

## SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR Y MAÍZ

### RESUMEN

En este trabajo se muestran las tecnologías existentes para la obtención de etanol carburante a partir de dos materias primas potenciales de la agricultura colombiana, la caña de azúcar y el maíz. Se realizó la selección del proceso más adecuado para ambas materias primas teniendo en cuenta factores económicos y ambientales. Finalmente se simularon los procesos escogidos, obteniendo resultados semejantes a los de los procesos reales correspondientes. Se demostró que las técnicas de simulación son una herramienta poderosa que permite minimizar tiempo, costos y experimentación en el diseño de bioprocesos como los de obtención de alcohol carburante.

**PALABRAS CLAVES:** Etanol carburante, simulación, caña de azúcar, maíz, diseño de procesos.

### ABSTRACT

*In this work, current technologies for fuel ethanol production are shown. Two potential Colombian feedstocks were evaluated: sugar cane and corn. The most suitable process for each raw material was selected taking into account economical and environmental criteria. Finally, chosen processes were simulated, obtaining similar results related to real processes. Simulation techniques demonstrated to be a powerful tool allowing the minimization of time and expenses during the experimental runs required for process design.*

**KEYWORDS:** Fuel ethanol, simulation, sugar cane, maize, process design

### CARLOS ARIEL CARDONA

Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.  
Departamento de Ingeniería  
Química, Universidad Nacional de  
Colombia sede Manizales  
ccardonaal@unal.edu.co

### ÓSCAR JULIÁN SÁNCHEZ

Ingeniero Químico, M.Sc.  
Departamento de Ingeniería  
Universidad de Caldas  
osanchez@ucaldas.edu.co

### MARÍA ISABEL MONTOYA

Ingeniera Química  
Universidad Nacional de Colombia  
sede Manizales  
mariaisal1682@yahoo.com

### JULIÁN ANDRÉS QUINTERO

Ingeniero Químico  
Universidad Nacional de Colombia  
sede Manizales  
july9957@yahoo.com

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el biocombustible más importante es el etanol, producto 100% renovable obtenido a partir de cultivos bioenergéticos y biomasa. El etanol carburante es utilizado para oxigenar la gasolina, permitiendo una mejor oxidación de los hidrocarburos y reduciendo las emisiones de monóxido de carbono, compuestos aromáticos y compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera [1]. El uso de alcohol etílico como combustible no genera una emisión neta de CO<sub>2</sub> sobre el ambiente debido a que el CO<sub>2</sub> producido en los motores durante la combustión y durante el proceso de obtención del etanol, es nuevamente fijado por la biomasa mediante el proceso de fotosíntesis.

Entre los cultivos bioenergéticos más usados para la producción de etanol la caña de azúcar es la materia prima más utilizada en países tropicales tales como Brasil e India. En Norte América y Europa el etanol carburante se obtiene del almidón presente en el maíz y los cereales [2].

El proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar comprende la extracción del jugo de caña (rico en azúcares) y su acondicionamiento para hacerlo más asimilable por las levaduras durante la fermentación. Del

caldo resultante de la fermentación debe separarse la biomasa, para dar paso a la concentración del etanol mediante diferentes operaciones unitarias y a 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 en azúcares apropiados para la fermentación. La degradación del almidón se lleva a cabo por procesos enzimáticos después de una etapa de gelatinización donde se solubiliza el almidón con el fin de hacerlo más accesible a las amilasas. El jarabe de glucosa resultante es el punto de partida para la fermentación alcohólica donde se obtiene una solución acuosa de etanol que debe ser enviada a la etapa de recuperación de producto, tal como en el caso de la caña de azúcar.

