

Estudio de prefactibilidad para el diseño de una planta de etanol a partir de residuos de cosecha de caña de azúcar

Yenny del Carmen Velásquez Riascos,¹ Jorge Enrique López^{2*}

¹Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

²Universidad del Valle, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.

*Autor para correspondencia: jorge.lopez@correounivalle.edu.co

RESUMEN

En el Valle del Cauca se generan alrededor de 5 millones de toneladas anuales de desechos lignocelulósicos de la caña de azúcar, constituidos principalmente por hojas y cogollos. Esta biomasa dependiendo de su variedad, posee un estimado promedio en peso de 42% de celulosa, 26% de hemicelulosa y 22% de lignina en base seca, siendo apta para obtener azúcares fermentables para conseguir etanol deshidratado como combustible. Basados en las anteriores consideraciones, el grupo de investigación en biocombustibles y biorefinerías de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle junto con el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Autónoma de Occidente, viene ajustando el diseño de una planta de obtención de etanol a partir de las hojas y cogollos que son dejados en el suelo tras realizar la cosecha de la caña de azúcar, por esta razón el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la prefactibilidad de montar la planta para la producción de etanol como producto principal y de otras sustancias que puedan ser aprovechables (lignina y proteína) a partir de estos residuos lignocelulósicos. Para este estudio se hizo uso de los estudios experimentales previos ejecutados por los investigadores del grupo en biocombustibles y realizando el proceso a partir de 1000 toneladas de hojas y cogollos usando los datos de pruebas realizadas en el laboratorio y mediante cálculos de balances, que fueron incluidos en un simulador comercial Aspen Plus versión 10.8.1. Se logró obtener 121.000 litros/día de etanol anhidro con un rendimiento del 78,57% y 202 ton/día en base seca de lignina con 94,5% y 6,4 ton/día de proteína con 40% de recuperación como subproductos principales. El análisis económico muestra que la capacidad mínima de la planta de producción es de 285.000 litros/día, presentada a una tasa interna de retorno de 34% y VPN de US\$ 36.839.602.

Palabras clave: hojas y cogollos de caña, prefactibilidad económica, etanol anhidro, TIR, VPN.

Editor: Hernández Fernández, J.
javier.hernandez@utadeo.edu.co

Citation: Velásquez-Riascos, Y., & López, J.E. (2016). Estudio de prefactibilidad para el diseño de una planta de etanol a partir de residuos de cosecha de caña de azúcar. *Mutis* 6(2), 74-81, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1152>

Received: Abril 29, 2016. **Accepted:** Junio 30, 2016. **Published on line:** Septiembre 30, 2016.

Copyright: ©2016 Velásquez-Riascos, Y. & López, J.E. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Pre-feasibility study for design of a ethanol plant from waste of sugar sugarcane

ABSTRACT

In Valle of Cauca are grown around 100,153 hectares of cane and 22 million tons/year can generate about 5 million tons of lignocellulosic wastes, consisting mainly of leaves and buds. This biomass that depending of variety, has an estimated average 42% by weight of cellulose, 26% hemicellulose and 22% lignin on dry basis, being apt to obtain fermentable sugars to get dehydrated ethanol as fuel.



Based on the above considerations, the biofuels research group and biorefineries School of Chemical Engineering at the Universidad del Valle with the laboratory of Biotechnology of the University of the West; they are come adjusting the layout of a plant for production of ethanol from the leaves and buds that are left in the harvesting the sugar cane, which is why this study aimed to study the prefeasibility of assembling the plant for the production of ethanol as main product and the other substances like lignin and protein from these lignocellulosic residues. For this study, use was made of the previous results achieved by researchers of group biofuels where it start of 1000 tons of leaves and buds using the commercial simulator Aspen Plus version 10.8.1

It was possible to obtain 121,000 liters / day of anhydrous ethanol in a yield of 78.57% and 202 tons / day on dry basis 94.5% of lignin and 6.4 ton / day with 40% protein recovery as major byproducts. This document includes information from studies conducted by researches of biofuels group and performing process in which from 1000 tons of leaves and buds are obtained 121,000 liters / day of anhydrous ethanol with a yield of 78.57% and major subproducts like 202 ton / day of lignin with 94.5% and 6.4 ton / day with 40% protein recovery. The economic analysis gave as most appropriate alternative sizing estimate a production of 285,000 liters / day minimum capacity, brought to an internal rate of return of 34% and NPV of USD\$ 36389602.

