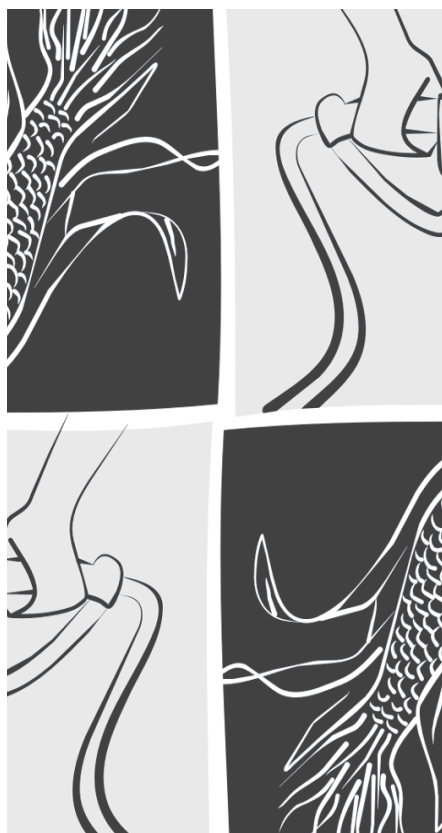


Evaluación económica

del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz

**María Isabel Montoya R.**

Ingeniera Química. Integrante del Grupo de Investigación en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
mariaisa1682@yahoo.com

Julián Andrés Quintero S.

Ingeniero Químico. Integrante del Grupo de Investigación en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
july9957@yahoo.com

Oscar Julián Sánchez T.

M. Sc. en Biotecnología. Profesor Departamento de Ingeniería e investigador del Grupo en Alimentos y Agroindustria, Universidad de Caldas.
osanchez@ucaldas.edu.co

Carlos Ariel Cardona A.

Ph. D. Ingeniería Química. Profesor Departamento de Ingeniería Química. Investigador del Grupo en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
ccardona@nevado.manizales.unal.edu.co

Recepción: 06 de junio de 2005 | Aceptación: 02 de septiembre de 2005

Resumen

En este trabajo se realizó la evaluación económica de los procesos de obtención de etanol a partir de maíz y caña de azúcar, encontrándose que para las condiciones actuales del país el proceso con mayor factibilidad económica es aquel a partir de caña de azúcar. Se confirmó que dentro de los costos de producción, el mayor aporte es debido a la materia prima, al igual que el mayor consumo energético

del proceso se da en la sección de separación y deshidratación de etanol. Para llevar a cabo el análisis económico, se efectuó la simulación de los dos esquemas seleccionados en el software Aspen Plus con el fin de obtener la información mínima requerida para el dimensionamiento de los equipos y la determinación del consumo de fluidos de servicio. Los costos de capital, los costos de operación y los indicadores de factibilidad para los dos procesos se obtuvieron con ayuda del paquete Aspen Icarus Process Evaluator, para las condiciones específicas de Colombia.

Palabras Clave

Alcohol carburante
Análisis económico
Maíz
Caña de azúcar
Costos de capital
Costos de operación

Economic evaluation of the obtaining process of fuel ethanol from sugar cane and corn

Abstract

This work deals with the economic evaluation of two processes for fuel ethanol production, one from corn and another from sugar cane. It was found that for Colombian conditions the process with greater feasibility is the one involving sugar cane. It was confirmed that the greater contribution to production costs is due to the raw material, and that the mayor energy consumption in the process occurs in the separation and ethanol dehydration stage. In order to carry out the economic analysis, the simulation of the two selected schemes was made in Aspen Plus for obtaining the minimum data needed for equipment sizing and determination of utility requirements. The capital costs, the operational costs, and the feasibility indicators of both processes were obtained using the package Aspen Icarus Process Evaluator, under the specific conditions of Colombia.

Key words

Fuel ethanol
Economic analysis
Corn
Sugar cane
Capital cost
Operation cost

Introducción

Existe un creciente interés en el uso del alcohol carburante como sustituto de los combustibles fósiles, tales como la gasolina y el diesel. La mayor ventaja del etanol estriba en que puede obtenerse de recursos renovables como la biomasa, evitando así la contribución neta a la atmósfera de gases con efecto invernadero. De esta manera, el CO₂ producto de la combustión es nuevamente fijado por la biomasa durante su crecimiento.

