

EL BANANO VERDE DE RECHAZO EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL CARBURANTE

ANGÉLICA MARÍA AFANADOR*

1. RESUMEN

Se describe el estado del conocimiento sobre la producción de alcohol anhidro a partir de banano de rechazo mediante un análisis comparativo de los estudios sobre el aprovechamiento de esta fruta en el Urabá antioqueño desde la década de 1980 hasta la actualidad. Contempla su disponibilidad como materia prima, su composición química, los procesos fisicoquímicos de transformación del banano en alcohol anhidro y los impactos ambientales potenciales de esta industria. Si bien es enorme el volumen de banano de rechazo, existe incertidumbre sobre su disponibilidad para la industria del alcohol, ya que se emplea en la producción de abonos y la alimentación animal. No obstante los avances y posibilidades de perfeccionar el proceso tradicional de producción de alcohol anhidro (hidrólisis ácida o enzimática y fermentación alcohólica), la fermentación ABE se perfila como un proceso industrial en el futuro cercano, apoyado en tecnologías de deshidratación como la pervaporación y bioadsorción. A la fecha no se conocen estudios de impacto ambiental de la producción de etanol a base de banano verde.

PALABRAS CLAVE: banano de rechazo; bioetanol; alcohol anhidro; producción de etanol; impactos ambiental.

2. ABSTRACT

The state of the art of the anhydrous alcohol production from banana rejects is described by a comparative analysis of the previous studies about the alternative uses of this fruit at Urabá Antioqueño from 1980 until now. It takes in consideration the availability of the fruit, its chemical composition, the physicochemical processes involved in the production of anhydrous bioethanol, and the potential environmental impacts of this industry. Whereas banana rejects are vast, uncertainty about its availability for the alcohol industry subsists because the fruit is utilized in composting and animal feeding. Although the advancements and possibilities to upgrade the traditional processes (meaning acid or enzymatic hydrolysis and alcohol fermentation), ABE fermentation emerges as an industrial process in the near future, accompanied by dehydration technologies such as pervaporation and bioadsorption. Environmental assessments about the ethanol production from green banana have not been reported thus far.

KEY WORDS: banana rejects; bioethanol; anhydrous alcohol; ethanol production; environmental impact.

* Ingeniera Ambiental, EIA. Investigadora. Grupo de Investigación Gabis –Gestión del Ambiente para el Bienestar Social–, EIA., con el apoyo del programa Jóvenes Investigadores de Colciencias. angelicaafanador@hotmail.com

Artículo recibido 4-II-2005. Aprobado con revisión 24-V-2005

Discusión abierta hasta enero 2006

3. INTRODUCCIÓN

El banano inició su posicionamiento en el mercado internacional en los años 30, y desde la década siguiente ha sido una de las frutas más comercializadas (Banatura, 2003; y Saldarriaga, 1982). Colombia cubre el 11% de la demanda internacional (Banatura, 2003), mediante la producción de Urabá (Apartadó, Carepa, Chigorodó y Turbo), con un 70%, y del norte del Magdalena (Córdoba, Río Frío, Orihuea, Sevilla y Aracataca), con un 30% en promedio (Roldán *et al.* 2004).

La producción de banano de exportación (variedad *Cavendish valery*) desató un problema ambiental, dadas las exigencias en el control de calidad que acarrearón rechazos de fruta entre 20% y 25% v/v (Hincapié, 2004). Estos rechazos han sido objeto de manipulación incontrolada, como la «...costumbre de disponerlos a cielo abierto y en botaderos no autorizados...» (Banatura, 2003, p. 38). Su degradación natural genera gases tóxicos y de efecto invernadero, atracción de vectores y producción de lixiviados que arremeten contra la calidad hídrica superficial y subterránea y la calidad de los suelos. Este problema ha sido estudiado por múltiples investigadores, quienes proponen el aprovechamiento de la fruta en la alimentación animal, el compostaje y la producción de almidón y etanol (IIT, 1980; Morales y Uribe, 1985; Agricultura de las Américas, 1989; Fuentes y Bayona, 1994).

En 1982, Saldarriaga estudió la fruta como fuente para producir etanol y concluyó que «... el volumen disponible [de banano de rechazo era] suficiente para alimentar una planta de 35.000-40.000 L/d de alcohol combustible» (p. 148). Por lo tanto, recomendó «... el montaje de una planta de pequeña capacidad ... en la cual se [pudiera] adelantar investigación [sobre los procesos de conversión del banano de rechazo en alcohol]» (Ibíd.). En efecto, en 1987, se puso en marcha una planta piloto en Currulao (corregimiento de Turbo); los experimentos determinaron que el almidón del banano se convertía totalmente en azúcar cuando se operaba en rangos de temperatu-

ra de 135°C-185°C, presión de 1,21 MPa-2,93 MPa, y concentración de 1%-3% de HCl. En lo sucesivo los ensayos se enfocarían en encontrar mejoras técnicas y procesos económicamente eficientes (CESET, 1989).

4. EL BANANO DE RECHAZO EN URABÁ

4.1 Disponibilidad

El banano de exportación se somete a un proceso de control de calidad intensivo, para que llegue a su destino en el estado de madurez acertado y libre de manchas, suciedades y cicatrices de maltrato. De acuerdo con la causa de rechazo, la fruta se clasifica en boleja, rechazo en empacadora y rechazo en puerto.

Cuando las expectativas de demanda de banano de exportación no se cumplen en el tiempo estipulado, el momento de corte de los racimos se supera y no permite que sean aprovechados para exportaciones futuras. Esta fruta queda disponible en los campos y es la denominada boleja, la cual se estima entre un 5% y 10% de la producción de exportación anual (Saldarriaga, 1982).

En la etapa de selección y empaque, se presentan rechazos en las operaciones de desgaje y desmane. En la primera se inspeccionan las dimensiones de la fruta, y en la segunda, las condiciones de la cáscara. De este modo, el rechazo de empacadora resulta de la exigencia de calidad estipulada por las comercializadoras de banano. Este rechazo se estima entre un 15% y 20% del total de la producción de exportación anual (Ibíd.).

En las terminales portuarias, previamente al embarque del banano, se realiza un último control de calidad, para desechar la fruta que pudo maltratarse en el transporte desde las plantaciones a la terminal. El rechazo en puerto es mínimo y lo han estimado en 2% de las exportaciones anuales (Ibíd.).



La producción de banano se rige por un estricto control de tiempos que garantiza que, una vez la fruta arribe al consumidor internacional, su estado de madurez sea el óptimo requerido. Para cumplir esas exigencias, la fruta sale del puerto colombiano en estado verde y en condiciones controladas de maduración. De ahí que el banano de rechazo disponible en Urabá se encuentra en ese estado de madurez.

El estimativo más reciente del volumen de banano de rechazo generado en Urabá lo publicó Banatura¹ (2003), y fue de 250.000 toneladas al año. Considerando que en 2002 el banano producido de exportación fue de 1.077.361 toneladas (Agrocadenas, 2004), el estimativo del volumen de rechazo equivale a 23,2% aproximadamente. Esto significa que los estimativos hechos desde la década de 1980 han permanecido constantes a lo largo del tiempo. No obstante, cabe destacar que aunque el banano de rechazo es abundante *per se*, no se cuenta con series estadísticas y reportes en condiciones confiables de cuantificación y seguimiento, que muestren el volumen disponible real de banano para la industria alcohólica.

Adicionalmente, es evidente que, desde el inicio del problema ambiental causado por el banano de rechazo, se han desarrollado diversas soluciones. Es así como «la fruta que no cumple con las exigencias de calidad ... se destina esencialmente a abastecer la demanda nacional; en otros casos es una fuente importante de materia orgánica (compost) o alimento para ganado» (SENA, 2003, p. 61). En este sentido se destaca la solución promovida por Banatura, que ha liderado proyectos de producción de bioabono a partir del banano y vástago en algunas fincas bananeras, actividad establecida con propósitos sociales, económicos y ambientales como la generación de empleo, fortalecimiento del tejido social y mejoramiento del ambiente (Londoño *et al.* 2002). Así mismo, existen tendencias en estudios recientes a desarrollar soluciones al problema ambiental desde

el proceso (producción más limpia y ecoeficiencia), encaminadas a disminuir el volumen de rechazo. (Olarte y Melida, 1991; Pasberg-Gauhl, 2002).