Keywords: cane leaves and buds, economic feasibility, anhydrous ethanol, IRR, NPV.

INTRODUCCIÓN

Actualmente los residuos lignocelulósicos representan 5 millones de toneladas por año, equivalentes a 23,1 ton/ha, y constituyen el 25% del peso de la caña, incluyendo hojas verdes (13,3%), hojas secas (64,2%), cogollos (7,5%) y caña remanente (15%). Estos residuos considerados como biomasa, se dejan sobre el suelo como material de abono y en su mayoría se queman incrementando la contaminación ambiental (Rodríguez, 2009).

Esta biomasa, que dependiendo de la variedad, posee un estimado promedio en peso de 42% de celulosa, 26% de hemicelulosa y 22% de lignina en base

seca (Gómez, 2007) apta para obtener azúcares fermentables, genera una alternativa para obtener etanol deshidratado (anhidro) como combustible a partir de estos residuos. Así, al usar alcohol carburante, se puede disminuir el consumo de combustibles fósiles e impactos ambientales reduciendo en un 74% la emisión de gases de efecto invernadero. Además, Colombia viene trabajando con proyectos en la inserción de alcohol en la gasolina para uso en los motores de combustión (Prasad, 2007), esta inclusión se rige por la regulación del Ministerio de Minas y Energía para la distribución de mezcla (E8) en el territorio nacional que ayuda a mantener una producción anual de 387,85 millones de litros de etanol anhidro y una demanda de 5,93 millones de litros (Informe anual de Asocaña 2012-2013, 2013).

Colombia ha generado en los últimos 4 años más de US\$500 millones provenientes de la producción de etanol en varias regiones y 120.000 empleos rurales (Avella Guzmán, 2008). El país puede tomar ventaja en este tema ya que se han iniciado estudios para su concepción a partir de materias primas como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, la yuca y el bagazo de caña (Federación Nacional de Biocombustibles, 2013). Actualmente en Bolívar y Córdoba (en la costa norte colombiana), se lidera un proyecto de construcción de plantas de abastecimiento para el mercado internacional que producirían 300.000 litros diarios de etanol a partir del cultivo de 17.000 hectáreas de caña de azúcar (Informe anual de Asocaña 2012-2013, 2013),

Para producir etanol carburante, se requiere de tecnología que involucre análisis de criterios económicos y ambientales, entre los que se encuentran consumo energético, eficiencia, depreciación, automatización, costos de operación y de capital, control ambiental y alternativas de cogeneración de vapor y electricidad (Chávez, 2013).

Basados en las anteriores consideraciones, el Grupo de Investigación en Biocombustibles y Biorefinerías (Grubioc) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle, junto con el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Autónoma de Occidente, viene ajustando el diseño de una planta de obtención de etanol a partir de las hojas y cogollos que son dejados en el suelo tras realizar la cosecha de la caña de azúcar, por esta razón el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la prefactibilidad

de montar la planta para la producción de etanol como producto principal y de otras sustancias que puedan ser aprovechables (lignina y proteína) a partir de estos residuos lignocelulósicos, considerando primero evaluar las necesidades y costos operativos del diseño del proceso propuesto y aprobado por el grupo Grubioc, segundo, definir los costos de capital y de operación de la planta y los índices económicos en el caso que se requieran y por último, evaluar las proyecciones de los costos al aumentar la capacidad de la planta.

METODOLOGÍA

Para estimar el punto de equilibrio económico preliminar de una planta para la obtención de etanol como producto principal a partir de los residuos lignocelulósicos de la cosecha (hojas y cogollos) de la caña de azúcar, se trabajó la metodología tipo investigación basada en el diseño conceptual definido por el grupo de investigación Grubioc, en la exploración efectuada a nivel de laboratorio. Se tomaron como productos secundarios la lignina y la proteína.