El uso del etanol como combustible primario para los motores de combustión interna, se ha implementado en Brasil. Sin embargo, la principal utilización del etanol carburante corresponde a sus mezclas con gasolina en calidad de oxigenante de

la misma, lo que además permite reemplazar el uso del plomo como antidetonante (Casanova, 2002). A nivel mundial las materias primas más empleadas para la obtención de etanol son los cereales (especialmente el maíz) y la caña de azúcar, siendo los primeros más usados en Europa y Norte América, y la caña en Brasil (mayor productor de etanol a nivel mundial), la India y demás países tropicales (Wheals *et al*, 1999). En Colombia la Ley 693 de 2001 del Ministerio de Minas y Energía establece el uso de alcohol como oxigenante de la gasolina a partir del año 2005 en centros urbanos de más de 500.000 habitantes. Para suplir unas necesidades estimadas de 2.066.000 L/día, es necesaria la construcción en el país de 7 a 9 plantas de producción de alcohol carburante

(Acosta, 2003). Actualmente se encuentran en construcción 5 complejos alcoholeros a partir de caña de azúcar y se plantea la implementación futura de otras 5 plantas en diferentes regiones del país para la producción de bioetanol a partir de otras materias primas ricas en almidón (Federación Nacional de Biocombustibles, 2005; Asocaña, 2005).

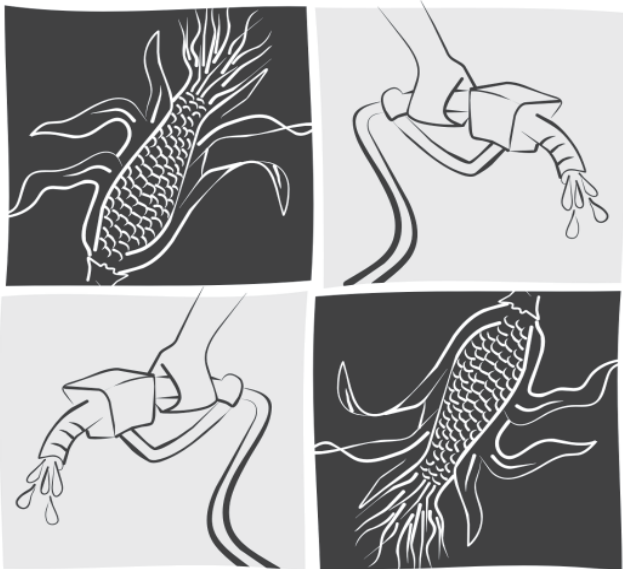
El proceso de obtención de alcohol etílico a partir de caña de azúcar comprende la extracción del jugo de caña (rico en azúcares), su acondicionamiento para hacerlo apropiado a las levaduras de la fermentación, la separación de la biomasa del caldo resultante para dar paso a la concentración del etanol mediante operaciones unitarias y su posterior deshidratación, forma en que es utilizado como aditivo oxigenante. Para el proceso de obtención de etanol a partir de maíz es necesario hidrolizar las cadenas de amilosa y amilopectina presentes en el almidón, a fin de convertirlas en azúcares fermentables. La

degradación del almidón se lleva a cabo por procesos enzimáticos, luego de una etapa de gelatinización donde se solubiliza el almidón con el fin de hacerlo más accesible a las enzimas que hidrolizan este biopolímero (amilasas). El jarabe de glucosa resultante es el punto de partida para la fermentación alcohólica, donde se obtiene una solución acuosa que debe ser enviada a la etapa de recuperación de producto, tal como en el caso de la caña de azúcar.

La materia prima representa el mayor porcentaje dentro de los costos de producción de etanol (McAloon *et al*, 2000) sumando más del 60%. Una materia prima, abundante y barata, es

la biomasa lignocelulósica (principalmente residuos agroindustriales y forestales) pero su procesamiento no es aún rentable. De lo anterior se deriva la importancia de evaluar económicamente el proceso de obtención de bioetanol en un país como Colombia, rico en biomasa con alto contenido en azúcares y almidón, y donde se requiere la producción a gran escala de alcohol carburante.

En este trabajo se presenta la evaluación económica de dos procesos de obtención de etanol, uno a partir de caña de azúcar y otro a partir de maíz, con el fin de determinar cuál es la materia prima más apropiada para la producción de etanol en Colombia, cuál es la viabilidad económica de los proyectos y cuáles son las etapas del proceso que mayor consumo energético tienen. Adicionalmente se presenta



una metodología basada en la simulación - una herramienta de la ingeniería de procesos -, para la evaluación económica de diferentes alternativas tecnológicas en la producción de bioetanol a partir de diferentes materias primas.