En un trabajo anterior [3], se estudiaron varias configuraciones para la producción biotecnológica de etanol a partir de biomasa lignocelulósica (con composición estándar). Estas configuraciones fueron simuladas y analizadas desde el punto de vista del consumo energético. En este trabajo se pretende realizar un estudio utilizando otras materias primas como la caña de azúcar y el maíz. Una amplia revisión sobre cada una

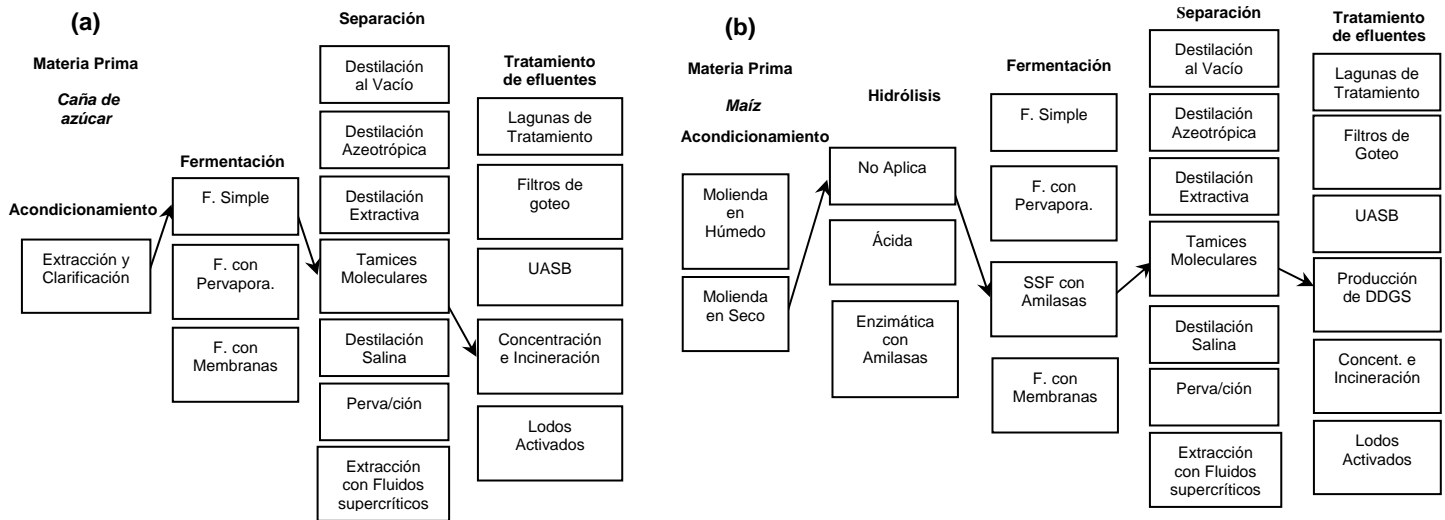


Figura 1. Esquemas para la producción de etanol carburante a partir de: (a) Caña de Azúcar (b) Maíz

de las tecnologías utilizadas para el procesamiento de estas materias primas se encuentra en [4, 5].

El diseño de procesos de obtención de alcohol carburante se hace muy complejo debido a la gran cantidad de variantes tecnológicas posibles. La simulación fundamentada en principios termodinámicos y cinéticos juega un papel fundamental en la síntesis de procesos, ya que permite reducir drásticamente el trabajo experimental, el cual podría tornarse poco efectivo si dicha síntesis se basa exclusivamente en resultados de planta piloto. De otro lado, aunque algunas compañías nacionales han adquirido la tecnología de producción de alcohol carburante “llave en mano”, se hace necesario crear una base tecnológica sólida que permita en un futuro soportar las necesidades de adaptación y transferencia de este tipo de tecnologías que surgirán en la industria colombiana.

## 2. 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 y deshidratación, y tratamiento de efluentes.

Para la selección de las tecnologías en cada etapa se aplicó una metodología de evaluación cualitativa como se expone en [4], donde se tienen en cuenta las ventajas y desventajas de cada tecnología con respecto a aspectos económicos y ambientales, dando una importancia de 80% a los factores económicos y 20% a los ambientales [6]. En la figura 1 se muestran las tecnologías existentes para cada etapa de proceso y la configuración

seleccionada para la simulación de acuerdo a cada materia prima.