Para su desarrollo se utilizaron como fuentes primarias todas aquellas obtenidas de información recibida en reuniones de seminario del grupo de investigación y las entrevistas realizadas a las personas quienes participaron en los diferentes experimentos para obtener los rendimientos de cada etapa. Así mismo, la de expertos que laboran en empresas con objetivos encaminados a la producción de alcohol carburante. Para las fuentes secundarias se hizo una recopilación bibliográfica relacionada con el tema en bases de datos disponibles en la Universidad del Valle, tales como Science Direct, EBSCO y Web of Science (LSI PRODUCTS), también se consultaron proyectos de grado y artículos disponibles en internet relacionados con estudios de prefactibilidad. Se procedió a realizar el siguiente procedimiento:

Evaluación de necesidades y costos operativos

Las necesidades requeridas para el diseño del proceso propuesto y aprobado por el grupo de investigación Grubioc, se dirigió primero a la ubicación de la planta en el Valle del Cauca por presentarse allí un mayor porcentaje de área cultivada y suministro de equipos e insumos debido a las 5 destilerías presentes en la región específicamente en la ciudad de Santiago de Cali,

por las ventajas que presenta en cuanto a la adquisición y transporte de la materia prima, transporte de maquinaria y equipo y finalmente aprovechamiento de los subproductos. Se hizo relevante la adecuación en la ciudad de Yumbo por su facilidad para transporte de productos, zona franca y transporte aéreo. Estas condiciones se especifican en el documento principal o tesis.

Para este estudio se hizo uso del simulador comercial Aspen Plus versión 10.8.1. Las condiciones de los equipos se dimensionaron conforme el balance de materia realizada a cada etapa de operación usando reglas heurísticas (Seider, 2009), y los datos suministrados por los estudiantes del grupo de investigación Grubioc realizados en pruebas piloto de los laboratorios de operaciones unitarias y química de la Universidad del Valle y el Laboratorio de Bioprocesos de la Universidad Autónoma de Occidente.

Para el predimensionamiento de equipos este se efectuó acorde a Seader *et al.* (2004) y los resultados del simulador; se tomaron como base inicial de cálculo 100.000 litros/día de producción de etanol y se escaló para 5 escenarios o niveles de producción más. Se definieron las etapas de operación conforme a la información brindada por el grupo Grubioc e información bibliográfica descrita en el marco teórico del documento principal.

Los componentes simulados fueron: agua, etanol, hidróxidos, lignina y dióxido de carbono, hemicelulosa y celulosa se incluyeron como glucosa; cenizas, extraíbles lipofílicos, se balancearon como sólido inerte usando como componente principal el carbono, los hidrosolubles se incluyeron como agua. Para los parámetros se usó la base de datos de Aspen, que contiene literatura bibliográfica acorde con Seader *et al.* (2004), Walas (1988), Geankoplis, (1998), Pruksthornt *et al.* (2009), Balat (2010) y Woods (2007), entre otros. Se trabajó con el modelo termodinámico Non Random Two liquids (NRTL) debido a que la base de datos del simulador está diseñada para emplearla (Wooley *et al.*, 1999). El nivel de detalle de este trabajo no requiere modelos cinéticos complejos que representen el comportamiento de hidrólisis enzimática y fermentación. En vez de eso, solo es necesario conocer los rendimientos o conversiones obtenidos por los integrantes del grupo en sus investigaciones.

La simulación se realizó en orden consecutivo cumpliendo con las condiciones y especificaciones requeridas, el esquema de producción incluye extracción de proteína, deslignificación, hidrólisis enzimática, fermentación, destilación y deshidratación. El área de tratamiento de residuos no se incluyó en el simulador, en su lugar se realizaron cotizaciones con plantas de tratamiento de dimensiones equivalentes a la producción que emite el balance de materia para los residuos líquidos y sólidos como biomasa (ver figura 1). Este valor se incluye en los costos totales. Posteriormente, se revisó que las unidades incluidas no registraran problemas de convergencia, para incluir la unidad y corrientes siguientes.

El análisis de sensibilidad se realizó en las columnas de destilación y en los evaporadores de múltiple efecto usando el simulador (relación de reflujo, etapa de alimentación, rendimiento, consumo energético) sobre la pureza del etanol obtenido.

En las torres de destilación se realizó un análisis de sensibilidad para identificar el efecto de las variables de operación como presión, temperatura, perfil de los componentes (agua - etanol - dióxido de carbono), sobre el rendimiento de producción de etanol y emisiones de dióxido de carbono. Así mismo, Aspen Plus calculó la energía requerida para la operación de acuerdo a diferentes configuraciones de la(s) etapa(s) de alimentación y el número de etapas.