1. Producción de etanol a partir de caña de azúcar

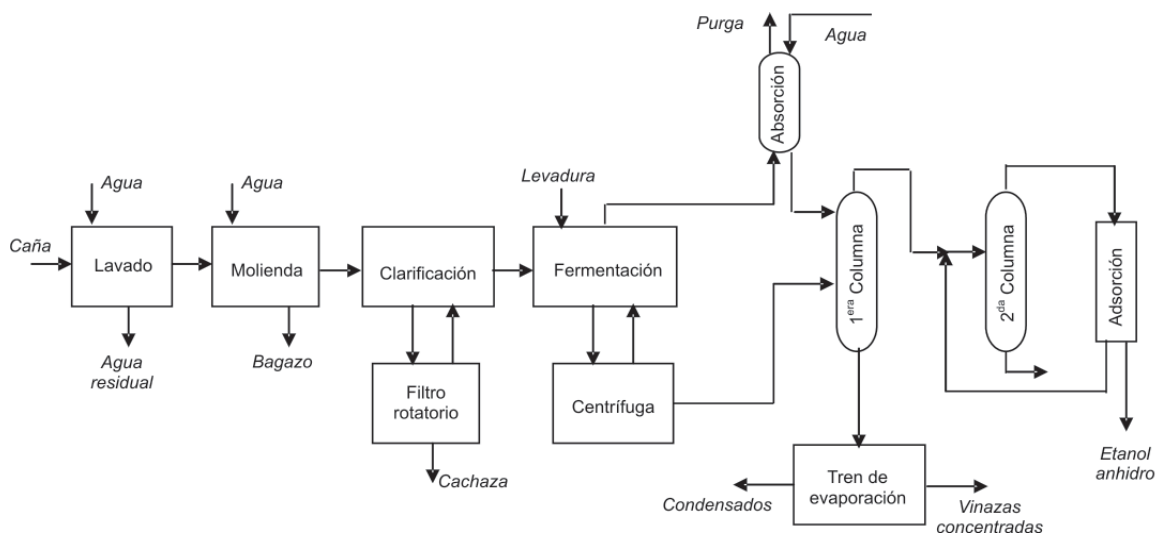
El rendimiento promedio del cultivo de caña de azúcar por hectárea en los ingenios azucareros colombianos para el año 2003 fue de 123 ton (Cenicafé, 2003), rendimiento superior al que se reporta para diferentes países y para el promedio mundial (65,29 ton/Ha) (FAOSTAT, 2004). En cuanto al rendimiento de etanol a partir de jugo de caña se reporta un valor de 75 litros de alcohol por tonelada de caña (Naranjo, 1993), para calidades de jugo que presenten una cantidad de azúcares reductores superior a 17% y grados brix superiores a 19.

El proceso a partir de caña de azúcar se observa en la Figura 1. (Montoya *et al*, 2004). La caña se somete a un lavado inicial con agua a 40°C y posteriormente a la molienda donde se extrae el jugo azucarado, retirando como subproducto el bagazo. El jugo se somete a un proceso de clarificación en el que se adiciona óxido de calcio y una pequeña porción de ácido sulfúrico.

El jugo clarificado es esterilizado y enviado a la fermentación mientras el lodo precipitado es retirado y enviado a un filtro rotatorio al vacío, donde se obtiene una torta húmeda conocida como cachaza. Durante la fermentación se producen, como productos del metabolismo de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, principalmente etanol y CO₂ a partir de la glucosa y fructosa del jugo. La levadura es continuamente recirculada al tanque de fermentación para aumentar la concentración celular.

Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se recupera el 98% del etanol arrastrado. Para concentrar el etanol se usa la destilación, la cual se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO₂ disuelto (que es enviado a la torre de absorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50% en peso de etanol y unos fondos con un contenido de alcohol inferior al 0,1% en peso. Esta columna también se alimenta con el etanol recuperado en la absorción de los gases de fermentación. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica (95% en peso); el agua restante es removida de la mezcla mediante adsorción en fase de vapor en dos lechos de tamices moleculares. El producto de la regeneración de los tamices es recirculado a la segunda columna de destilación.

Figura 1. Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de caña



El tratamiento de las vinazas consiste en su evaporación y posterior incineración. La función del tren de evaporación es concentrar los sólidos solubles y demás componentes poco volátiles presentes en las vinazas hasta un valor donde sean aptos para su incineración (Merrick, 1998). Los condensados de los evaporadores son recolectados junto con los fondos de la segunda columna de destilación y utilizados como agua de proceso.

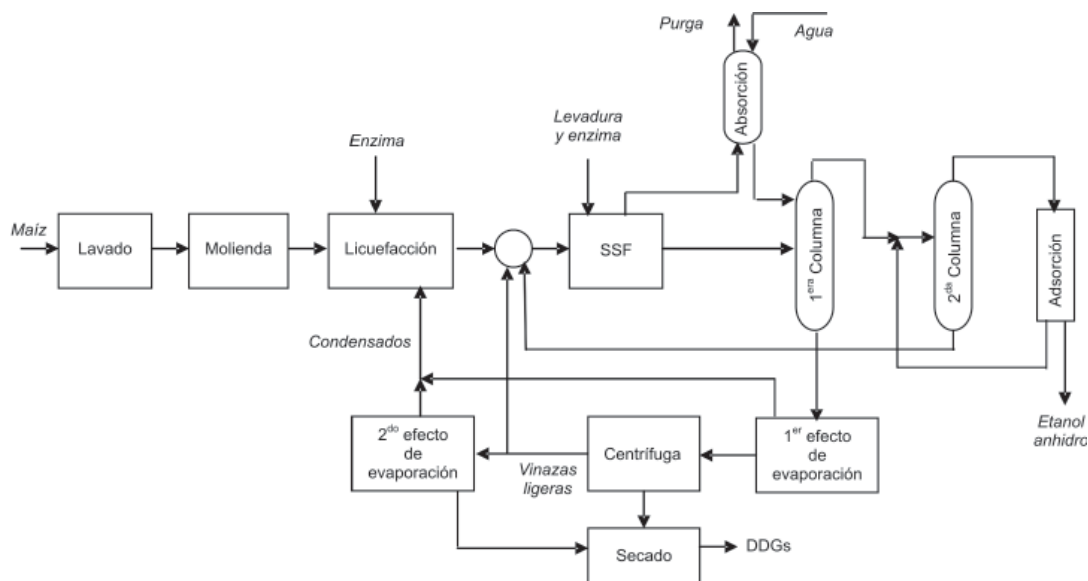
2. Producción de etanol a partir de maíz