Lo expuesto hasta aquí muestra una clara incertidumbre sobre el verdadero volumen de banano disponible para producir etanol, por ende, es imperativo realizar un estudio de materia prima con indicadores y perspectivas de su disponibilidad real; pues si bien el banano de rechazo sería una materia prima de bajo costo, la instalación de una planta de alcohol a base de él demandaría como mínimo un volumen estándar que asegure la producción requerida de bioetanol.

4.2 Composición química

Los componentes químicos de cualquier fruta fluctúan de acuerdo con su variedad, estado de maduración y condiciones ambientales en que se desarrolle. Dado que el banano verde de rechazo producido en Urabá es el objeto de estudio en este caso, es imprescindible conocer su composición química, para contar con información confiable que permita estudiar con certeza el comportamiento químico y biológico de los procesos de producción de etanol a partir de esta fruta.

En este sentido, Iizuka *et al.* (1985) realizaron análisis a la pulpa y cáscara de bananos verdes producidos en Mindanao (Filipinas) y encontraron que la primera contiene alrededor de 20% de almidón y la segunda 3,6% en base húmeda (tabla 1). Por su parte, Sharrock y Lusty (2000) encontraron que los niveles de almidón en banano verde son del orden del 20%, y van disminuyendo hasta 1%-2% en banano completamente maduro, al mismo tiempo los azúcares solubles aumentan de 1% a 20%. En este caso la fuente no especificó la correspondencia de estos valores con el objeto, bien sea pulpa, cáscara o ambas; no obstante, a partir de los datos de la tabla 1, se presume que los análisis se hicieron sobre la pulpa.

¹ Concepto abreviado de Banano Natural; es un programa liderado por Augura, Asociación de Bananeros de Colombia, a través del cual se propone desarrollar prácticas productivas sostenibles en la agroindustria bananera.

Si bien el primer indicio sobre los datos de Iizuka *et al.* (1985) y Sharrock y Lusty (2000) es que su confiabilidad es baja por la ausencia de especificidad de la variedad del banano utilizada en los análisis de caracterización química, los datos son una fuente de comparación con los valores reportados para esta fruta. En efecto, Hincapié (2004) y Montes y Torres (2004) publicaron los resultados de un análisis bromatológico del banano verde de rechazo, cáscara incluida, que se genera en Urabá, los cuales fueron similares a

los de Iizuka *et al.* (1985) (Tabla 2). Los porcentajes son presentados en base seca.

Si se comparan las dos columnas de datos de la tabla 2, se observa que los valores presentan diferencias despreciables, lo cual otorga confiabilidad a los datos de composición de la fruta y facilitan un acercamiento a la composición química del banano verde de rechazo que se genera en el Urabá antioqueño.

Tabla 1. Análisis de banano verde: pulpa y cáscara (%base húmeda)

	Pulpa	Cáscara	Banano sin pelar
Proporción en peso	57,0	43,0	-
Humedad	73,3	91,0	81,0
Azúcares reductores	0,16	0,24	0,19
Sacarosa	2,1	2,0	2,06
Polisacáridos fácilmente hidrolizables	26,6	6,64	17,9
Almidón	20,3	3,64	13,1

Fuente: Iizuka *et al.* (1985)

Tabla 2. Análisis bromatológico banano verde cavendish valery

	Hincapié (2004)	Montes y Torres (2004)
Humedad	80,90%	78,12%
Materia seca	19,10%	21,88%
Almidón	No disponible	57,45%
Cenizas	5,80%	No disponible
Extracto etéreo	1,73%	No disponible
Proteína bruta	5,87%	4,80% ²
Fibra cruda	4,20%	No disponible
Extracto libre de nitrógeno	82,40%	No disponible
Fósforo (P)	0,09%	No disponible
Calcio (Ca)	0,14%	0,15%
Potasio (K)	2,31%	2,41%
Sodio (Na)	No disponible	0,05%
Cinc (Zn)	27 ppm	No disponible

² %N2=%proteína*F=4.8*5.7=27.36%, donde F=factor para proteína de cereales (Nouri, 1991; citado por Montes *et al.*)



5. EL BANANO VERDE EN LA PRODUCCIÓN DE ETANOL

Dado que el banano verde con cáscara tiene alto contenido de almidón y celulosa, se le considera como una materia prima potencial para la industria del bioetanol. El proceso tradicional de producción de alcohol a partir de almidones y celulosa contempla procesos químicos o biológicos (hidrólisis) para su conversión a jarabes azucarados, que una vez acondicionados se someten a la acción de levaduras que efectúan la fermentación alcohólica. El etanol resultante es una mezcla de alcohol y agua (generalmente 5-15% v/v de etanol), estado que impide su utilización directa en motores de combustión, dado que en esas condiciones no es miscible con la gasolina; por lo tanto, esta mezcla se lleva a procesos de destilación y deshidratación hasta obtener alcohol combustible (99,5% v/v), también denominado alcohol anhidro.

5.1 Hidrólisis

Comprende tres etapas sucesivas cuando se trata de materiales amiláceos: gelatinización, licuefacción y sacarificación. La primera consiste en un calentamiento progresivo de la suspensión de almidón para romper puentes de hidrógeno de las regiones cristalinas y conseguir un hinchamiento de los gránulos de almidón por absorción de agua, estado en el que se tornan susceptibles al ataque mecánico, químico y biológico. En la licuefacción se efectúa una hidrólisis parcial para disminuir el grado de polimerización y obtener equivalentes de dextrosa entre 10 y 12 unidades. Finalmente, en la sacarificación, se completa la hidrólisis en aras de obtener un jarabe de glucosa (Keim, 1983).

5.1.1 Vía química

El proceso se ejecuta en un medio ácido (HCl o H_2SO_4), con altas temperaturas y, en algunas ocasiones, altas presiones. En Colombia los intentos de producción de etanol con banano verde datan des-

de finales de los años 70; y fue terminando la década de 1980 cuando en Currulao se instaló una planta piloto con el ánimo de investigar el proceso.

Uno de los problemas técnicos que presentó dicha planta fue la alta viscosidad aportada por la pulpa y la cáscara, que afectaba la eficiencia del molino de martillos en la etapa de corte y maceración, dado que las fibras de las cáscaras se adherían a las cuchillas causando obstrucción en el proceso (Schlubach, 1987). No obstante, la autora recibió testimonio de un ingeniero químico que participó en el grupo de trabajo de la planta experimental en Currulao, según el cual dicho problema no fue causado por la viscosidad del sustrato, sino por su deficiente homogeneización en la etapa de maceración, debido a fallas de diseño y montaje del molino requerido para preparar correctamente la pulpa, la cáscara y el vástago, pues aquéllas no se separaban del vástago en las pruebas que se efectuaron en la planta. Este problema también fue reportado por Valencia *et al.* (1987), en su caso, las fibras largas causaban obstrucción en la válvula de toma de muestras del reactor. La alta viscosidad de la mezcla acondicionada también genera problemas de contacto entre el sustrato y el agente químico o biológico usado para sacarificar, lo que causa bajos rendimientos en el proceso. En efecto, múltiples autores recomiendan buscar alternativas efectivas para disminuir el tamaño de partícula del sustrato (Valencia *et al.* 1987; Botero y Pérez, 1993; Cano y Naranjo, 2002; Montes y Torres, 2004).

Iisuka *et al.* (1985) plantearon un método para evitar la formación de esa sustancia oscura y viscosa que se atribuye principalmente a la acción de las enzimas mono-oxidasas y difenol-oxidasas presentes en el banano que catalizan su oxidación y a las pectinas, los polisacáridos que cementan los tejidos vegetales primarios. Su propuesta consistió en calentar los bananos verdes (sin pelar) a 70 °C por 30 min, antes de macerarlos, y agregar enzimas pectinolíticas justo en el proceso de sacarificación y fermentación simultáneas (SSF por sus siglas en inglés).

El precalentamiento previene el color oscuro de la mezcla y gelatiniza el almidón y las enzimas pectinolíticas causan licuefacción, lo que genera una mezcla con baja viscosidad.

Brito y Granda (2004) estudiaron las condiciones de gelatinización del banano para hidrólisis ácida y encontraron que la adición de ácido previamente a la sacarificación favorece la homogeneización de la mezcla, garantizando disminución en la viscosidad y contacto efectivo entre el ácido y el sustrato. La eficiencia del proceso fue de 89,97%, en contraste con 65% y 67% obtenidas por Valencia *et al.* (1987) y Cano y Naranjo (2002) respectivamente, en las que no se consideró la etapa de gelatinización.