Para los evaporadores de múltiple efecto el análisis de sensibilidad se limitó al estudio del número de efectos vs. la cantidad de vapor necesaria para llevar los sólidos a una concentración del 80%. Acorde con ello se

seleccionaron las mejores condiciones de operación para estas partes del proceso.

Costos de capital, de operación e índices económicos

Se inició la evaluación económica tomando la base inicial de cálculo de 100.000 litros/día (3961,29 kg/h) de producción de etanol como producto principal. Se usó el dólar como moneda y una tasa de cambio equivalente a 3000 pesos/dólar.

En la evaluación se determinó el costo de capital, los costos de operación, capital de trabajo, inversión total de capital y cálculo de los indicadores económicos TIR y VPN, utilizando las etapas del proceso descritas en el punto anterior y usando como herramientas el simulador Aspen Icarus y Microsoft Office Profesional Plus 2010. Para los costos de instalación se realizó el ajuste a las condiciones actuales, usando el Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI), en 2013 el CEPCI de 467,2 consultado en julio de 2013.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Estimación de las necesidades y costos operativos

Se realizó la selección del proceso conforme a la información brindada por el grupo Grubioc, especificada en la metodología y marco teórico de este documento. A partir de 1000 toneladas de hojas y cogollos se obtuvieron 121.000 litros/día de etanol anhidro, un rendimiento de 78,57% y como subproductos principales 202 ton/día en base seca de lignina con 94,5% y 6,4 ton/día de proteína con 40% de recuperación. Ver tabla 1.

Tabla 1. Rendimiento de cultivo y de etanol a partir de las hojas y cogollos

Materia prima	Rendimiento cultivo (ton/ha)	Rendimiento A etanol (litros/ton)	Costo de materia prima (US\$/ton)		Costo a etanol (US\$MP/lt)	
			Producida*	Comprada	Producida	Comprada
Hojas y cogollos	123	120,8	14	18,7	0,12	0,15

*Servicio de análisis estadístico, Informe Asocafña 2011-2012.

El rendimiento de hojas y cogollos es alto en comparación con otros rendimientos de maíz (460,6 lt/ton), bagazo (193 lt/ton) y caña (75 lt/ton) incrementando

la posibilidad de montar la planta de obtención de etanol (KAZI, y otros, 2010). Los flujos principales se describen en la figura 1.