En Colombia el rendimiento de producción de maíz en el año 2003 fue de 2,1 ton/Ha, mientras que a nivel mundial Estados Unidos es el país con el mayor rendimiento (8.9 ton/Ha) (FAOSTAT, 2004). El bajo rendimiento en el país explica el hecho de que se importe el 75% del maíz requerido para la industria avícola y porcícola. En cuanto a los rendimientos a etanol, los procesos modernos de molienda en húmedo y molienda en seco poseen eficiencias superiores al 95% en la producción de etanol a partir de almidón con rendimientos entre 419,4 – 460,6 l/ton de maíz con moliendas en seco y de 403,1 l/ton de maíz con molienda en húmedo (Madson y Monceaux, 2001).

En el proceso a partir de maíz, presentado en la Figura 2. (McAloon *et al*, 2000), el maíz es lavado para retirar algunas impurezas y posteriormente triturado en la sección de molienda con el fin de llevar el grano a un tamaño entre 3 y 5 mm. En el proceso de licuefacción el grano es inicialmente mezclado con agua caliente para garantizar la gelatinización del almidón. Posteriormente se adiciona la enzima α -amilasa encargada de hidrolizar las cadenas de almidón a dextrinas, proceso denominado licuefacción.

La masa licuada es mezclada con una porción de vinazas ligeras provenientes del área de tratamiento de residuos con el fin de controlar el pH entre 4-5, y con agua proveniente de la sección de destilación para disminuir el porcentaje de sólidos que entran a la fermentación. Durante la fermentación se llevan a cabo dos procesos, la sacarificación de las dextrinas para su conversión a glucosa por la acción de la enzima glucoamilasa, y la fermentación de la glucosa a etanol mediante la levadura *S. cerevisiae*, razón por la cual se conoce este proceso como Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF, por sus siglas en inglés) (Madson, 2001). La separación y deshidratación del producto en este proceso se realiza de igual manera que en el proceso a partir de caña de azúcar: Los gases se lavan en una torre de

Figura 2. Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de maíz



absorción, el etanol se concentra en dos columnas de destilación y se deshidrata en dos lechos de tamices moleculares.

Para este proceso, el tratamiento de los fondos de la primera columna de destilación es diferente, pues en ellos se encuentran los demás componentes del maíz como el gluten, la proteína y la fibra, que deben ser recuperados como subproducto a fin de mejorar la economía del proceso. Para ello, este efluente se evapora parcialmente en un primer tren de evaporación y se envía a una centrífuga con el fin de separar los granos húmedos. La fracción restante (vinazas ligeras) se lleva al segundo tren de evaporación del cual se obtiene un jarabe con un contenido en sólidos totales de 55% en peso. El jarabe y los granos húmedos son mezclados y enviados a un secador rotatorio obteniéndose un subproducto con alto contenido proteínico conocido como granos secos de destilería con solubles (DDGS, por sus siglas en inglés) (Madson y Monceaux, 2001), el cual se utiliza como concentrado para alimentación bovina y porcina.

3. Metodología

La producción de etanol a partir de caña de azúcar y almidón de maíz puede describirse como un proceso compuesto de cinco etapas principales: Acondicionamiento de la materia prima, hidrólisis, fermentación, separación, deshidratación y tratamiento de efluentes. Para realizar la evaluación económica se seleccionaron dos esquemas de proceso, uno para cada materia prima.

La estimación de los balances de materia y energía de los esquemas anteriores para la producción de etanol anhidro a partir de caña de azúcar y maíz, se realizó usando el simulador de procesos Aspen Plus versión 11.1 (Aspen Technologies, Inc., EUA). Para el cálculo de los coeficientes de actividad se empleó el modelo termodinámico NRTL y para el comportamiento de la fase de vapor el modelo de Hayden-O’Connell. Parte de los datos para la simulación de las propiedades físicas fueron obtenidos del trabajo de Wooley y Putshe (Wooley y Putshe, 1996), así como los utilizados en un trabajo previo (Cardona y Sánchez, 2004).

