable muy importante para lograr un desarrollo ecológicamente sostenible que suple los requerimientos nutricionales con la incorporación de subproductos y residuos agroindustriales para mejorar la fertilidad del suelo. Además, es una de las alternativas menos costosas, su principal gasto son los costos indirectos de la planta. Asimismo, es una de las alternativas de uso y beneficio en el mismo sitio de la producción de aceite de palma,

que no requiere de transporte para su comercialización, puesto que todos los insumos están disponibles, al igual que en su aplicación. Todo ello representa una reducción de costos en la fertilización de los cultivos, en la producción de aceite de palma y biodiésel.

### **Alimentación animal directa**

Es otra alternativa amigable con el ambiente, sin impacto ecológico de ningún tipo, no requiere entrada de calor o cambio químico, no produce residuos ni subproductos, su procesamiento no incluye procesos a presión y se lleva a cabo a temperatura ambiente. Su debilidad principal es el estado aún incipiente de su desarrollo. El costo de su procesamiento se ve afectado por la fluctuación de los precios de las otras materias primas, como el maíz, la soya, el trigo, de las cuales se necesitaría gran cantidad para mezclarlas con glicerina, considerando que sólo se agrega un 10% de glicerina al material a consumir por los animales.

### **Alimentación animal indirecta**

Se ubica en el mismo grupo de alternativas amigables, ya que no requiere entrada de calor o cambio químico, no produce residuos ni subproductos; su principal desventaja radica en que necesita bastante energía para alcanzar la presión requerida para la conformación de los pellets.

### **Procesos de fermentación microbiana (propanodiol, hidrógeno, bioetanol, ácido succínico)**

Son alternativas de aprovechamiento con un fuerte desarrollo industrial, con gran capacidad de producción, que incluyen gran gasto en energía y maquinaria debido al uso de equipos especializados en su producción (como fermentadores de diferentes dimensiones) y equipos necesarios para su separación y concentración (como destiladores, columnas de absorción, equipos de electrodiálisis, tamiz molecular). Son procesos que generan diferentes efluentes y subproductos durante su producción, y presentan los más altos costos de inversión entre las alternativas escogidas.



## **Procesos de combustible para calderas (combustible directo, pellets combustible, pirólisis)**

Son alternativas en las que el calentamiento de la glicerina puede generar acroleína, un gas altamente inflamable y tóxico para los organismos vivos, y otros gases perjudiciales durante su manejo. Además de requerir elevadas cantidades de energía para alcanzar la temperatura requerida para su descomposición térmica, puede o no utilizar combustibles no renovables en su proceso. La combustión de glicerina es una tecnología en desarrollo, poco probada y de baja difusión o uso en el mercado global, lo que genera cierto grado de incertidumbre alrededor de su utilización. Son procesos con altos costos de inversión comparados con aquéllos que no requieren entrada de calor o cambio químico.

### **Biogás**

Es una tecnología altamente especializada y de bajo nivel de aplicación industrial, que genera un gas combustible que presenta altos riesgos, por su toxicidad y sobre todo por su explosividad. De igual forma, es un proceso que no utiliza gran cantidad de glicerina, alrededor de un 5-10%, ya que mayores cantidades de glicerina parecen interferir en la biodigestión, inhibiendo el crecimiento de microorganismos y, consecuentemente, disminuyendo la producción de biogás, por lo que es necesario una enorme cantidad de abono para utilizar la glicerina disponible.

### **GTBE**

Es la alternativa con menos viabilidad, de acuerdo con el desarrollo de la ingeniería verde, debido al uso de isobutileno entre sus reactivos, una sustancia altamente inflamable y tóxica por inhalación, que no se descompone naturalmente. Además, es un proceso que genera efluentes y subproductos durante su producción. Esta tecnología está aún en proceso de investigación, su aplicación industrial es todavía incipiente, con muy pocas plantas en funcionamiento en el mundo.

## CONCLUSIONES

La utilización de la glicerina cruda tiene una amplia gama de posibilidades. De las consideradas en este estudio, su utilización en la producción de fertilizantes es la más atractiva, en especial desde el punto de vista ambiental, mientras que las opciones energéticas son las menos favorecidas. El método utilizado proporciona una evaluación básica de las diferentes rutas de aprovechamiento de la glicerina al considerar factores estructurales, económicos y ambientales.