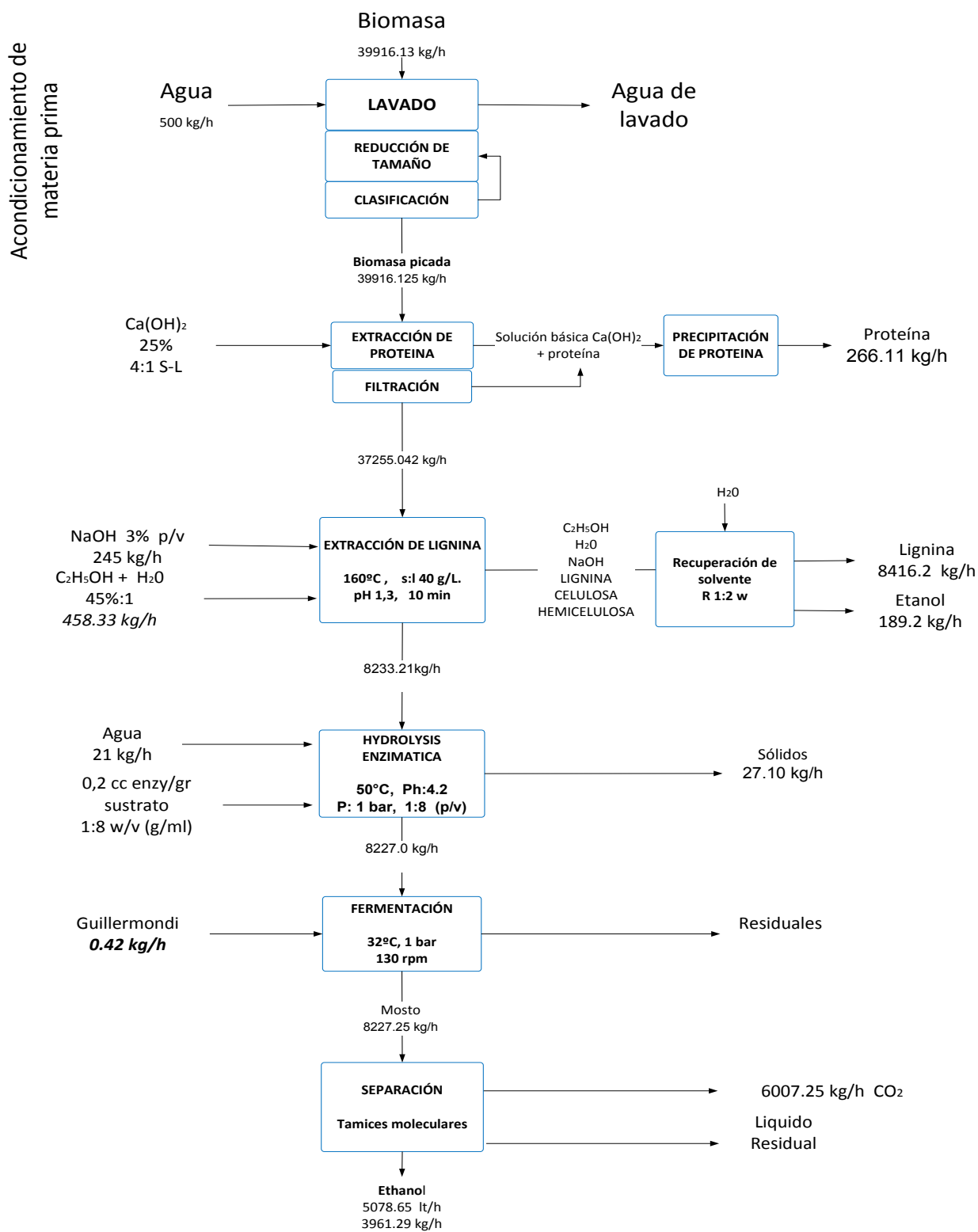


Figura 1. Diagrama de proceso de etanol a partir de residuos de cosecha

Resultados de la evaluación económica

La evaluación económica se realizó para seis niveles de producción (ver tabla 3). Los datos registrados son para 300.000 litros/día equivalentes a 81'264.000 litros anuales, se resumen los costos de la planta. Conforme al VPN de la tabla 3, se evidencia que para que exista una buena rentabilidad deben superarse los 200.000 litros de producción, por tal motivo conforme las necesidades actuales reportadas por la página de biocombustibles de 2013, los indicadores de VPN y la TIR, se evalúan las alternativas para niveles de producción mayores; se evidencia que la mejor posibilidad de inversión la da el proceso de 300.000 litros/día. De acuerdo con la evaluación se define que el mejor resultado de VPN lo registra la producción de 200.000 litros/día (ver tabla 3).

Tabla 2. Resumen de costos de la planta

Resumen de costos	Descripción	(US\$)	US\$/lt
Costos de capital	Costo/ período	29'132.195	0,360
Total costos operación	Costo/ período	40'310.800	0,500
Ventas totales de producción	Costo/ período	65'322.900	0,804

Costos de capital

Los equipos presentan mayor rubro en el capital; en el que la etapa de separación (dimensión de las torres de destilación) y fermentación, incurre en mayor costo debido a las dimensiones de los equipos requeridos para el nivel de producción (200.000 litros/día) y al tiempo de residencia necesario para la fermentación alcohólica.

Costos de operación

La materia prima presenta mayor impacto en los costos, debido al volumen requerido para su procesamiento (casi 2200 toneladas). Con los servicios industriales, se genera mayor impacto en el vapor y agua de enfriamiento, necesarios para la etapa de deslignificación que requiere energía para operar a un calentamiento de 160 °C. En el proceso de destilación, donde se usó el tren de separación para obtener etanol al 95,6%, también se requiere de vapor para realizar el

cambio de fase. Estos costos pueden disminuirse con alternativas como integrar un ingenio que tenga estos servicios ya en funcionamiento.