La evaluación económica se hizo con el evaluador de procesos Aspen Icarus Process Evaluator (IPE) versión 11.1 (Aspen Technologies, Inc., EUA), que permite realizar diseños detallados, estimaciones, análisis de inversión y cronogramas, a partir de una mínima información como los resultados de la simulación de un proceso. Este evaluador posee una interfaz con el paquete Aspen Plus que permite transferir los resultados de la simulación, la cual se usó en este trabajo.

El análisis económico se estimó en dólares para un período de 10 años y una producción aproximada de 17.750 Kg/h de etanol anhidro, una tasa de interés del 20% anual, un valor de salvamento del 20%, el método de depreciación de línea recta y un impuesto de renta de 38,5%. Los precios y las condiciones económicas tomadas para este análisis se muestran en la tabla 1, para una tasa de cambio de 2.400 pesos/US\$.

Tabla 1. Información económica utilizada para el análisis de factibilidad

Descripción	Unidad	Precio
Etanol anhidro ¹	US\$/kg	0,5204
DDGS	US\$/kg	0,09858
Caña de azúcar ²	US\$/kg	0,01588
Maíz ²	US\$/kg	0,147
Electricidad	US\$/KWh	0,1341
Agua de enfriamiento	US\$/m ³	0,01
Vapor (690kPa)	US\$/ton	8,18
Operario	US\$/h	2,42
Supervisor	US\$/h	3,63

¹ Precio de venta que se estipula en la resolución 181710 de diciembre de 2003 del Ministerio de Minas y Energía.

² Promedio del costo de producción en Colombia.

En la evaluación de los costos de capital se tuvo en cuenta los costos de los equipos y su instalación, que se determinaron con base en el dimensionamiento de los mismos de acuerdo a los resultados de la simulación. El costo del equipo de deshidratación no fue calculado de esta manera, si no que fue tomado del valor referenciado por el

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que se obtuvo directamente del vendedor del equipo (Wooley *et al*, 1999). Para el proceso a partir de caña no se tuvo en cuenta el costo del vapor dentro de los costos de operación, ya que éste se genera en la caldera como producto de la combustión del bagazo.

4. Resultados

4.1 Requerimientos energéticos

Los requerimientos de energía térmica total y por áreas obtenidos a partir de los resultados de la simulación se encuentran en la tabla 2. En la figura 3 se esquematiza la distribución de estos requerimientos.

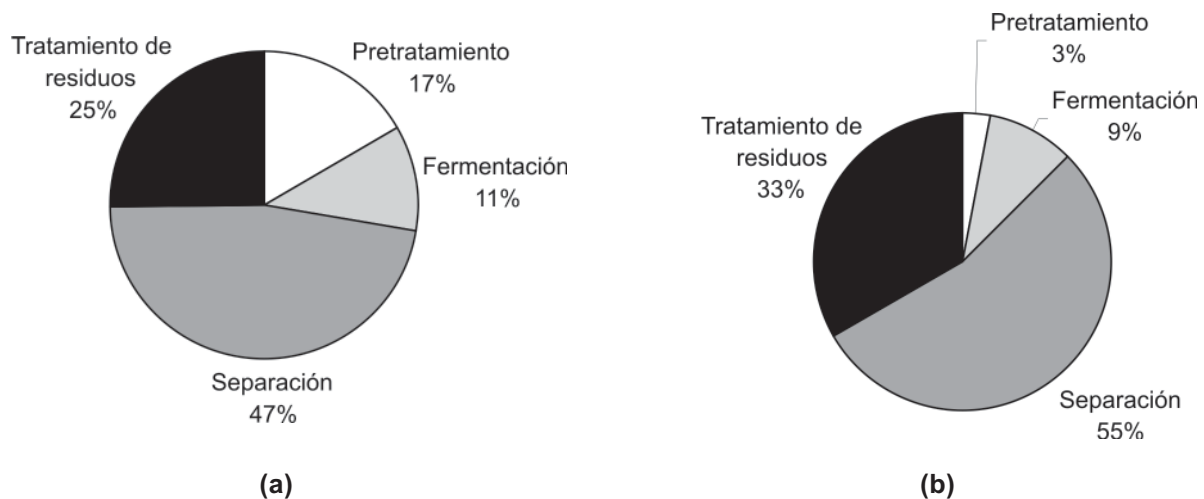
Tabla 2. Requerimientos energéticos

Áreas de proceso	Etanol a partir de Caña de azúcar		Etanol a partir de Maíz	
	MJ/h	MJ/m ³ *	MJ/h	MJ/m ³ *
Pretratamiento	74926,22	3344,73	8923,72	395,23
Fermentación	50462,85	2252,68	26540,12	1175,47
Separación	209936,39	9371,64	154378,95	6837,49
Tratamiento de residuos	113946,19	5086,60	94355,06	4179,01
TOTAL	449271,65	20055,65	284197,84	12587,22

*m³ de producto

De la tabla 2 se puede observar que el proceso a partir de caña posee un requerimiento energético mayor, influenciado principalmente por el área de pretratamiento ya que el flujo de materia prima que se trabaja en el proceso a partir de caña es seis veces el flujo del correspondiente al maíz, lo que incrementa notoriamente el consumo energético de la esterilización del jugo en comparación con la cocción de la corriente de maíz.