## REFERENCIAS

- [1] S. Mekhilef, S. Siga and R. Saidur, "A review on palm oil biodiesel as a source of renewable fuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1937-1949, 2011.
- [2] Indupalma, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (CORPODIB). Programa estratégico para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales. "Informe final", 2003.
- [3] A. Demirbas, *Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer -Verlag London Limited, Girona, Spain, 2008.
- [4] J. Posada, L. Rincón and C. Cardona, "Design and analysis of biorefineries based on raw glycerol: Addressing the glycerol problem," *Bioresource Technol.*, vol. 111, pp. 282 - 293, 2012.
- [5] A. Leoneti, V. Leoneti and S. Borges, "Glycerol as a by-product of biodiesel production in Brazil: Alternatives for the use of unrefined glycerol," *Renewable Energy*, vol. 45, pp. 138-145, 2012.
- [6] C. Quispe, C. Coronado and J. Carvalho, "Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 475 - 493, 2013. Doi: 10.1016/j.rser.2013.06.017
- [7] S. Nitayavardhana and S. Kumar, "Biodiesel-derived crude glycerol bioconversion to animal feed: A sustainable option for a biodiesel refinery," *Bioresource Technol.*, vol. 102, pp. 5808 - 5814, 2011.
- [8] H. Tan, A. Abdul Aziz and M. Aroua, "Glycerol production and its applications as a raw material: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 118 - 127, 2013.

- [9] K. Jegannathan, E. Chan and P. Ravindra, "Harnessing biofuels: A global Renaissance in energy production?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2163-2168, 2009. Doi: 10.1016/j.rser.2009.01.012
- [10] M. Hasheminejad, M. Tabatabaei, Y. Mansourpanah, M. Khatami and A. Javani, "Upstream and downstream strategies to economize biodiesel production," *Bioresource Technol.*, vol. 102 pp. 461-468, 2011. Doi:10.1016/j.biortech.2010.09.094
- [11] A. Singhabhandhu, and T. Tezuka, "A perspective on incorporation of glycerin purification process in biodiesel plants using waste cooking oil as feedstock," *Energy*, vol. 35, pp. 2493-2504, 2010.
- [12] M. Hajek and F. Skopal, "Treatment of glycerol phase formed by biodiesel production," *Bioresource Technol.*, vol. 101, pp. 3242-3245, 2010.
- [13] N. Striugas, A. Šlančiauskas, V. Makarevičiene, M. Gumbyte and P. Janulis, "Processing of the glycerol fraction from biodiesel production plants to provide new fuels for heat generation," *Energetika*, vol. 5, pp. 5-12, 2008.
- [14] M. Bohon, B. Meztger, W. Linak, C. King and W. Roberts, "Glycerol combustion and emissions," *Proc. of the Combustion Inst.*, vol. 33, pp. 2717-2724, 2011.
- [15] J. McNeil, P. Day and F. Sirovski, "Glycerine from biodiesel: The perfect diesel fuel," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 90, pp. 180-188, 2012. Doi: 10.1016/j.psep.2011.09.006
- [16] S. Steinmetz, S. Herrington, C. Winterrowd, W. Roberts, J. Wendt and W. Linak, "Crude glycerol combustion: Particulate, acrolein, and other volatile organic emissions," *Proc. of the Combustion Inst.*, vol. 34, pp. 2749-2757, 2013.
- [17] D. Bergstrom, S. Israelsson, M. Ohman, S. Dahlqvist, R. Gref, C. Boman and I. Wasterlund, "Effect of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellet," *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, pp. 1324-1329, 2008.
- [18] L. Raslavicius, "Characterization of the woody cutting waste briquettes containing absorbed glycerol," *Biomass and Bioenergy*, vol. 45, pp. 144-151, 2012. Doi:10.1016/j.biombioe.2012.05.028
- [19] V. Sricharoenchaikul, D. Puavilai, S. Thassanaprichayanont and D. Atong, "Investigation on thermochemical conversion of pelletized *Jatropha* residue and glycerol waste using single particle reactivity technique," *Chemical Eng. J.*, vol. 176, pp. 217-224, 2011. Doi: 10.1016/j.cej.2011.06.084
- [20] K. Chaiyaomporn and O. Chavalparit, "Fuel Pellets Production from Biodiesel Waste," *Environment Asia*, vol. 3, pp. 103-110, 2010.
- [21] T. Valliyappan, N. Bakhshi and A. Dalai, "Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas," *Bioresource Technol.*, vol. 99, pp. 4476-4483, 2008.