### 2.1 Procedimiento de simulación

La simulación de los esquemas tecnológicos 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). Se empleó para el cálculo de los coeficientes de actividad el modelo termodinámico NRTL y para el comportamiento de la fase de vapor el Hayden-O’Connell. Los componentes tenidos en cuenta para la simulación comprenden los provenientes de la materia prima e insumos: lípidos, proteínas, cenizas, fibra, almidón, azúcares, enzimas y amoníaco (como fuente de nitrógeno), y los formados en la etapa de fermentación: etanol, dióxido de carbono, biomasa, acetaldehído, oxígeno, alcoholes de fusel y glicerol. Parte de los datos para la simulación de las propiedades físicas fueron obtenidos del trabajo de Wooley y Putshe (1996) [7]. La capacidad de las plantas simuladas fue de 537.720 L/d.

Para la simulación de las áreas de separación se aplicó el método corto DSTWU basado en el modelo de *Winn-Underwood-Gilliland* incorporado al Aspen Plus, que proporcionó una estimación inicial del número mínimo de etapas teóricas, de la relación de reflujo, la localización de la etapa de alimentación y la distribución de los componentes. El cálculo riguroso de las condiciones de operación en las columnas de destilación se desarrolló con el módulo RadFrac basado en el método de equilibrio *inside-out* que utiliza las ecuaciones MESH.

## 2.2 Proceso a partir de caña de azúcar

En la figura 2 se muestra el esquema seleccionado del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de la caña de azúcar.

### 2.2.1 Acondicionamiento

El acondicionamiento consiste de un lavado inicial de la caña con agua a 40°C y posteriormente una molienda o trituración donde se extrae el jugo azucarado con agua a 60°C, retirando como subproducto el bagazo con un contenido en fibra de alrededor del 46%, que puede ser utilizado en la generación de vapor.

El jugo de caña obtenido se somete a un proceso de clarificación en el que se le agrega óxido de calcio y una pequeña porción de ácido sulfúrico con el fin de disminuir el pH a 4,5 y provocar la hidrólisis de la sacarosa en hexosas. En el recipiente clarificador se precipita un lodo, que debe ser retirado y enviado a un filtro rotatorio al vacío. De este filtro se obtiene una torta conocida como cachaza y un filtrado que es retornado al recipiente de clarificación. Finalmente el jugo proveniente de la clarificación es esterilizado a 105°C y enviado a la fermentación, a la cual debe ingresar con un contenido en azúcares entre 130-180 g/L [4].