Figura 3. Distribución de los requerimientos energéticos por áreas para el proceso de obtención de etanol:
a. Caña de azúcar, b. Maíz



En la Figura 3 se observa que el área que consume más energía en ambos procesos es la separación, lo que concuerda con lo reportado en la literatura (Ligero y Ravagnani, 2003). En un análisis de diferentes tecnologías para la deshidratación de etanol (Montoya *et al*, 2005) se encontró que el menor consumo energético se presentaba con los tamices moleculares. Sin embargo, dicho estudio no incluyó la pervaporación (Szitkai *et al*, 2002), ni la destilación extractiva salina (Ligero y Ravagnani, 2003), que son tecnologías que también presentan bajos consumos, por lo que se recomienda su análisis. En cuanto a la fermentación, el requerimiento energético se debe principalmente al acondicionamiento del caldo de fermentación para el área de separación, el cual debe ser llevado a su punto de saturación para ser alimentado a la primera columna de destilación. Otra área que posee un requerimiento energético alto es la de tratamiento de residuos, como consecuencia de la concentración de un elevado volumen de vinazas.

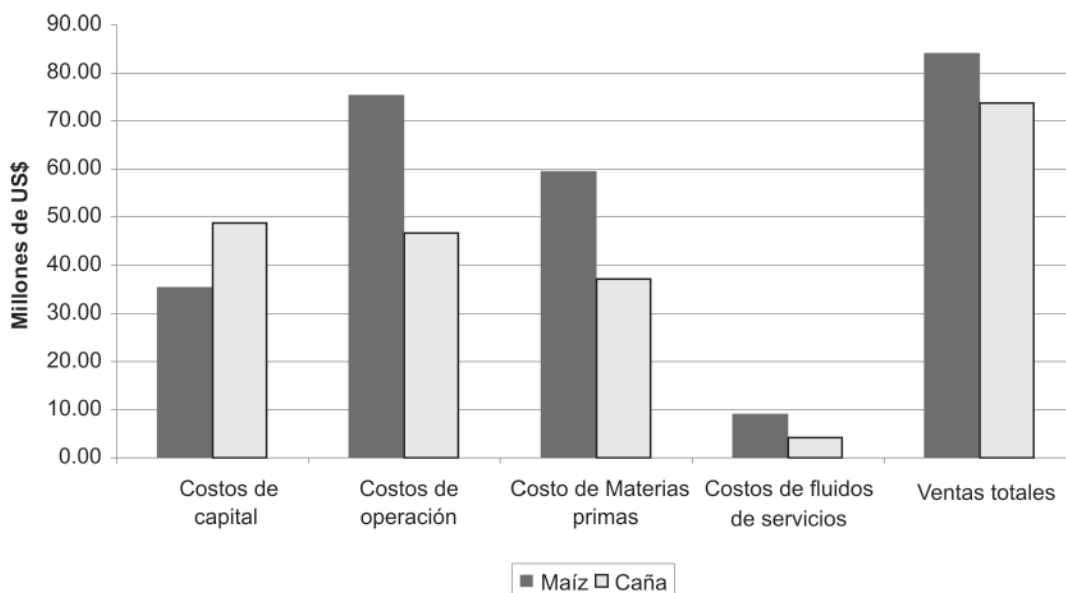
4.2 Costos de capital y operación

En la figura 4 se resumen los resultados de los costos de capital y operación de cada proceso.

En ella se observa que los costos de capital son mayores para el proceso a partir de caña debido al mayor requerimiento en capacidad de los equipos, y de la caldera adicional para la generación de vapor a partir de bagazo. Los costos de operación del proceso a partir de maíz son mucho más altos que los del proceso a partir de caña, debido tanto a los elevados costos de producción de maíz en el país como al de los fluidos de servicio (en particular el vapor), pues en el proceso a partir de caña no se incurre en consumo de combustible fósil para la generación de vapor. Las ganancias por venta de productos son mayores en el proceso a partir de maíz ya que se tiene en cuenta la obtención de subproductos (DDGS). En trabajos posteriores se podrían considerar subproductos a partir del proceso con caña de azúcar tales como carbón activado del bagazo, cachaza y levadura como alimento animal, compost de la digestión aeróbica de vinazas, entre otros.

En la tabla 3 se resumen los resultados de los costos de operación de cada proceso por año. De acuerdo a estos resultados son menores los costos de operación del proceso a partir de caña, debido principalmente a los bajos costos de la materia prima y la generación propia del vapor.

Figura 4. Resumen de los costos de capital y operación



En la Tabla 3 se resumen los resultados de los costos de operación de cada proceso por año. De acuerdo a estos resultados son menores los costos de operación del proceso a partir de caña, debido principalmente a los bajos costos de la materia prima y la generación propia del vapor.