- [22] C. Yu, "Catalytic valorization of glycerol to hydrogen and syngas," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 2678 - 2700, 2013.
- [23] Y. Fernández, A. Arenillas, M. Díez, J. Pis and J. Menéndez, "Pyrolysis of glycerol over activated carbons for syngas production," *J. of Analytical and Appl. Pyrolysis*, vol. 84, pp. 45-50, 2009.
- [24] V. Skoulou, P. Manara and A. Zabaniotou, "H<sub>2</sub> enriched fuels from co-pyrolysis of crude glycerol with biomass," *J. of Analytical and Appl. Pyrolysis*, vol. 97, pp. 198-204, 2012.
- [25] C. Wang, Q. Liu, W. Huo, K. Dong, Y. Huang and G. Guo, "Effects of glycerol on rumen fermentation, urinary excretion of purine derivatives and feed digestibility in steers," *Livestock Sci.*, vol. 121, pp. 15-20, 2009. Doi: 10.1016/j.livsci.2008.05.010
- [26] P. Kovács, E. Zsédely, A. Kovács, G. Virág and J. Schmidt, "Apparent digestible and metabolizable energy content of glycerol in feed of growing pigs," *Livestock Sci.*, vol. 142, pp. 229-234, 2011. doi: 10.1016/j.livsci.2011.07.019
- [27] J. Kim, S. Seo, C. Kim, J. Kim, B. Lee, G. Lee, H. Shin, M. Kim and D. Kil, "Effect of dietary supplementation of crude glycerol or tallow on intestinal transit time and utilization of energy and nutrients in diets fed to broiler chickens," *Livestock Sci.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2013.03.005>.
- [28] C. Wang, Q. Liu, W. Yang, W. Huo, K. Dong, Y. Huang, X. Yang and D. He, "Effects of glycerol on lactation performance, energy balance and metabolites in early lactation Holstein dairy cows," *Animal Feed Sci. and Technol.*, vol. 151, pp. 12-20, 2009. Doi : 10.1111/jpn.12185
- [29] J. DeFrain, A. Hippen, K. Kalscheur and P. Jardon, "Feeding glycerol to transition dairy cows: effects on blood metabolites and lactation performance," *J. Dairy Sci.*, vol. 87, pp. 4195-4206, 2004.
- [30] K. Ogborn, "Effects of method of delivery of glycerol on performance and metabolism of dairy cows during the transition period," MS Thesis, Dept. Veterinary Technology, Cornell Univ., Ithaca, NY, 2006.
- [31] K. Südekum, A. Schröder, S. Fiebelkorn, R. Schwer, and A. Thalmann, "Quality characteristics of pelleted compound feeds under varying storage conditions as influenced by purity and concentration of glycerol from biodiesel production," *J. of Animal and Feed Sci.*, vol. 17, pp. 120-136, 2008.
- [32] M. Shields, E. Heugten, J. Odle and C. Stark, "Impact of crude glycerol on feed milling characteristics of swine diets," *Animal Feed Sci. and Technol.*, vol. 175, pp. 193-197, 2012.
- [33] R. González, A. Murarka, Y. Dharmadi, and S. Yazdani, "A new model for the anaerobic fermentation of glycerol in enteric bacteria: Trunk and auxiliary pathways in *Escherichia coli*," *Metabolic Eng.*, vol. 10, pp. 234-245, 2008.