Vale la pena aclarar que los ensayos de Brito y Granda (2004) y Cano y Naranjo (2002) se realizaron a presión atmosférica, y los de Valencia *et al.* (1987) a 5 atm. Los procesos bajo presión mayor a la atmosférica implican mayores costos por equipos, pero menor consumo de ácido; no se encontraron evaluaciones comparativas de costos; sin embargo, se presume que los primeros son mayores que los segundos y que, por lo tanto, podría ser más económico tener montajes a presión atmosférica.

Brito y Granda (2004) realizaron preensayos para observar el comportamiento del pH, temperatura (T°) y tiempo de hidrólisis (t), y así determinar las condiciones de experimentación; éstas fueron: pH: 0,8-1,6; T° : 80 °C-94 °C; t : 600 min. El análisis estadístico reportó un modelo ajustado de primer orden que muestra una tendencia en la que el efecto del pH es mayor que el de la temperatura sobre el porcentaje de conversión de almidones a glucosa (la celulosa queda intacta). En este caso, disminuir aún más el pH favorecería la conversión; empero, causaría corrosión de equipos y gasto excesivo de ácido, pues en los preensayos comprobaron que el gasto de éste se incrementa ostensiblemente cuando se desea disminuir el pH a menos de 1. Aumentar la temperatura en con-

diciones atmosféricas no es posible, dado que el punto de ebullición de la mezcla se presenta en 95 °C, de acuerdo con los preensayos, así que para aumentar la temperatura es imprescindible cambiar las condiciones de presión. Adicionalmente, los autores evaluaron la posibilidad de mejorar la eficiencia, implementando un sistema de agitación; los ensayos practicados reportaron eficiencias del 94,25% en 300 minutos.

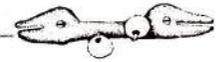
Es innegable que estos investigadores obtuvieron mayores eficiencias que los anteriores y, por lo tanto, si se desea continuar ahondando en esta línea es preciso retomar su trabajo. También cabe la posibilidad de hacer estudios comparativos entre hidrólisis a presión atmosférica e hidrólisis que considere la presión como variable independiente, sin prescindir de la evaluación económica para ambos escenarios.

5.1.2 Vía biológica

Consiste en la adición de enzimas (*v.g.* α -amilasas, β -amilasas, glucoamilasas) al sustrato acondicionado para la hidrólisis. La acción biológica es menos agresiva, porque ocurre a temperaturas menores y pH mayores que los usados en la hidrólisis ácida. Es un proceso más lento y costoso, condiciones que llevaron a relegarlo por años. Actualmente, la vía química se observa como una tecnología próxima a su completo desarrollo con muy poco espacio para la optimización económica, lo que genera expectativas sobre la vía biológica como objeto de investigación para hacerla viable técnica y económicamente (US DOE, 2004).

Uno de los primeros acercamientos al proceso de hidrólisis enzimática de banano verde, en el nivel local, fue reportado por Botero y Pérez (1993). Ellos utilizaron α -amilasas para la dextrinización y dextrozyme³ para la sacarificación. La eficiencia y productividad resultante fue muy baja; en 70 horas de operación la eficiencia no superó el 20%. No obstante estos

³ Mezcla de glucoamilasa y pululanasa que rompen amilopectina y glucógeno respectivamente.



resultados, se observó una tendencia marcada: a mayor concentración de sustrato (CS) y menor relación enzima-sustrato (E/S); los rendimientos se favorecen dentro de los intervalos de trabajo (CS: 10%, 15% y 20%; E/S: 0,5; 0,75; 1,0; 1,25). Los bajos rendimientos se atribuyen a las condiciones restrictas de operación, *v.g.* equipos de agitación y filtración inapropiados y dificultades para garantizar asepsia (Botero y Pérez, 1993). En la sacarificación fue necesario adicionar H_2SO_4 para ajustar el pH a 4,3; aspecto que implica aumento de costos por reactivos y contaminación del sustrato, lo cual no tiene sentido en la hidrólisis enzimática, puesto que una de sus ventajas es el carácter limpio del proceso *per se*.

Recientemente, Montes y Torres (2004) retomaron esa experiencia con el ánimo de incorporar mejoras al proceso; para tal fin incrementaron la temperatura (dextrinización: 85 °C-95 °C; sacarificación: 55 °C-62 °C) y el pH (dextrinización: 5,5-8,0; sacarificación: 4-5), y redujeron la E/S (dextrinización y sacarificación: 0,025-0,08). En 2,5 horas superaron los rendimientos del proceso reportados por sus pares anteriores. Después de evaluar la cinética de la reacción y efectuar un análisis estadístico de datos, observaron que a pH y E/S constantes el incremento de temperatura mejora los rendimientos, no obstante, cuando es muy alta causa inhibición de las enzimas. Asimismo, dentro de los intervalos de operación, la E/S y el pH señalaron una relación directamente proporcional con la productividad de la hidrólisis. Cuantitativamente, el análisis estadístico muestra las siguientes tendencias que inducen a las mejores productividades: dextrinización: T°: 74 °C-80 °C; pH: 8,5; E/S: 0,098; sacarificación: T°: 62 °C; pH: 5; E/S: 0,098.

En esta experiencia la eficiencia sigue siendo muy baja (alrededor del 28%), a pesar de que la productividad se aumentó significativamente; sin embargo, de ambos trabajos [Botero, A. y Pérez, P. (1993); y Montes y Torres (2004)] se obtiene un rango de E/S que genera tendencias de mejora en los rendimientos. En efecto, Montes y Torres (2004) sugieren intervalos de 0,09-0,2 para futuros experimentos. En este

aspecto, los autores recomiendan realizar ensayos de verificación en los siguientes intervalos e incluir la agitación como variable adicional: dextrinización: T°: 60 °C-80 °C; pH: 7,5-9; E/S: 0,09-0,2; sacarificación: T°: 60 °C-75 °C; pH: 4,8-5,5; E/S: 0,09-0,2.

En contraste con las bajas eficiencias de los procesos estudiados por estos autores, Iisuka *et al.* (1985) consiguieron eficiencias superiores al 95% en un sistema enzimático de SSF, utilizando glucoamilasa, enzimas pectinolíticas y levadura. Sus logros resultan prominentes, por lo que es importante retomar la información publicada por ellos para verificar el efecto de las enzimas pectinolíticas en la sacarificación, teniendo en cuenta que se presume que las bajas eficiencias en la hidrólisis enzimática son causadas por el contacto deficiente entre el agente biológico y el sustrato, a causa de la alta viscosidad de este último.

En cuanto a la disponibilidad de las enzimas, Krishna y Chandrasekaran (1996) demostraron que los residuos de banano, específicamente el vástago, son un sustrato adecuado para la obtención de α -amilasa mediante la fermentación en sólido con *Bacillus subtilis*. Sus ensayos indicaron una productividad 2,65 veces mayor que la obtenida empleando salvado de trigo como sustrato. Esto abre más posibilidades de aprovechamiento de los residuos agrícolas de las plantaciones bananeras, e implicaría autosostenibilidad en el caso de que en el nivel industrial se optara por la vía biológica.

5.2 Fermentación

La fermentación alcohólica es la transformación de sustratos azucarados por la acción de microorganismos, que durante su ciclo de vida consumen el sustrato y fabrican etanol y otros compuestos bioquímicos, como resultado de su metabolismo (Austin, 1984).

Desde inicios del siglo pasado, la fermentación, en el marco del proceso de producción de alcohol combustible, se ha realizado mediante procesos por

lotes; sin embargo, nuevas técnicas como la fermentación continua y la recirculación de células muestran ventajas en los costos operativos y de inversión (Bu'lock *et al.* citado por Joshi *et al.* 2001). Algunos métodos para mejorar la eficiencia de la fermentación continua incluyen la centrifugación mecánica y la inmovilización de células en polímeros gelificados (K-carragenan o el alginato de calcio), que favorecen la recirculación de una biomasa concentrada y la salida de un caldo alcohólico relativamente limpio (Joshi *et al.* 2001). Otro método es la floculación de los microorganismos y posterior recirculación de los que sedimenten; usando cepas con alta calidad fermentativa y de floculación *v.g.* *Saccharomyces uvarum*, se aminora el tiempo de producción de etanol y las pérdidas por evaporación (Joshi *et al.* 2001).