Tabla 3. Resultados de los costos de operación por periodo (USD)

Costos de operación	Caña	Maíz
Materias primas	37.177.488,00	59.531.000,00
Fluidos de servicio	4.166.894,06	9.373.384,47
Personal	203.280,00	222.640,00
Mantenimiento	893.000,00	442.000,00
Cargos operacionales	50.820,00	55.660,00
Gastos generales	548.140,00	332.320,00
Subtotal	43.039.622,06	69.957.004,47
Gastos administrativos	3.443.169,76	5.596.560,36
Total	46.482.791,82	75.553.564,83

4.3 Costos de producción

Los costos de producción por litro de etanol para cada materia prima se presentan en la tabla 4. Como se ve, el principal costo en la producción de etanol se debe a la materia prima (72,4% y 85,9% para la caña y el maíz, respectivamente) siendo mucho mayor la influencia del costo del maíz.

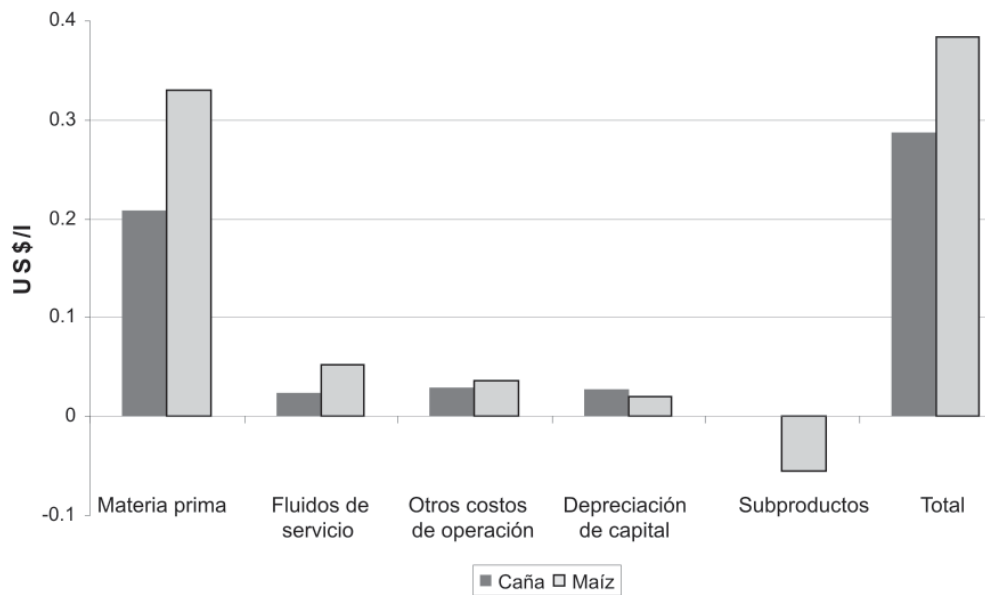
Tabla 4. Costos de producción por litro de etanol (US\$)

Costo/l de etanol	Caña	Porcentaje	Maíz	Porcentaje
Materia prima	0,2075	72,4	0,3296	85,9
Fluidos de servicio	0,0233	8,1	0,0519	13,5
Otros costos de operación	0,0287	10,0	0,0368	9,6
Depreciación de capital	0,0273	9,5	0,0197	5,1
Subproductos	0,0000	0	-0,0544	-14,2
Total	0,2867	100	0,3835	100

De lo anterior, surge la necesidad de estudiar otras materias primas amiláceas diferentes a las generalmente utilizadas (maíz, trigo, sorgo), tales como la yuca, la papa y el plátano, las cuales son de amplia disponibilidad en Colombia. Además, es aún más relevante explorar nuestra biodiversidad y utilizar materias primas nativas como el bore (tubérculo autóctono del Magdalena Medio Caldense), que no cuenta con un mercado consolidado y por lo tanto se convierte en un nuevo potencial que puede ser utilizado en este proceso.

De acuerdo con la Figura 5, la participación del costo de los fluidos de servicio es mayor en el proceso a partir de maíz que en el de caña, debido, como ya se mencionó, a la cogeneración de vapor a partir de bagazo. También se observa, que la obtención de subproductos dentro del proceso a partir de maíz es un punto primordial para la sostenibilidad del mismo, pues como puede apreciarse de no ser por la generación de subproductos, el costo de producción del etanol estaría por encima del precio de venta del producto, que es de 0,4111 US\$/l de etanol anhidro.

Figura 5. Costos de producción por litro de producto



4.4 Indicadores de factibilidad

Al observar los valores de la tasa interna de retorno y el valor presente neto para el último año de la vida económica del proyecto que se presentan en la tabla 4, se observa que la mejor posibilidad de inversión la da el proceso a partir de caña, con un valor presente neto de US\$ 27.069.850 y una tasa interna de retorno de 32,4%, mientras que para el caso del maíz el proyecto no es viable para este período de vida, ya que se tiene un valor presente neto negativo. Lo anterior indica que para el maíz la recuperación de la inversión no se da dentro de los diez años de vida útil del proyecto, mientras que para la caña ésta se logra en menor tiempo.