- [34] T. Ito, Y. Nakashimada, K. Senba, T. Matsui and N. Nishio, "Hydrogen and Ethanol Production from Glycerol - Containing Wastes Discharges after Biodiesel Manufacturing Process," *J. of Bioscience and Bioengineering*, vol. 100, pp. 260-265, 2005.
- [35] R. Nwachukwu, A. Shahbazi, L. Wang, S. Ibrahim, M. Worku and K. Schimmel, "Bioconversion of glycerol to ethanol by a mutant *Enterobacter aerogenes*," *AMB Express*. doi: 10.1186/2191-0855-2-20.2012.
- [36] S. Yazdani and R. Gonzalez, "Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry," *Current opinion in biotechnol.*, vol. 18, pp. 213-219, 2007.
- [37] S. Sarma, S. Brar, E. Sidney, Y. Bihan, G. Buelna and C. Soccol, "Microbial hydrogen production by bioconversion of crude glycerol: A review," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 6473-6490, 2012.
- [38] R. Mangayil, M. Karp and V. Santala, "Bioconversion of crude glycerol from biodiesel production to hydrogen," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 12198-12204, 2012.
- [39] S. Markov, J. Averitt and B. Waldron, "Bioreactor for glycerol conversion into H<sub>2</sub> by bacterium *Enterobacter aerogenes*," *Int. J. of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 262-266, 2011.
- [40] R. Saxena, P. Anand, S. Saran, and J. Isar, "Microbial production of 1,3-propanediol: Recent developments and emerging opportunities," *Biotechnol. Advances*, vol. 27, pp. 895-913, 2009.
- [41] Y. Zhao, G. Chen, and S. Yao, "Microbial production of 1,3-propanediol from glycerol by encapsulated *Klebsiella pneumoniae*," *Biochemical Eng. J.*, vol. 32, pp. 93-99, 2006.
- [42] M. Metsoviti, A. Zeng, A. Koutinas and S. Papanikolaou, "Enhanced 1,3-propanediol production by a newly isolated *Citrobacter freundii* strain cultivated on biodiesel-derived waste glycerol through sterile and non-sterile bioprocesses," *J. of Biotechnol.* vol. 163, pp. 408-418, 2013.
- [43] P. Kubiak, K. Leja, K. Myszka, E. Celinska, M. Spychała, D. Szymanowska, K. Czarczyk, and W. Grajek, "Physiological Predisposition of various *Clostridium* species to synthesize 1,3-propanediol from glycerol," *Process Biochem.*, vol. 47, pp. 1308-1319, 2012.
- [44] A. Hiremath, M. Kannabiran and V. Rangaswamy, "1,3-Propanediol production from crude glycerol from jatropha biodiesel process," *New Biotechnol.*, vol. 28, pp. 19-23, 2011.
- [45] N. Pachauri and B. He, "Value-added Utilization of Crude Glycerol from Biodiesel Production: A Survey of Current Research Activities," 2006 ASABE Annual International Meeting, 2006.

- [46] M. Binns, A. Vlysidis, C. Webb, C. Theodoropoulos, P. Atauri and M. Cascante, "Glycerol metabolic conversion to succinic acid using *Actinobacillus succinogenes*: a metabolic network-based analysis," *Comput. Aided Chemical Eng.*, vol. 29, pp. 1421- 1425, 2011.
- [47] A. Vlysidis, M. Binns, C. Webb and C. Theodoropoulos, "Glycerol utilisation for the production of chemicals: Conversion to succinic acid, a combined experimental and computational study," *Biochemical Eng. J.*, vol. 58, pp. 1-11, 2011.
- [48] C. Roca, G. Albuquerque and M. Reis, "Evolutionary engineering of *Actinobacillus succinogenes* for improved succinic acid production on glycerol," *J. of Biotechnol.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031>.
- [49] M. Fountoulakis, I. Petousi and T. Manios, "Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production," *Waste Manage.*, vol. 30, pp. 1849-1853, 2010.
- [50] S. Astals, V. Nolla and J. Mata. "Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate," *Bioresource Technol.* vol. 110, pp. 63-70. 2012. Doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.080
- [51] M. Hutňan, N. Kolesárová, I. Bodík and M. Czölderová, "Long-term monodigestion of crude glycerol in a UASB reactor," *Bioresource Technol.*, vol. 130, pp. 88-96, 2011.
- [52] J. Siles, M. Martín and A. Chica, "Anaerobic co-digestion of glycerol and wastewater derived from biodiesel manufacturing," *Bioresource Technol.*, vol. 101, pp. 6315-6321, 2010.
- [53] L. Castrillón, Y. Fernández-Nava, P. Ormaechea and E. Marañón, "Optimization of biogas production from cattle manure by pre-treatment with ultrasound and co-digestion with crude glycerin," *Bioresource Technol.*, vol. 102, pp. 7845 - 7849, 2011.
- [54] J. Cheng, C. Lee, Y. Jhuang, J. Ward and I. Chien, "Design and control of the glycerol tertiary butyl ethers process for the utilization of a renewable resource," *Ind. and Eng. Chemistry Research*, vol. 50, pp. 12706-12716, 2011.
- [55] M. Di Serio, L. Casale, R. Tesser and E. Sanatacesaria, "New Process for the Production of Glycerol tert-Butyl Ethers," *Energy Fuels*. vol. 24, pp. 4668-4672, 2010.
- [56] A. Jaecker-Voirol, I. Durand, G. Hillion, B. Delfort and X. Montagne, "Glycerin for New Biodiesel Formulation. Formulation d'un nouveau biocarburant Diesel à base de glycérol," *Oil and Gas Sci. and Technol.*, vol. 63, pp. 395-404, 2008.