La levadura utilizada tradicionalmente en fermentación alcohólica ha sido la *Sacharomyces cerevisiae*, sin embargo, los avances en biotecnología han permitido reconocer otros microorganismos con facultades similares o mejoradas, *v.g.* la *Zymomonas mobilis*. La fermentación alcohólica de banano verde usando esta última ha sido objeto de estudios a escala de laboratorio en el contexto local por varios autores.

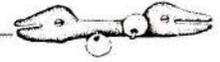
En 2002, Cano y Naranjo ensayaron la *Zymomonas mobilis* en una fermentación por lotes de una solución azucarada, preparada mediante hidrólisis ácida de banano verde. Después de 46 horas la eficiencia de la reacción fue del 95% y el etanol resultante presentó una concentración de 5,33% v/v.

Al año siguiente, Martínez y Lopera ensayaron un reactor de lecho fijo (tubular de 230 cm³) con células de *Zymomonas mobilis* inmovilizadas en alginato de calcio, como sistema continuo de producción de etanol, utilizando un jarabe glucosado preparado a partir de hidrólisis ácida de banano verde.

El biorreactor operó con dos tasas de dilución (TD), cada una con dos concentraciones de azúcares reductores (AR) (TD: 0,43 h⁻¹ y 0,69 h⁻¹; AR: 8-9 g/L y 68-69 g/L), para un total de cuatro combinaciones experimentales. La máxima producción de etanol lograda fue de 5,33 (g/L)/h, correspondiente a 7,78 g/L de etanol por cada paso o tiempo de retención (88 minutos en este caso). Esta producción equivale al 11% de conversión de glucosa en etanol, aproximadamente 22% de eficiencia del proceso.⁴ Las condiciones que condujeron a este resultado corresponden a TD: 0,69 h⁻¹; AR: 68-69 g/L.

No obstante la baja eficiencia de la fermentación continua, se infiere que podría ser más productiva que la fermentación por lotes desarrollada por Cano y Naranjo (2002), si al biorreactor se le instala un sistema de recirculación para que la glucosa que no alcanzó a convertirse en el tiempo de retención estipulado ingrese de nuevo al reactor en lugar de desecharse. Esto disminuiría el tiempo de producción, las pérdidas por evaporación y, presumiblemente, alcanzaría eficiencias razonables en menor tiempo (Joshi *et al.* 2001). Adicionalmente, es imperativo considerar el ciclo de vida de las células inmovilizadas, pues la cinética de la reacción depende en gran parte de ellas. Uno de los inconvenientes que se prevé en el sistema en continuo, a escala piloto o real, es este aspecto, ya que en la escala experimental la altura del lecho del biorreactor se duplicó en 14 horas, después de 18 horas ocupó el volumen efectivo y, transcurridas 21 horas, las esferas iniciaron el proceso de desintegración y liberación del sistema (Martínez y Lopera, 2003). En este sentido, se estima conveniente avanzar en estudios sobre mejoras en el sistema de inmovilización de levaduras, con miras a que su tiempo operativo sea lo suficientemente amplio para que el proceso de fermentación en continuo también sea eficiente desde el punto de vista económico.

⁴ [C₆H₁₂O₆ → 2C₂H₅OH + 2CO₂ + Calor] es la estequiometría simplificada de la reacción cuando el sustrato es glucosa.



Otro microorganismo promisorio para la fermentación es el *Clostridium spp*, estudiado en trabajos recientes sobre fermentación ABE (FABE) (Vargas 2003; López 2003; Montoya 2003). Su ventaja más sobresaliente es que desplaza la hidrólisis, pues actúa sobre los sustratos biológicos directamente para producir solventes (Acetona, Butanol, Etanol). En la categoría industrial, la FABE tuvo su auge y desarrollo durante 1900, no obstante, la incursión de procesos de síntesis química (v.g. petroquímica) hacia finales de la década de 1970 la relegaron, pues éstos mostraron ser menos costosos que la producción vía biotecnológica (Vargas 2003; López 2003).

Sin embargo, la FABE y los procesos biológicos en general han recobrado interés; las investigaciones al respecto trazan objetivos tendientes a superar cuellos de botella como los siguientes: la baja concentración de los productos finales de la FABE, debido a su toxicidad para las bacterias [(1-2)% v/v butanol es tóxico para el *Clostridium spp*], lo cual implica altos costos para recuperar el producto del mosto; el bajo costo de los solventes en el mercado con respecto al costo de las materias primas; y la alta sensibilidad del medio a contaminarse, que genera aumento de costos en la esterilización del medio y la operación.

En 1996, Montoya y Sierra reportaron el hallazgo de cepas nativas de *Clostridium acetobutylicum* resistentes al butanol, avance promisorio en la labor de menguar los obstáculos en la obtención de solventes para concentraciones significativas.

Por su parte, Montoya *et al.* (citados por Vargas 2003) aislaron y seleccionaron 13 cepas nativas colombianas de *Clostridium spp* productoras de solventes, investigaron su potencial de fermentación empleando como sustratos residuos celulósicos de diferente índole, probaron su actividad hidrolítica frente a un amplio rango de polisacáridos y obtuvieron resultados prometedores. Así mismo, los resultados

de López (2003) demostraron que la clonación de genes en *Clostridium spp* productoras de ABE puede dar lugar a la creación de especies con mayor capacidad de degradación de polisacáridos.

Recientemente, Montoya (2003) descubrió varias cepas de *Clostridium spp* que no son tóxicas ni patogénicas, degradan residuos agrícolas con alto rendimiento⁵ y están presentes en los suelos agrícolas de Colombia.⁶ Esto supera una de las dificultades más complejas de manejar en la FABE: el carácter tóxico y patogénico del microorganismo, por lo que se puede considerar una bacteria segura en el uso industrial. Igualmente, en ese uso, su condición nativa le procuraría autosostenibilidad al proceso.

"La combinación de los resultados de los numerosos estudios realizados durante las últimas décadas sobre la fisiología de la [FABE] y las mejoras en ingeniería del proceso, y el incremento en el conocimiento de la genética de las especies, representan importantes avances hacia un proceso económicamente viable, [perfilándola como un proceso industrial en el futuro cercano]" (López, 2003, p. 137).

6. SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN DEL BIOETANOL

Los motores que operan exclusivamente con etanol combustible pueden ser más eficientes que los de gasolina modificados para aceptar mezclas gasolina-alcohol (gasohol). Los primeros pueden trabajar con etanol entre 80°GL y 95°GL, aspecto que implica la eliminación de los sistemas de deshidratación y la simplificación de la destilación, suscitando una disminución ostensible de los costos operativos de la producción de alcohol anhidro (Bradley y Runnion 1984). El uso de dichos motores tomará su tiempo en Colombia, la Ley 693 de 2001 es un primer paso; y en ese lapso, se debe optar por producir gasohol. En estas circunstancias, el alcohol debe alcanzar su grado

⁵ Una de ellas alcanzó a producir etanol al 19.1 % p/v

⁶ Uno de los sitios utilizados para la toma de muestras fueron las plantaciones de banano.

absoluto (99,5°GL) para que sea miscible con la gasolina, de lo contrario se formaría una mezcla heterogénea con dos fases: gasolina y mezcla agua-alcohol, perjudicial para la combustión del motor.

Existen diversas alternativas para la separación y purificación del etanol, pero convencionalmente el camino elegido para producir alcohol puro ha consistido en dos etapas consecutivas, la destilación convencional y la azeotrópica. En la primera, el etanol alcanza una concentración máxima de 95,57°GL, punto en el que se forma el azeótropo alcohol-agua; y en la segunda éste se rompe para separar los dos componentes y así obtener el etanol deshidratado (Ramil y Valverde 2002). Dado que la mayoría de los agentes utilizados en este proceso son contaminantes nocivos, en ocasiones cancerígenos (v.g. el benceno, el éter o la gasolina), y que los costos de las destilación convencional oscilan entre el 50% y el 80% del total de producción de alcohol anhidro (Ladisch *et al.* 1982), los esfuerzos de múltiples investigadores se han concentrado en desarrollar tecnologías limpias y más eficientes, como la destilación extractiva y en membranas, la extracción supercrítica, la adsorción y la pervaporación.

6.1 Destilación extractiva

Ésta es la más parecida a la destilación convencional, difiere de ella en que los solventes utilizados no son peligrosos (v.g. glicerina, etilenglicol y propilenglicol) y evitan que el producto final se contamine. El propilenglicol ha sido un agente ideal, ya que en cualquier concentración es miscible en agua, su punto de ebullición es superior al de ésta y no forma azeótropo con ella (Schlowsky y Loftuskoch citados por Ramil y Valverde, 2002).