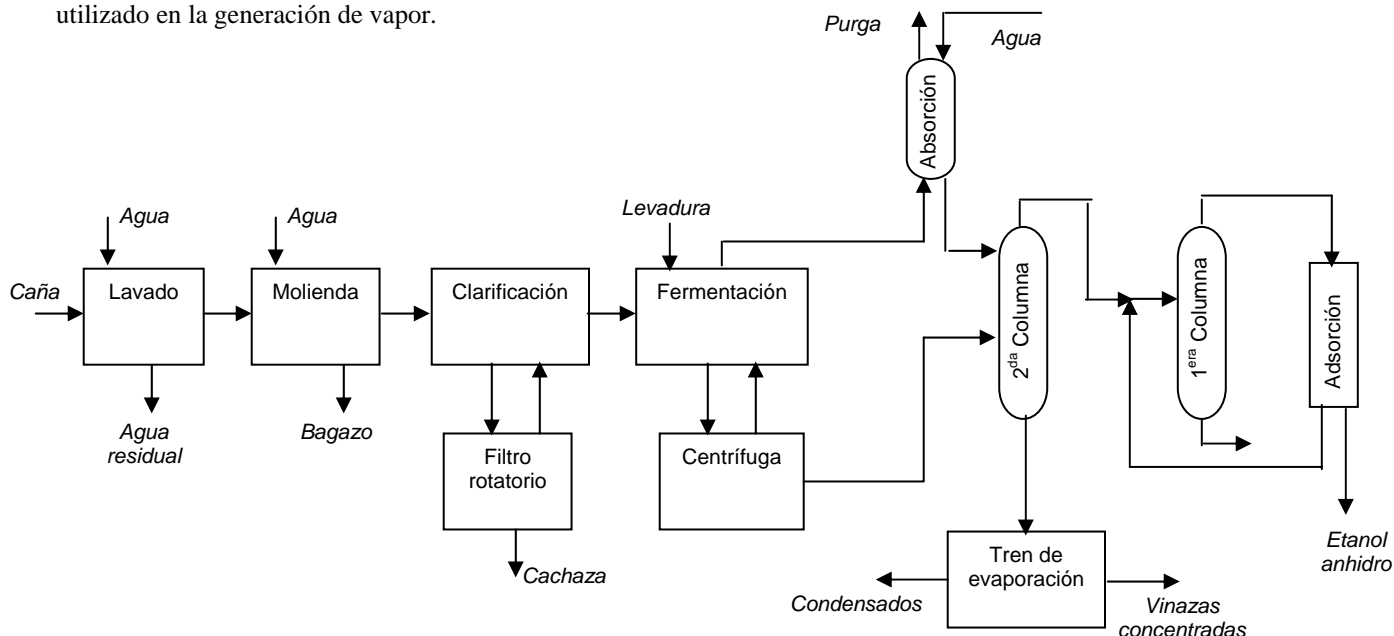


Figura 2. Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de caña

### 2.2.2 Fermentación

En esta etapa se lleva a cabo la fermentación de glucosa y una parte de la fructosa en etanol y dióxido de carbono, mediante la levadura *Saccharomyces cerevisiae* que es continuamente recirculada desde una centrífuga ubicada aguas abajo del fermentador. Además de la producción de etanol se tuvo en cuenta la producción en forma estequiométrica de biomasa y otras sustancias como acetaldehído, glicerol y alcoholes de fusel. Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se debe recuperar el 98% en masa del etanol arrastrado.

### 2.2.3 Separación y deshidratación

La destilación y la adsorción con tamices moleculares se usan para recuperar el etanol del caldo de fermentación obteniéndose etanol a 99,5% en peso de pureza. La destilación se lleva a cabo en dos columnas, la primera remueve el CO<sub>2</sub> disuelto (que es enviado a la torre de

adsorción) y la mayoría del agua obteniéndose un destilado con 50% en peso de etanol y unos fondos con una composición inferior al 0,1% en peso; en esta columna se alimenta junto al caldo de fermentación el etanol recuperado en la absorción proveniente de los gases de fermentación. La segunda columna concentra el etanol hasta una composición cercana a la azeotrópica.

El agua restante es removida de la mezcla mediante adsorción en fase vapor en dos lechos de tamices moleculares. El producto de la regeneración de los tamices es recirculado a la segunda columna de destilación.

### 2.2.4 Tratamiento de efluentes

De las aguas de residuo en el proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar las de mayor volumen son aquellas que provienen de los fondos de la primera columna de destilación, conocidas como vinazas. El tratamiento propuesto consiste en su evaporación y

posterior incineración. La función del tren de evaporación (cuatro efectos) es concentrar los sólidos solubles y demás componentes poco volátiles presentes en las vinazas hasta un valor cercano al 12% en peso, ya que en esta concentración se hacen aptas para su incineración [9]. Los condensados de los evaporadores son recolectados junto con los fondos de la segunda columna de destilación y utilizados como agua de proceso.

### 2.3 Proceso a partir de maíz

En la figura 3 se muestra el esquema seguido para la descripción del proceso a partir de maíz.

#### 2.3.1 Acondicionamiento

El acondicionamiento del grano consiste inicialmente de una molienda hasta un tamaño de 3 a 5 mm, posteriormente, se retiran algunas impurezas (polvos y arenas, principalmente). Al grano molido se le debe agregar agua caliente con el fin de obtener una mezcla con no más de un 40% en sólidos, apta para la licuefacción.

La mezcla obtenida es enviada a una etapa de prelicuefacción en la cual se logra transformar una parte de las cadenas de amilosa y amilopectina del almidón en dextrinas por acción de la enzima  $\alpha$ -amilasa. Posteriormente se pasa la mezcla a un equipo de cocción en el que se logra solubilizar el almidón a 110°C. La masa obtenida es enviada a la segunda etapa de licuefacción en la que se convierte por completo el

almidón a dextrinas. La licuefacción al igual que la prelicuefacción opera a 88°C.