Tabla 4. Indicadores de factibilidad para dos procesos de obtención de etanol

Indicador	Etanol a partir de caña	Etanol a partir de maíz
Valor presente neto (US\$)	27.069.850,17	-9.801.294,20
Tasa interna de retorno (%)	32,4	-

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS) por la financiación de este trabajo.

Conclusiones

Los costos más altos en la producción de etanol corresponden en mayor medida a la materia prima, razón por la cual actualmente a nivel mundial se realizan intensos esfuerzos en la investigación y desarrollo de tecnologías para el procesamiento de biomasa lignocelulósica, debido a su menor costo y amplia disponibilidad.

En Colombia, los costos de producción de caña y maíz son elevados, pero en este último caso, la competencia con el sector alimenticio y la poca tecnificación de este cultivo, lo convierten en un recurso poco apto para su transformación a etanol. De ahí la necesidad de investigar materiales amiláceos alternativos, tales como la yuca o el bore, que son de alto rendimiento y disponibilidad. Actualmente se está adelantando la evaluación de estas materias por parte de nuestro grupo de investigación. Los resultados de estos estudios serán presentados en futuros trabajos.

El uso de software de simulación en la etapa de diseño y evaluación de procesos, se convierte en una potente herramienta que reduce costos y permite comparar de manera eficiente diferentes procesos, acercando los conceptos y decisiones lo más posible a la realidad. La metodología de evaluación planteada demostró ser adecuada para la comparación de esquemas tecnológicos alternativos a partir de diferentes materias primas. Lo anterior, permite al ingeniero seleccionar las variantes más promisorias y enfocarse desde un inicio en la minimización de los costos de aquellas etapas del proceso que demandan mayor inversión de capital y costos de operación.

Bibliografía

Acosta, A.D. (2003) "El Gran Desafío" Cali, junio. < From: <http://www.amylkaracosta.com/html/01-2003.htm>> (Consulta: marzo de 2004).

ASOCIACIÓN DE CULTIVADORES DE CAÑA DE AZÚCAR DE COLOMBIA. (2005) "Asocaña" <From: <http://www.asocana.com.co/faqs.asp#t-alcohol>> (Consulta: enero de 2005).

Cardona, C.A.; Sánchez, O.J. (2004) "Analysis of integrated flow sheets for biotechnological production of fuel ethanol" En: *16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004*. Praga, República Checa.

Casanova J. (2002) Red temática: "Utilización de Combustibles Alternativos en Motores Térmicos". Módulo 1. Medellín, septiembre 2-25.

CENICAÑA (2003) Servicio de Análisis Económico y Estadístico, Informe anual.

FAOSTAT (2004) Food and agricultural organization of the United Nations. Faostat database. <From: <http://www.fao.org>> (Consulta: septiembre de 2004).

Federación Nacional de Biocombustibles. (2005). "ABC de los Alcoholes Carburantes". < From: en: <http://www.minminas.gov.co/minminas/pagesweb.nsf>> (Consulta: junio de 2005).

Ligero, E.L.; Ravagnani, T.M.K. (2003). "Dehydration of ethanol with salt extractive distillation: a comparative analysis between processes with salt recovery" En: *Chemical Engineering and Processing*. Vol 42. pp. 543-552.

Madson, P; Monceaux, D. (2001). "Fuel Ethanol Production" *KATZEN International, Inc.*, Cincinnati, Ohio, USA.

McAloon, A; Ibsen, K; Taylor, F; Yee, W; Wooley, R. (2000). "Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks. National Renewable Energy Laboratory (NREL)". 1617 Cole Boulevard Golden, Colorado 80401-3393. NREL/TP-580-28893.

Merrick & Company. (1998) Wastewater Treatment Options for the Biomass-To-Ethanol Process; NREL Subcontract AXE-8-18020-01, Final Report, Aurora, CO.

Montoya, M.I., Quintero, J.A., Cardona, C.A. (2004). "Selección de tecnologías apropiadas para la producción de etanol carburante" En: *Revista EIDENAR*. Vol 2, No. 2. pp. 48-55.

Naranjo, N. (1993). Proyecto de factibilidad agro-económica para la producción de caña con destino a la Industria Licorera de Caldas. Gobernación de Caldas.

Szitkai, Z.; Lelkes, Z.; Rev, E.; Fonyo, Z. (2002). "Optimization of hybrid ethanol dehydration systems" En: *Chemical Engineering and Processing*. Vol 41. pp. 631-646.

Wheals, A; Basso, L; Alves, D; Amorim, H. (1999) "Fuel ethanol after 25 years" En: *TIBTECH*. Vol.17.

Wooley, R.; Putsche, V. (1996) "Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components". Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/MP-425-20685.

Wooley, R.; Ruth, M.; Sheehan, J.; Ibsen, K. (1999) "Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios" NREL/TP-580-26157