En 1985, Tedder desarrolló un proceso de producción de alcohol anhidro que incluía la extracción del etanol del medio fermentativo y la separación de la mezcla agua-etanol, mediante solventes orgánicos tales como trineopentilfosfato, tetra-n-butilamonio-2, 6-di-t-butylbenzoato, entre otros. Más adelante Berg y Yeh (1987) descubrieron que algu-

nos derivados del anhidro ftálico cumplían efectivamente la deshidratación del etanol mediante destilación extractiva.

Por su parte, Ramil y Valverde (2002) simulon el proceso de destilación extractiva partiendo de datos reales y demostraron que el propilenglicol provoca que la volatilidad relativa del etanol supere a la del agua, logrando así su efectiva separación y un alcohol de alta pureza miscible con la gasolina.

La destilación extractiva implica gastos energéticos adicionales y platos más grandes en la columna de destilación, no obstante, usualmente estos costos son menores que los originados por el uso de agentes adicionales en la destilación azeotrópica, lo cual posiciona la tecnología como una opción atractiva para la deshidratación del alcohol (Berg y Yeh 1987).

6.2 Destilación en membranas

Es un proceso de transporte que permite el tratamiento de soluciones acuosas de determinadas sustancias, de modo que se separe el agua del resto de la solución de partida, que finalmente queda más concentrada (Mengual *et al.* 1998).

En 1997 Marker patentó un sistema de destilación con membranas, como una alternativa a la destilación azeotrópica, el cual consiste en un conjunto de membranas adherido a una torre de destilación, que efectúan la separación de manera continua a medida que se ejecuta la destilación. Este sistema resultó ser efectivo para la obtención de etanol de alto grado de pureza con bajos costos de capital, aunque su concentración no alcanzó el grado absoluto.

6.3 Extracción supercrítica

Es una operación unitaria que aprovecha la capacidad de solubilización de un fluido, a temperatura y presión superiores a las dadas en el punto crítico, para extraer uno de los componentes de la mezcla agua-etanol. El CO₂ es utilizado usualmente como



fluido supercrítico, ya que no es tóxico, explosivo ni corrosivo; es químicamente inerte, económico, fácilmente reciclable y está disponible expeditamente con alta pureza. Dado que su temperatura crítica es 31,1 °C, el proceso se efectúa a temperaturas moderadas, aspecto que contribuye a la disminución de los costos operativos; y su presión crítica (7,38 MPa) es relativamente fácil de obtener en operaciones industriales. Su principal desventaja es el alto costo de inversión en equipos, sin embargo, se ve compensada con la efectividad del proceso y la facilidad de extracción de sustancias de alto valor agregado y pureza (Gallego y Cardona 2004).

No obstante las ventajas del proceso en general, en algunos casos el rompimiento del azeótropo etanol-agua no ha sido efectivo. Aunque el CO₂ supercrítico tiene capacidades ilimitadas para disolver etanol con alto grado de pureza, el agua también se disuelve en cantidades significativas, de tal forma que su solubilidad en el dióxido de carbono no hace posible su separación (Seader y Henley 1998). Pero si se parte de un caldo alcohólico al 10% p/p etanol, el CO₂ supercrítico es capaz de extraer el alcohol de la mezcla, dado que a esta concentración no ocurre disolución completa (Inomata *et al.* citados por Seader y Henley 1998). Un ejemplo de ello fue publicado por Guvenc *et al.* en 1999; una solución al 15% v/v de etanol se sometió a un sistema de extracción por lotes; las mejores condiciones de operación, dentro del rango de trabajo (313 K-333 K; 8,11 MPa-16,21 MPa) fueron 313 K y 13,48 MPa en 30 minutos. Observaron que al incrementar la concentración inicial de etanol y la presión y reducir la temperatura de extracción, el rendimiento del proceso tendía al crecimiento. Así mismo, que la alimentación consecutiva del sistema afectaba el rendimiento positivamente. Los rendimientos obtenidos fueron de 5,8% en el primer paso y 19,2% en el tercer paso. Considerando que en las fermentaciones se obtiene generalmente etanol entre el 5% y el 15% v/v, la extracción supercrítica

con CO₂ es otra opción atractiva desde el punto de vista técnico y ambiental.

6.4 Adsorción

Es un proceso que utiliza sustratos sólidos porosos (adsorbente) para remover sustancias (adsorbato) presentes en soluciones acuosas o gaseosas. En el caso del rompimiento del azeótropo etanol-agua, ha demostrado ser una tecnología eficiente utilizando adsorbentes diversos, *v.g.* alúmina, silicagel, tamices moleculares (zeolitas y carbón) y polímeros (Seader y Henley 1998). No obstante, los más promisorios y de alto interés científico son los bioadsorbentes y los tamices moleculares (zeolita 3Å).

La combinación de destilación y adsorción en un solo sistema tiene potencial de aplicación. La destilación requiere incrementos excesivos de energía cuando la solución supera el 92% p/p de etanol; por lo tanto, si se detiene la destilación en este punto o antes de llegar a él, para articular un sistema de adsorción los requisitos energéticos se reducirían considerablemente con respecto a la destilación convencional (Ladisich *et al.* 1984). Este sistema en continuo fue patentado por Sircar en 1991 y demostró ser eficiente en términos energéticos, con consumos de 3,066 MJ/m³ de alcohol anhidro, en contraste con algunos reportados previamente de 3,902 MJ/m³.

6.4.1 Zeolita 3Å

La zeolita de potasio es un adsorbente idóneo para obtener alcohol anhidro, ya que posee características ventajosas como su alta selectividad para adsorber agua⁷ y su fácil producción y regeneración (Teo y Ruthven 1986). Además, puede tolerar fluctuaciones en los indicadores de operación (tasa de flujo, temperatura, presión), contrario a la destilación; no se afecta por la presencia de metanol, es fácil de operar a un costo sustancialmente bajo y no usa compuestos tóxicos (Panwar 2004).

⁷ Su tamaño de poro (3 Å) es mayor que el tamaño de molécula del agua (2.89 Å) y menor que el del etanol (4.06 Å)

6.4.2 Bioadsorción

Los polisacáridos tienen gran potencial como adsorbentes de bajo costo para la remoción de agua de un caldo alcohólico en forma eficiente. En 1982 Ladisch y Tsao patentaron un sistema de deshidratación de soluciones alcohólicas que se valía de bioadsorbentes de celulosa, carboximetilcelulosa, tucas de maíz, harina de maíz, trigo, bagazo, almidón, hemicelulosa, virutas de madera, residuos agrícolas o la mezcla de lo anterior. En 1984, Ladisch *et al.* publicaron resultados de ensayos piloto usando maíz como adsorbente, en ellos obtuvieron etanol al 99,6% p/p partiendo de soluciones alcohólicas en fase vapor y previamente destiladas al 1,6% y 50,9% agua. Cuando la concentración inicial del flujo fue de 92% p/p etanol, el gasto energético fue de 418,12 MJ/m³ de alcohol anhidro, valor que puede ser menor si se recupera la energía emitida por el gas de regeneración del adsorbente. Los autores aseguran que una vez el maíz pierde su capacidad de adsorción, aún puede utilizarse como materia prima para producir alcohol.

La remoción de agua de caldos etanólicos, mediante adsorción en fase vapor, implica un gasto energético adicional en la medida en que este caldo deba cambiar de estado. En la búsqueda constante de reducir los costos operativos, Beery y Ladisch (2001) investigaron el proceso de adsorción con materiales amiláceos, partiendo de alcohol en fase líquida. Encontraron que estos bioadsorbentes adsorben selectivamente el agua presente en soluciones alcohólicas en condiciones cinéticas controladas. En operación, estos adsorbentes son tan efectivos (capacidad de adsorción/gramo de adsorbente) como los disponibles comercialmente en la actualidad (sílica gel, tamices moleculares). Además, tienen la ventaja de que su regeneración se realiza a 80 °C o menos, mientras que los comerciales requieren temperaturas más elevadas, como mínimo 175 °C. Sin embargo, si el sistema de bioadsorción se opera en continuo, la efectividad del adsorbente se deteriora cuando la entrada de flujo supera concentraciones

mayores al 10% v/v de agua, dado que en esas circunstancias empieza a desagregarse. Si el tiempo de contacto entre el adsorbente y el adsorbato no es continuo, entonces la concentración de agua puede ser mayor. El límite del 10% v/v de agua, no obstante, en términos prácticos no tiene reparos, puesto que generalmente la destilación produce etanol a concentraciones iguales o mayores que 90%.