La masa licuada es mezclada con una porción de vinazas ligeras provenientes del área de tratamiento de efluentes con el fin de controlar el pH entre 4-5 y con ácido cuando se requiera. La masa es también mezclada con agua proveniente de la sección de destilación, esto para disminuir el porcentaje de sólidos que entran a la fermentación.

#### 2.3.2 Sacarificación y fermentación simultáneas

Dos procesos se llevan a cabo en una misma unidad: la sacarificación de las dextrinas para obtener glucosa y la fermentación de la glucosa en etanol y dióxido de carbono, principalmente. La sacarificación es posible gracias a la acción de la enzima glucoamilasa que es alimentada continuamente al reactor. La fermentación se lleva a cabo mediante la levadura *Saccharomyces*

*cerevisiae* que es alimentada junto a una fuente de nitrógeno (amoniaco). Además de la producción de etanol se tuvo en cuenta la producción en forma estequiométrica de biomasa y otras sustancias como acetaldehído, glicerol y alcoholes de fusel. Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se debe recuperar el 98% en masa del etanol arrastrado.

#### 2.3.3 Separación y deshidratación

Se realiza de igual forma que en el proceso a partir de caña de azúcar.

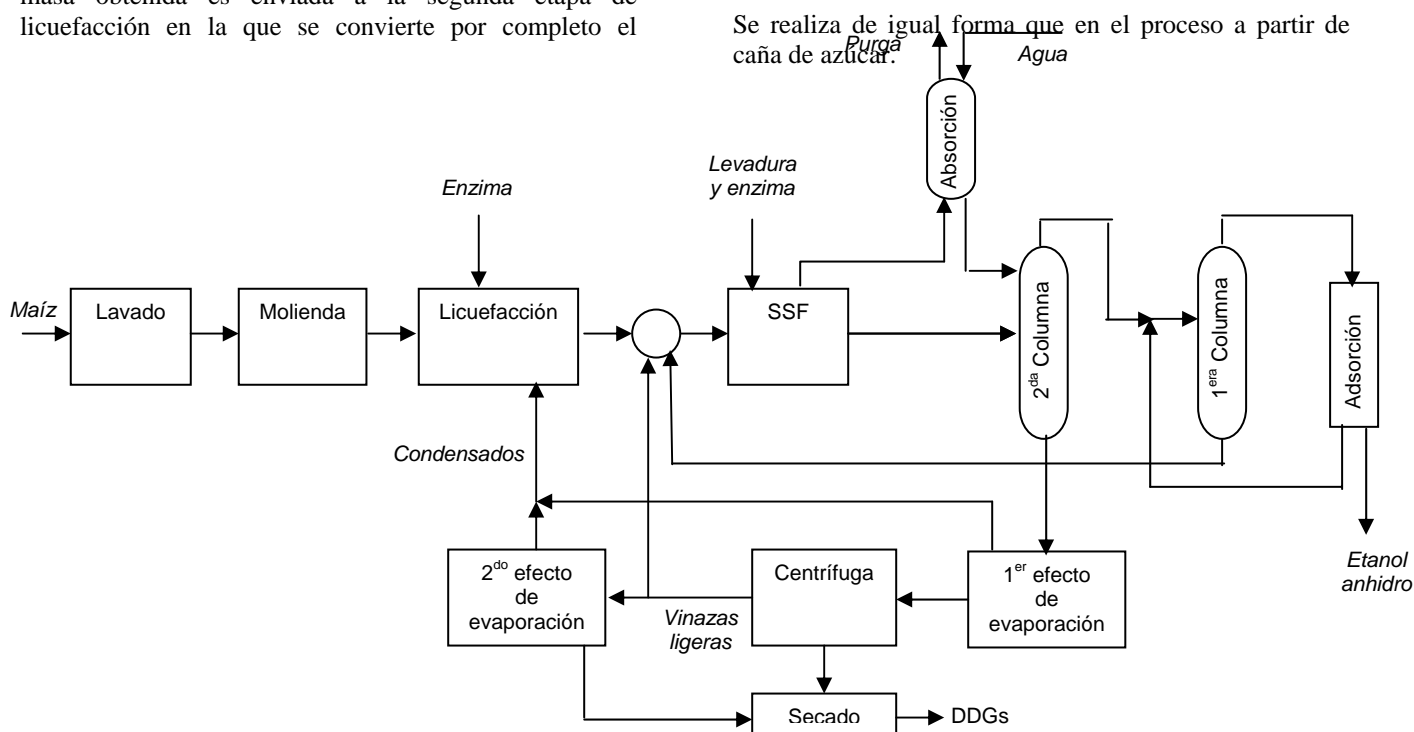


Figura 3. Esquema del proceso de obtención de etanol a partir de maíz

### 2.3.4 Tratamiento de efluentes

El producto de los fondos de la primera columna es parcialmente evaporado en el primer tren de evaporación que consta de dos efectos. Este efluente parcialmente concentrado es enviado a una centrífuga en la cual se obtienen granos húmedos con 35% en peso de sólidos totales. Una porción del efluente líquido de la centrífuga (vinazas ligeras) es recirculada al área de acondicionamiento, la parte restante se lleva al segundo tren de evaporación en el cual se obtiene un jarabe con un contenido en sólidos totales de 55% en peso [12].

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 destilación con solubles (DDGS, por sus siglas en inglés) el cual es utilizado y comercializado como alimento animal [10].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Para una producción de etanol anhidro de 537.720 L/d la materia prima requerida, calculada con base en un rendimiento promedio de 75 L/ton de caña es de 292,62 ton/h y 50,63 ton/h de maíz para un rendimiento de de 442 L/ton.