Costos de producción

El resultado de producir etanol a partir de los residuos de cosecha generó un valor equivalente a 0,97 US\$/lt. Es de aclarar que en Colombia el costo del etanol cambia constantemente, por lo cual este estudio se vería afectado por la estructura de precios que expide por decreto el Ministerio de Minas y Energía. El año 2013 cerró a 1,19US\$/lt y el 2014 (según Resolución 90815 del 31 de julio) a 0,87 US\$/lt, por debajo de lo que cuesta producirlo limitando la atracción de poder montar la planta y en mezcla E8 a 1,22US\$ (Federación Nacional de Biocombustibles, 2013). (Consulta realizada en su página web a julio de 2014).

Indicadores económicos

En la tabla 3 se registran los resultados de los indicadores económicos para 6 niveles de producción como proyectos separados, es decir, cada nivel requiere de un redimensionamiento de equipos para cada nivel de producción.

Tabla 3. Indicadores para cada escenario

Producción de etanol litros/día	VPN en US\$	TIR	Puntos porcentuales
100.000	- 25'236.632	21,7%	-4%
200.000	34'832.679	33%	9,2%
300.000	43'462.526	33%	8%
400.000	33'651.323	31%	5%
500.000	36'800.001	30%	5%
1.000.000	495'825.332	40%	15%

Con la tasa efectiva de 25% aplicada para cada proyecto, se obtienen datos de TIR mayor a partir de un nivel de producción de 200.000 litros, significando esto que se puede considerar rentable debido a que el VPN es positivo a partir de estos casos. La proyección se puede recuperar en el octavo año solo para etanol como producto y en el quinto año si se consideran subproductos como lignina, proteína y dióxido de carbono.

Del análisis de resultados se encontró que la utilidad del proyecto a partir de etanol sin incluir el impuesto de renta, es equivalente al 35,04% (US\$27'980.632), y al incluir los subproductos como lignina, dióxido de carbono y proteína, se llega al 41,46% (US\$33'825.000). Con lo anterior se complementa la información sobre la rentabilidad de la empresa determinándose que, para producción en escala a mayores unidades vendidas, mayor rentabilidad.

Estimación del punto de equilibrio

Se concluye que el punto de equilibrio, donde son exactamente iguales los beneficios por ventas a la suma de costos fijos y variables por medio del cálculo con las ecuaciones brindadas por la bibliografía de matemática financiera y la fórmula 1; se encuentra que el precio de venta unitario de etanol se encuentra en 326,6 US\$/lt y con un costo variable unitario de 319,36 US\$/lt, con costos fijos de US\$1'892.000 aplicando la fórmula 1, las unidades físicas requeridas para no incurrir en pérdidas son de 245.793 litros, equivalentes a:

$$\text{Punto de equilibrio} = \frac{CF}{1 - \frac{CV}{P*Q}} \quad (1)$$

Donde:

CF: costos fijos totales

Cv: costos variables totales

P*Q: volumen total de ventas: CF + Cv

$$P. E. = \frac{1'892.000 \text{ USD}}{326.6 - 319.36} = 80.500.000 \text{ USD} \quad (2)$$

Se estableció el valor mínimo de unidades en 246.000 litros para comercializar, siendo consecuente con las relaciones establecidas en el ítem anterior, en donde mayores a 250.000 litros hay rentabilidad.

Finalmente, la producción escogida cumple con las condiciones de costos y producción de etanol para las opciones de nuevos proyectos que la empresa Bioenergy tiene pensado en Norte de Santander para una producción de 350.000 litros o también para el Valle del Cauca, en el cual el Ingenio Riopaila Castilla proyecta invertir US\$70'000.000 millones para una ca-

pacidad de 400.000 litros a partir de la caña (informe Asocaña, 2013). Si se observan los rendimientos a partir de la caña y se comparan con las hojas y cogollos, se puede identificar que este proyecto obtendrá el volumen esperado y podrá iniciarse con la inversión que el Ingenio estima. También, se pueden mejorar los costos usando algunos servicios industriales del Ingenio en el cual se espera sea montada la planta de producción.

CONCLUSIONES

Como resultado del análisis económico se determinó como alternativa una planta de producción de 285.000 litros/día teniendo en cuenta las necesidades y costos de operación para cada nivel de producción, ya que se pueden disminuir estos costos hasta en un 45,6% si este proceso se puede acoplar a una planta de producción en operación que cuente con equipos para la etapa de separación y tratamiento de efluentes.