6.5 Pervaporación

Consiste en la transferencia de materia desde una fase líquida a otra de vapor, a través de una membrana polimérica hidrofóbica o hidrofílica (Moli *et al.* 1997). Un lado de la membrana es expuesto al efluente líquido; por el otro, un gas aspirador genera reducción parcial de la presión de los componentes en el permeado, los componente afines a la membrana permean y se evaporan en ella (Vane *et al.* 2004).

Los primeros intentos para separar etanol-agua mediante pervaporación datan de 1961 (Binning-US Patent 2,981,680; citado por Kaschemekat *et al.* 1990); desde aquella época se han conseguido vastos avances en el proceso. En 1990 Kaschemekat *et al.* desarrollaron un proceso en el que el etanol puede producirse en condiciones económicamente favorables, a partir de mezclas con bajo porcentaje de alcohol, del orden que se obtiene luego de una fermentación alcohólica. Su invención consiste en tres etapas consecutivas: a) separación del etanol del fermento mediante una pervaporación inicial, usando una membrana hidrofóbica para formar un vapor permeado rico en alcohol; b) condensación del permeado anterior en dos fracciones, una de baja concentración y otra de alta concentración; c) pervaporación de la fracción de alta concentración en una membrana hidrofílica para generar alcohol absoluto, y recirculación de la fracción de baja concentración al primer pervaporador.

En una pervaporación convencional, el vapor permeado por lo general se condensa en su totalidad (excepto los gases inertes que puedan estar



presentes), de manera que la pureza del etanol depende enteramente de la eficacia del proceso de separación (Vane *et al.* US Patent 2004). En estos casos el condensado resultante requiere etapas de separación adicionales para obtener etanol anhidro, que incluyen destilación y deshidratación con mallas moleculares. El sistema de pervaporación ideal sería aquel que no requiriera etapas adicionales de purificación.

En contraste, Vane *et al.* (US Patent 2004) propusieron el uso de un desflemador, en el cual ambas fases (líquido, vapor) viajan en contracorriente a diferentes temperaturas: el condensado sale por la parte inferior, y los vapores no condensados salen por la superior. Este sistema proporciona una purificación equivalente a múltiples etapas de separación, cuatro a seis veces mayor que una condensación simple. Al incorporar este sistema al tren de producción para proveer remoción continua de etanol, el tamaño del fermentador se puede reducir y la destilación aminorarse sustancialmente o eliminarse.

La competitividad del proceso de fermentación, en razón de costos, depende de la eficiencia con la que los productos de fermentación son removidos del medio. La concentración del etanol después de fermentación oscila generalmente entre 10 kg/m^3 - 100 kg/m^3 (1-10% p/p); estas concentraciones tan pequeñas reducen ostensiblemente la relación costo-efectividad de los procesos de separación convencionales, como la destilación. El proceso sugerido por Vane *et al.* (US Patent 2004) opera con concentraciones diversas de etanol y agua, lo que lo hace atractivo económicamente. Sus experimentos a escala piloto probaron que una solución alcohólica al 1% p/p de etanol se deshidrataba alcanzando 93% p/p de etanol y 95% p/p en dos sistemas de diferente altura; cuando la concentración del agua era baja, el alcohol resultante alcanzaba concentraciones cercanas al 100%.

7. IMPACTOS AMBIENTALES EN LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

En la actualidad no se conocen estudios de impacto ambiental de la producción de alcohol anhidro a base de banano verde, aspecto sustancial a la hora de decidir sobre la instalación de una planta industrial. En este sentido, es preciso adelantar estudios de evaluación de impactos ambientales paralelamente a los estudios técnicos, de tal manera que en el proceso se generen opciones holísticas y viables de producción, de las cuales se elegiría la más conveniente en términos técnicos, económicos y ambientales.

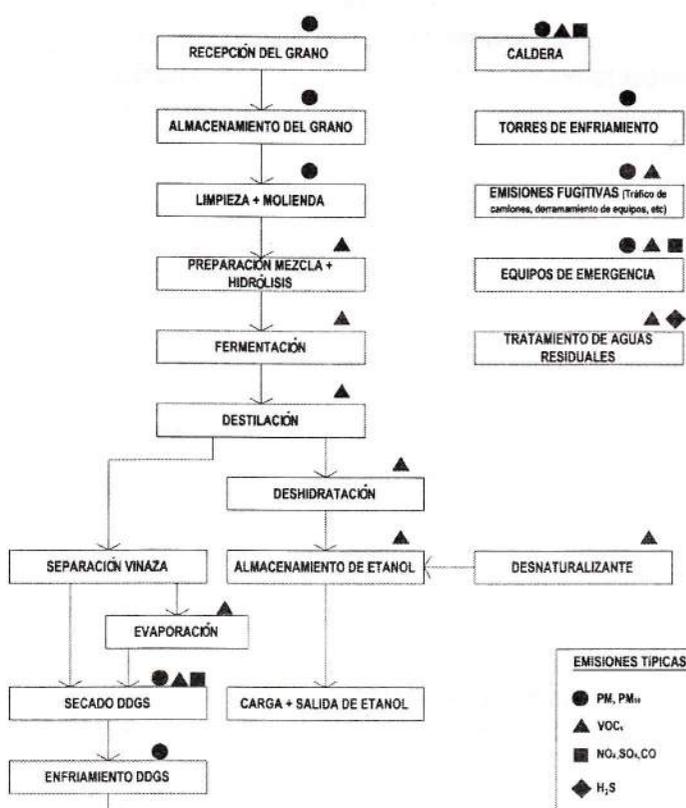
Para tener una idea general sobre los aspectos ambientales que involucra la producción de alcohol anhidro, es acertado repasar los reportes ambientales de las industrias que utilizan como materia prima el maíz, la caña o la melaza, ampliamente reconocidas por su experiencia en el sector de los biocombustibles. En general, estas plantas generan impactos sobre el aire y el agua, que varían en composición fisicoquímica de acuerdo con las materias primas y tecnologías empleadas en los procesos. Las emisiones atmosféricas típicas se componen de material particulado (PM_{10}), compuestos orgánicos volátiles (VOC), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H_2S), acetaldehídos y formaldehídos, estos dos últimos cancerígenos (Woolf 2004). Los residuos líquidos o vinazas corresponden a los desechos de las columnas de destilación, poseen alto contenido de agua, sustancias orgánicas, sales orgánicas, polímeros coloreados, proteínas y aminoácidos, así como una masa de células en suspensión. La gráfica 1 presenta un diagrama de bloques de un proceso convencional de conversión de almidón de grano en etanol anhidro con sus respectivos puntos de emisión señalados.

El manejo ambiental de las emisiones atmosféricas se realiza con el principio de mitigación, en el que, mediante la instalación de equipos de limpieza u otro tipo, la concentración de los contaminantes se reduce a niveles permisibles por la norma. Entre tanto, las vinazas, por su alto contenido proteico y orgánico, se consideran un subproducto con valor agregado; sin embargo, la valorización depende de su composición química y ésta, a su vez, varía de acuerdo con la materia prima empleada en el proceso, como se observa en la tabla 3. Kadioglu y Algur (citados por Bravo y Giraldo 1996) reportan que en promedio las vinazas contienen 8,43% de materia seca, 3,3% de cenizas, 0,64% de nitrógeno total, 4% de proteína cruda, 0,95% de carbohidratos totales, 0,75% de azúcares reductores, 0,29% de sodio, 0,94% de potasio, 0,30% de calcio y 0,7% de magnesio. Estos residuos también poseen varios compuestos fenólicos tales como el ácido gálico, ácido p-coumárico y ácido gentísico que contribuyen a su alta carga contaminante e inhiben el desarrollo de las bacterias anaerobias en el proceso de fermentación; otros componentes de las vinazas son los taninos y sulfatos.