La composición de las principales corrientes de cada proceso se presenta en las tablas 1 y 2, para el proceso a partir de caña de azúcar y maíz respectivamente.

De estas tablas se pueden observar que las composiciones obtenidas coinciden con los datos de procesos industriales. Por ejemplo, el bagazo exhibe una humedad alrededor del 50%, la cachaza del 75% [11], al igual que un contenido de fibra del 46% en el bagazo.

Para el proceso a partir de maíz la corriente de subproductos (DDGS) normalmente contienen 9% en peso de humedad y entre 30 y 32% en proteína [12].

En el proceso a partir de maíz se genera una menor cantidad de vinazas por litro de etanol, debido a que el uso de la sacarificación y fermentación simultáneas permite una corriente de entrada al fermentador más concentrada.

Los requerimientos de energía térmica por áreas y totales obtenidos a partir de los resultados de la simulación se encuentran en la tabla 3. En ella se puede observar que el proceso a partir de caña posee un requerimiento energético mayor, influenciado principalmente por el área de acondicionamiento. En esta etapa la materia prima requerida en el proceso a partir de caña es casi 6 veces la de maíz, lo cual incrementa notoriamente el consumo energético en la esterilización del jugo respecto al de la cocción del maíz.

Corrientes	Caña	Bagazo	Cachaza	Purga	Producto	Vinazas concentradas
Flujo total (kg/h)	292618,774	57782,655	19421,443	17142,403	17696,991	75753,143
% peso						
Etanol	-	-	-	0,02	99,65	-
Azúcares	14	1,36	-	-	-	9,4
Fibra	10	46,33	12,82	-	-	-
CO <sub>2</sub>	-	-	-	98,25	-	-
Proteína	0,4	1,34	2,05	-	-	-
Agua	74,5	50,57	75,46	1,67	0,35	89,23
Ceniza	0,5	0,25	2,57	-	-	0,97
Otros	0,6	0,14	7,09	0,06	-	0,39

Tabla 1. Principales corrientes y composiciones obtenidas en el proceso a partir de caña de azúcar

Corrientes	Maíz	Purga	Producto	DDGs
Flujo total (kg/hr)	50629,999	17253,855	17837,238	12391,445
% peso				
Etanol	-	0,05	99,5	-
Azúcares	2,19	-	-	1,9
Almidón	60,59	-	-	0,17
Fibra	8,21	-	-	33,46
CO <sub>2</sub>	-	98,13	-	-
Grasas	3,64	-	-	14,8
Proteína	8,69	-	-	35,41
Agua	15,5	1,81	0,5	9,23
Ceniza	1,18	-	-	4,79
Otros	-	-	-	0,22