Los costos podrían disminuir si se aplican las exenciones que prevé el estatuto tributario durante los primeros tres años.

Desde el punto de vista ambiental, usar los residuos y las hojas para este proceso disminuye hasta en un 74% el nivel de emisiones de dióxido de carbono, todo esto se afirma teniendo en cuenta las tendencias mundiales, y la producción de biocombustibles a partir de residuos lignocelulósicos, que es materia de estudio día a día, lo que ocasiona que este proyecto se convierta en algo de mucho interés para ajustar las operaciones y condiciones del proceso dentro del grupo Grubioc, con el fin de buscar y precisar los factores económicos en el objetivo del montaje de una planta a futuro que beneficie a la región en cuanto a la disminución de la tasa de desempleo (el Dane tenía una estimación del 7,9% a octubre de 2014), debido a que la cantidad de operarios requeridos es de 130 empleos directos para las siete etapas de operación.

Es necesario continuar con futuras investigaciones, ya que es importante seguir haciendo uso estratégico de simuladores comerciales para evaluar una gran posibilidad de escenarios con los cuales es posible tomar una decisión más acertada y en menor tiempo. Igualmente, es necesario seguir considerando con detalle criterios basados en poder calorífico, humedad, emi-

sión de contaminantes, aspectos cualitativos asociados a su proceso productivo, impacto de producción y consumo.

Se recomienda continuar con el proyecto a partir de ajustes realizados en los experimentos del grupo de investigación y con ello avanzar a la etapa de factibilidad, donde se presenten los modelamientos y sea evidenciable deducir a través del punto de equilibrio de la planta que se monte con una producción de 250.000 a 300.000 litros/día. Así mismo, los costos disminuyen hasta en un 8% en transporte de materia prima y servicios industriales si se utiliza esta planta como anexa a otra que ya esté operando.

REFERENCIAS

- Asocaña. (2013). Informe anual 2012-2013. Asocaña. 76 pp.
- Avella Guzmán, O. R. (2008). *Etanol lignocelulósico a partir de residuos agrícolas*. Bogotá: Universidad Distrital.
- Bacca Urbina, G. (2006). *Evaluación de proyectos*. 5ª Edición. México D. F.: McGraw-Hill. 339 pp.
- Balat, M., Balat, H., & Cahide, O. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, 551-573.
- Cadavid López, K. T., & Medina Herrera, R. (2012). Selección y ajuste de un modelo cinético de la fermentación alcohólica de hidrolizados de residuos deslignificados de caña de azúcar utilizando un microorganismo nativo. Tesis. Cali: Universidad del Valle.
- Chain, N. S., & Chain, R. (1996). *Preparación y evaluación de proyectos*. 3ª Edición. México D. F.: McGraw-Hill.
- Chávez, C. P. (2013). *Deslignificación por explosión con vapor de los residuos de cosecha de la caña de azúcar en el proceso de obtención de etano*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- De la Cruz Delgado, M., López Velasco, J. L., Flórez Pardo, L. M., & López Galán, J. E. (2013). Memorias Del II Congreso Iberoamericano sobre Biorefinerías. *CYTED*, 1(1), 611-617.
- Empresa Alibaba. (2013). Línea laboratorios NREL, Genencor. Disponible en: <http://www.alibaba.com>
- Empresa Bombas Hydral. (2013). Disponible en: <http://www.bombashydral.com>.
- Federación Nacional de Biocombustibles. (2013). Disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com>
- Gómez D., R. B. (2007). Determinación de la viabilidad comercial de exportación de alcohol carburante de Colombia hacia Estados Unidos. Bogotá: Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Administración Ambiental.
- Kazi, F., Fortman, J. A., Anex, R. P., Hsu, D., Aden, A., Dutta, A., & Kothandaraman, G. (2010). Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. *Journal Fuel*, 89, 20-28.
- Prasad, S. S., Singh, A. & Joshi, H.C. (2007). Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 1-39, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.007>
- Rodríguez, C. H. (2009). *Caracterización de los polisacáridos presentes en los residuos de cosecha (hoja y cogollos) de tres variedades (CC8475, CC8592, V715) de caña de azúcar*. Cali: Universidad del Valle.
- Seider, W. D., Seader, J.D. & Lewin, D.R. (2009). *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation*. Ed. J. Wiley. Third Edition.