- [57] K. Alotaibi and J. Schoenau, "Enzymatic activity and microbial biomass in soil amended with biofuel production byproducts," *Appl. Soil Ecology*, vol. 48, pp. 227-235, 2011. Doi: 10.1016/j.apsoil.2011.03.002
- [58] K. Alotaibi and J. Schoenau, "Greenhouse gas emissions and nutrient supply rates in soil amended with biofuel production by-products," *Biol. and Fertility of Soils*, vol. 49, pp. 129-141, 2013.
- [59] P. Qian, J. Schoenau and R. Urton, "Effect of soil amendment with thin stillage and glycerol on plant growth and soil properties," *J. of Plant Nutrition*, vol. 34, pp. 2206-2221, 2011.
- [60] L. Tolner, G. Rétháti and A. Kovács, "Examination of an alternative way to prevent nitrate leaching in soil by using glycerol as a biodiesel by-product," 11th Alps-Adria Scientific Workshop. doi: 10.1556/Novenyterm.61. Suppl. 3, 2012.
- [61] F. Yang, M. Hanna and R. Sun, "Value added uses for crude glycerol a byproduct of biodiesel production," *Biotechnol. for Biofuels*. doi:10.1186/1754-6834-5-13, 2012.
- [62] Baca G, *Evaluación de proyectos*, Ed. McGraw-Hill, 6ta ed., México D. F., 2010.
- [63] D. Remer, S. Lin, N. Yu and K. Hsin, "An update on cost and scale-up factors, international inflation indexes and location factors," *Int. J. of Prod. Econ.*, vol. 114, pp. 333-346, 2008.
- [64] G. Towler and R. Sinnott, "Chemical Engineering Design: principles, practice and economic of plant and process design," Ed. Elsevier, London, 2008.
- [65] L. Chloe, J. Mendel, E. Logan and T. Seedial, "Anaerobic Fermentation of Glycerol to Ethanol," Dept. Chemical and Biomolecular Engineering. Senior Design Report, Univ. of Pennsylvania, PA, 2009.
- [66] *Chemical Engineering Plant Cost Index*. Economic Indicators April 2013. [Online]. Available: [www.che.com](http://www.che.com).
- [67] *Richardson International Construction Factors Manual*<sup>TM</sup> (2008). [Online]. Available: [www.costdataonline.com](http://www.costdataonline.com).
- [68] US Environmental Protection Agency (EPA) (2011), "Green Engineering" [Online]. Available: <http://www.epa.gov/oppt/greenengineering/>
- [69] J. García-Serna, L. Pérez and M. Cocero, "New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering," *Chemical Eng. J.*, vol. 13, pp. 7-30, 2007. Doi: 10.1016/j.cej.2007.02.028
- [70] A. Harris and S. Briscoe, "Development of a problem based learning elective in Green Engineering," *Educ. for Chemical Engineers*, vol. 3, pp. 15-21, 2008.