Tabla 2. Principales corrientes y composiciones obtenidas en el proceso a partir de maíz

Áreas de proceso	Etanol a partir de Caña de azúcar		Etanol a partir de Maíz	
	MJ/h	MJ/m <sup>3</sup> *	MJ/hr	MJ/m <sup>3</sup> *
Acondicionamiento	74926,22	3344,73	8923,72	395,234669
Fermentación	50462,85	2252,68	26540,12	1175,47119
Separación	209936,39	9371,64	154378,95	6837,49817
Tratamiento de residuos	113946,19	5086,60	94355,06	4179,01873
<b>TOTAL</b>	<b>449271,65</b>	<b>20055,65</b>	<b>284197,84</b>	<b>12587,2228</b>

\*Requerimientos energéticos por volumen de producto

Tabla 3. Requerimientos energéticos

#### 4. CONCLUSIONES

La simulación del proceso global de obtención de alcohol carburante a partir de dos materias primas permite el subsiguiente análisis de las posibilidades de integración del proceso, así como proporciona las bases para el posterior diseño detallado del mismo y su optimización.

El diseño de procesos de obtención de alcohol carburante se hace muy complejo debido a la gran cantidad de variantes tecnológicas posibles. La simulación fundamentada en principios termodinámicos y cinéticos juega un papel fundamental en la síntesis de procesos, ya que permite reducir drásticamente el trabajo experimental, el cual podría tornarse poco efectivo si dicha síntesis se basa exclusivamente en resultados de planta piloto. De otro lado, aunque algunas compañías nacionales han adquirido la tecnología de producción de alcohol carburante "llave en mano", se hace necesario crear una base tecnológica sólida que permita en un futuro soportar las necesidades de adaptación y transferencia de este tipo de tecnologías que surgirán en la industria colombiana.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas", Colciencias, y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional sede Manizales, por la financiación de este trabajo.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

- CASANOVA J. (2002). Red temática: Utilización de Combustibles Alternativos en Motores Térmicos. Módulo 1. Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- WHEALS A.E., BASSO L.C., ALVES D.M.G., AMORIM H.V. (1999). Fuel ethanol after 25 years. *TIBTECH*, vol. 17, no. 12, pp. 482-487.
- CARDONA C.A., SÁNCHEZ O.J. (2004). Analysis of integrated flow sheets for biotechnological production of fuel ethanol. In: PRES 2004, 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2004. Prague, Czech Republic. August 2004.
- MONTOYA M.I., QUINTERO J.A. (2005). *Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante*. Trabajo de grado Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia: Manizales. 115 p.
- MONTOYA M.I., QUINTERO J.A., CARDONA C.A. (2004). Selección de tecnologías apropiadas para la producción de etanol carburante. *Revista EIDENAR*, vol. 2, no. 2.
- CHEN H., WEN Y., WATERS M.D., SHONNARD D.R. (2002). Design guidance for chemical processes using environmental and economic assessments. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, no. 18.
- WOOLEY R., PUTSCHE, V. Development of an ASPEN PLUS. (1996). Physical Property Database for Biofuels Components. National Renewable Energy Laboratory: Golden, Colorado, USA. Report no. 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. National Renewable Energy Laboratory: Golden, Colorado, USA. Report no. NREL/TP-580-26157.
- MERRICK & COMPANY. (1998). Wastewater Treatment Options for the Biomass-To-Ethanol Process. Merrick & Company: Aurora, Colorado, USA. Final Report.
- MADSON P.W., MONCEAUX D.A. (1995). Fuel Ethanol Production. In: Lyons T.P., Kelsay D.R., Murtagh J.E. (eds). *The Alcohol Textbook*. Nottingham University Press. 332 p.
- The Sugar Sector Environmental Report, Environmental Technology Program for industry. Cleaner Production Program. Disponible en: <http://www.cpp.org.pk/etpirpt/SugarSectorReport.pdf>.
- 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: Golden, Colorado, USA. Report no. NREL/TP-580-28893.