Las vinazas "... han sido usadas aplicándolas diluidas sobre los suelos [como fertilizante], en biodigestores, concentradas por evaporación para producir biomasa [y proteína celular], utilizadas como suplemento alimenticio para animales y también como fuente de energía" (Bravo y Giraldo 1996; p. 57). Cuando se mezclan con suelo y estiércol, pueden ser degradadas por la lombriz roja californiana para obtener bioabono con contenidos equilibrados de NPK, y características organolépticas propias de un lombricompost (Bravo et al. 1996). Asimismo, se le confiere potencialidad como agente plastificante para concretos reforzados, dadas sus características adhesivas, y en la industria química para la obtención de sulfato, cloruro de potasio, potasa y carbo-

nato de sodio. Con respecto a la ecoeficiencia de la producción de alcohol, Bravo y Giraldo (1996) plantean la posibilidad de reciclar las vinazas en la etapa de fermentación, una vez los sólidos sean removidos. En general, las alternativas de valorización no son muy atractivas, porque el acondicionamiento de las vinazas, previo a su uso, implica altos costos; para la producción de biogás, los taninos inhiben la fermentación anaerobia en la fase metanogénica, limitando su uso a bajas concentraciones; y para la alimentación animal el potasio causa trastornos digestivos por toxicidad. Los autores recomiendan realizar estudios de viabilidad económica y ambiental sobre la utilización y valorización de los grandes volúmenes de vinazas emitidas por las industrias alcohólicas.

Gráfica 1.



Fuente: Woolf 2004 (Adaptación efectuada por autora)
 DDGS (distillers dried grains with solubles): es el producto remanente (vinaza) después de separar el etanol del producto de la destilación, que se condensa y seca para comercializarlo como alimento animal.



Tabla 3. Caracterización de vinazas según la materia prima.

Aspecto	Melaza de caña	Jugo de caña	Melaza de remolacha	Residuos de papa	Residuos de maíz
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,8-5,2	4,7-5,3	4,7-5,3
Temperatura °C	80-100	80-100	No disponible	No disponible	No disponible
DQO kg/m ³	65	15-33	45-50	57,3	102
Sólidos totales mg/l	81.500	23.700	48.000-63.000	50.000	63.500
Sólidos volátiles mg/l	60.000	20.000	40.000-49.000	41.000	60.000
Sólidos fijos mg/l	21.500	3.700	8.000-14.000	9.000	3.500
Nitrógeno mg/l	450-1.610	150-700	790-940	830	1.000
Fósforo mg/l de P ₂ O ₅	100-290	10-210	275	1.145	1.374
Sulfato mg/l de SO ₄ ²⁻	6.400	600-760	No disponible	No disponible	No disponible
Relación C/N	16-16,3	19,7-21,1	6,0	6,1	9,1

Fuente: Bravo, I. y Giraldo, E. 1996

8. CONCLUSIONES

Existe un volumen apreciable de banano de rechazo en el Urabá antioqueño que se utiliza para producir bioabonos y alimentar animales; si bien estos usos son de exiguo valor agregado, corresponden a programas establecidos con propósitos sociales, económicos y ambientales, que no deberían entorpecerse, pues su rompimiento suscitaría desinterés y desconfianza en la población de la región con respecto a los nuevos proyectos que pudieran adelantarse. No obstante, si se considera estudiar la viabilidad de instalar una planta de alcohol carburante de banano de rechazo, será imperativo realizar un estudio de materia prima que contemple indicadores y perspectivas de la disponibilidad real de esta fruta, dado que al presente prevalece la incertidumbre sobre sus verdaderos volúmenes disponibles para tales propósitos.

La hidrólisis ácida de banano verde seguida de la fermentación alcohólica ha sido por excelencia el proceso tradicional evaluado a escala de laboratorio y piloto en el ámbito local. Aunque esta hidrólisis todavía es susceptible de mejoras, se aproxima a su completo desarrollo con muy poco espacio para la optimización económica, por lo cual los científicos han optado

por incursionar en estudios de hidrólisis enzimática. Sus resultados aún muestran eficiencias muy bajas, empero susceptibles de optimizar, lo que motiva a los científicos a hacer de ésta una línea pertinente de investigación con el ánimo de hacer el proceso viable técnica y económicamente. En este sentido el trabajo de Iisuka *et al.* (1985) se podría retomar para verificar el efecto de las enzimas pectinolíticas sobre la sacarificación y las eficiencias del proceso, ya que obtuvo eficiencias superiores al 90% mediante SSF vía enzimática. Paralelamente, es preciso realizar pruebas de fermentación en sólido del vástago de banano para la producción de α -amilasa, pues si ésta es efectiva, le daría autosostenibilidad al proceso ya que se prescindiría de la importación de esta enzima.

En cuanto a los estudios reportados sobre fermentación alcohólica en continuo de jarabe de banano verde, se prevén mejoras cuando al biorreactor se le acople un sistema de recirculación para que la glucosa que no alcance a convertirse en el tiempo de retención estipulado ingrese de nuevo al reactor. Además, en el caso de emplear sistemas de levadura inmovilizada, es importante ahondar en la búsqueda de tecnologías que aumenten su ciclo de vida para que la fermentación mejore su eficiencia técnica y económica.

No obstante los avances y posibilidades de perfeccionar el proceso tradicional de producción de alcohol, la fermentación ABE (FABE) es un proceso alternativo cuya ventaja radica en que el *Clostridium spp.* transforma polisacáridos en solventes de alto valor agregado, acetona, butanol y etanol, sin previa hidrólisis del sustrato. Durante mucho tiempo este proceso fue relegado por el carácter tóxico y patógeno del *Clostridium spp.*, que dificulta su manipulación; por la poca resistencia de la bacteria al butanol, condicionando el proceso a productos finales de baja concentración; y por sus altos costos. Sin embargo, a la fecha se conocen resultados de estudios concentrados en superar tales dificultades como los descubrimientos de cepas nativas colombianas resistentes al butanol, no tóxicas ni patógenas y con gran potencial de fermentación de polisacáridos. Es preciso enfatizar que la condición nativa de estas cepas le imprime autosostenibilidad a la FABE, característica valiosa en la toma de decisiones sobre la resolución de iniciar cualquier industria. Todos estos aspectos perfilan la FABE como un proceso industrial en el futuro cercano; sin embargo, se sabe que no ha sido ensayada en banano verde, luego es conveniente efectuar experimentos encaminados a formar una línea de investigación alternativa a las convencionales sobre producción de etanol a partir de este polisacárido.

Amplios avances tecnológicos se han efectuado sobre la deshidratación del etanol, mediante el desarrollo de tecnologías limpias y más eficientes que las convencionales; no obstante que cada una tiene sus bondades, es preciso efectuar una evaluación técnica, económica y ambiental para seleccionar aquella que más se ajuste a la producción de alcohol anhidro partiendo de banano verde. La adsorción y la pervaporación son las tecnologías que han demostrado mejores resultados en cuanto a eficiencia técnica. En el medio, una de las que merece un campo amplio de investigación es la bioadsorción, puesto que el insumo principal para fabricar bioadsorbentes está disponible cuando se tienen residuos agrícolas de diversa índole.

No obstante el conocimiento general sobre las emisiones atmosféricas y producción de vinazas en la industria de alcohol carburante, es indispensable tener una visión rigurosa de sus características cuando se trate de usar banano verde en la producción de etanol anhidro. Las tecnologías usadas en el proceso, las vías de transformación (química, biológica, FABE) y los insumos empleados son determinantes al momento de caracterizar los contaminantes y evaluar su posibilidad de darle un uso alternativo.

BIBLIOGRAFÍA

- AGROCADENAS. Banano: estadísticas de la cadena. [on line] http://www.agrocadenas.gov.co/banano/banano_reportes.htm Consultado en mayo 27 de 2004.
- AUSTIN, G. T. Shreve's Chemical Process Industries: Chapter 31. Fermentation industries. 5th edition. McGraw-Hill, 1984. p. 581-591.
- BANATURA. Programa de gestión social y ambiental del sector bananero colombiano. Medellín: Augura y Sena, 2003. 66 p.
- BEERY, K. E. y LADISCH, M. R. Adsorption of water from liquid-phase ethanol-water mixtures at room temperature using starch-based adsorbents. *En: Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 40 (2001); p. 2112-2115.
- BERG, L. y YEH, A. I. Dehydration of ethanol by extractive distillation. US Patent 4,654,123. Marzo 31, 1987.
- BOTERO, A. y PÉREZ, P. Producción de glucosa a partir de la hidrólisis enzimática de almidón de banano verde. Medellín, 1993, 105p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- BRADLEY, C. y RUNNION, K. Understanding ethanol fuel production and use. Editorial Volunteers in Technical Assistance, 1984. 18p.
- BRAVO, I. *et al.* Efectos de las vinazas sobre el contenido de NPK en bioabonos. *En: Unicauca Ciencia*. Vol. 1 (mar. 1996); p. 66-74.
- BRAVO, I. y GIRALDO, E. Vinazas: transformación de un residuo contaminante en un recurso útil. *En: Unicauca Ciencia*. Vol. 1 (mar. 1996); p. 55-65.
- BRITO, L. M. y GRANDA, J. G. Hidrólisis ácida de banano verde. Medellín, 2004, 54p. Trabajo de grado (Ingeniero



- Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- CANO, J. F. y NARANJO, C. A. Obtención de etanol a partir de banano de rechazo por acción de *Zymomonas mobilis*. Medellín, 2002, 89 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- CESET. Informe de resultados: Asesoría a la planta de alcoholes de Urabá en la etapa de investigación. Universidad de Antioquia, Medellín, mayo de 1989. 23p.
- FUENTES, A. M. y BAYONA, R. Transformación del desecho vegetal del cultivo del banano en abono natural a través de la lombriz roja californiana en Urabá. S. I., Augura, 1994. 17 p.
- GALLEGO, L. C. y CARDONA, C. A. Aplicaciones industriales de fluidos supercríticos (I): generalidades y procesos de extracción. En: Ingeniería Química. Vol. 36, No 411 (mar. 2004); p. 144,146,148,150 y 152.
- GUVENÇ, A. *et al.* Supercritical CO₂ extraction of ethanol. En: Turkish Journal of Chemistry. Vol. 23, No. 3 (1999); p. 285-291.
- HINCAPIÉ, A. F. Uso del banano verde de rechazo y úrea en el engorde de novillos cebú en un sistema intensivo de estabulación en la zona de Urabá. En: Boletín Técnico Cenibanano. No. 5 (abr. 2004); p. 4-8.
- IIT-Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Estudio exploratorio sobre obtención de almidón a partir del banano de rechazo. 1980. 20 p.
- IIZUKA, M. *et al.* Alcohol fermentation of green banana. En: Journal of fermentation technology. Vol. 63, No. 5 (1985); p. 475-477.
- JOSHI, S. S. *et al.* Continuous ethanol production by fermentation of waste banana peels using flocculating yeast. En: Indian Journal of Chemical Technology. Vol. 8 (may. 2001); p 153-156.
- KASCHEMEKAT, J. *et al.* Pervaporation process of separating a liquid mixture. US Patent 4,900,402. Febrero 13 de 1990.
- KEIM, Carroll. Technology and economics of fermentation alcohol. An update. En: Enzyme microbiology technology. Vol. 5, No. 2 (mar. 1983); p. 103-114.
- KRISHNA, C. y CHANDRASEKARAN, M. Banana waste as substrate for α -amylase production by *Bacillus subtilis* (CBTK 106) under solid-state fermentation. En: Applied Microbiology and Biotechnology. Vol. 46, No. 2 (sep. 1996); p. 106-111.
- LA EMPRESA Banacol usa el banano de rechazo en la ganadería. En: Agricultura de las Américas. No. 190 (1989), p. 8-9.
- LADISCH, M. R. and TSAO, G. T. Vapor phase dehydration of aqueous alcohol mixtures. US Patent 4,345,973. Agosto 24, 1982.
- LADISCH, M. R. *et al.* Commeal adsorber for dehydrating ethanol vapors. En: Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. Vol. 23, No. 3 (jul. 1984); p. 437-443.
- LONDOÑO, M. *et al.* Banatura: Programa de Gestión Social y Ambiental del Sector Bananero Colombiano. En: Reunión Internacional ACORBAT (15:2002:Cartagena). p. 343-348.
- LÓPEZ, A. M. Utilization of lignocellulosic substrates by solvent-producing clostridia. PhD thesis. Wageningen University, Wageningen, Países Bajos, 2003. 156 p.
- MARKER, T. L. Distillation with membrane apparatus. US Patent 5,614,065. Marzo 25 de 1997.
- MARTÍNEZ, A. A. y LOPERA, L. Evaluación del rendimiento de etanol en una fermentación continua con *Zymomonas mobilis*. Medellín, 2003, 114 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- MENGUAL, J. I. *et al.* Posibilidades industriales de la destilación en membranas. En: Ingeniería Química. Vol. 30, No 349 (sep. 1998); p. 205-209.
- MOLI, M. *et al.* La pervaporación: una técnica eficaz para la destrucción de azeótropos. En: Ingeniería Química. Vol. 29, No 332 (feb. 1997); p.175-180.
- MONTES, N. y TORRES, L. Hidrólisis enzimática de banano verde de rechazo. Medellín, 2004, 101p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- MONTOYA, D. Anaerobic, solvent-producing bacteria: Molecular characterisation, polysaccharolytic activity and agroindustrial waste degradation. Munich, 2003, 151 p. (PhD thesis). Technical University of Munich, Department of Microbiology.
- MONTOYA, D. y SIERRA, J. Obtención de mutantes espontáneas de *Clostridium acetobutylicum* resistentes al butanol. En: Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas. No. 25 (dic. 1996); p.26-35.
- MORALES, J. R. y URIBE J. D. Utilización del banano de rechazo en la alimentación porcina. Medellín, 1985. 74p.

- OLARTE, Y. y MELIDA, E. Comercialización interna del banano de rechazo de Urabá. Medellín: Fundaunibán, 1991. 200 p.
- PANWAR, M. Motor fuel grade ethanol production: technology perspective. Membrane Engineering (P) Ltd. En: All India Distiller's Association Website. [on line] : <http://www.aidaindia.org/aida/Price2.htm>. Consultado en 2004-08-3.
- PASBERG-GAUHL, C. ¿How can we reduce losses of banana bunches due to 'fruit speckling' in comercial banana plantations? En: Memorias XV Reunión Internacional Acobat 2002. Augura, Medellín, octubre de 2002. p. 477-480.
- RAMIL, M. y VALVERDE, J. L. Destilación extractiva para obtener etanol anhidro. En: Ingeniería Química. Vol. 34, No 395 (nov. 2002); p. 132-134.
- ROLDÁN, D. et al. La cadena de banano en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas Colombia. Bogotá, 2004. 19 p.
- SALDARRIAGA, L. C. Estudio de materia prima y proyecto de planta piloto de alcohol de banano en Urabá. Medellín: Gobernación de Antioquia, 1982. 149 p.
- SCHLUBACH, C. Report about the visit to the ethanol pilot plant at Currulao, 23 de junio de 1987.
- SEADER, J. D. y HENLEY, E. J. Separation process principles. Nueva York: John Wiley, 1998. 886 p.
- SENA. Caracterización subsector bananero en Colombia. Bogotá: Nuevas Ediciones, 2003. 149 p.
- SHARROCK, S. y LUSTY, C. Nutritive value of banana. En: Inibap annual report 1999. Montpellier, Francia: INIBAP, 2000; p. 28-31.
- SIRCAR, S. Process for preparing motor fuel grade alcohol. US Patent 5,030,775. Julio 9, 1991.
- TEDDER, D. W. Process for producing fuel grade ethanol by continuous fermentation, solvent extraction and alcohol separation. US Patent 4,517,298. Mayo 14, 1985.
- TEO, W. K. y RUTHVEN, D. M. Adsorption of water from aqueous ethanol using 3-Å molecular sieves. En: Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. Vol. 25, No. 1 (ene. 1986); p. 17-21.
- US DOE (Department of Energy). Energy Efficiency and Renewable Energy. Biomass Program: conversion technologies: sugar platform: other hydrolysis technologies. [on line] <http://www.eere.energy.gov/biomass/> consultado en 2004-07-30.
- VALENCIA, M. et al. Hidrólisis ácida de banano verde en un reactor discontinuo. Medellín, 1987. p. 33. Trabajo de grado (Ingeniero Químico) Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- VANE, L. M. et al. Separation of vapor-phase alcohol/water mixtures via fractional condensation using a pilot-scale dephlegmator: enhancement of the pervaporation process separation factor. En: Industrial and Engineering Chemistry Research. Vol. 43 (2004); p. 173-183.
- VANE, L. M. et al. Separation process using pervaporation and dephlegmation. US Patent 6,755,975. Junio 29, 2004.
- VARGAS, L. C. Celulasas: celulasas clostridiales, estado actual e importancia biotecnológica. En: Clon. No.1 (2003); p. 39-50.
- WOOLF, M. Air Quality and Ethanol Production. 2004 Spring Roundtable April 5-7, University of Nebraska at Kearney. Pollution Prevention Regional Information Center (P2RIC). [on line] : <http://www.p2ric.org>. Consultado en 2004-09-20.