

**Diseño y elaboración de un destilador automatizado para la producción de alcohol etílico a partir de excedentes de banano en Urabá****Design and development of an automated distiller for production of ethyl alcohol from banana surplus in Urabá**

Carlos Emilio Restrepo Vélez. *Apoyo a investigación Sennova. Complejo Tecnológico Agroindustrial Pecuario y Turístico-SENA. E-mail: Perse55@hotmail.com*

Kelly Jhojana Arteaga Mézquida. *Tecnóloga en Agrobiotecnología. E-mail: Jhojaarteaga01@hotmail.com*

Hernán de Jesús Pulgarín Arcila. *Instructor Red electrónica. Complejo Tecnológico Agroindustrial Pecuario y Turístico-SENA. E-mail: hpulgarin@sena.edu.co*

Slim Camilo Álvarez Alarcón. *Instructor Red Biotecnología. Complejo Tecnológico Agroindustrial Pecuario y Turístico-SENA. E-mail: alvaslim@hotmail.com*

Recibido: marzo 14 de 2017. Aceptado: octubre 12 de 2017

Resumen

En Urabá desde la década de los ochenta hasta la actualidad se han realizado análisis comparativos de los estudios sobre el aprovechamiento de los excedentes de la producción de banano que contemplan la producción de alcohol etílico. El banano verde tiene alto contenido de almidón y celulosa se considera como una materia potencial para la industria de bioetanol. El proceso de exportación de banano desde la subregión de Urabá, Antioquia – Colombia, hacia mercados internacionales ha generado grandes volúmenes de fruta rechazada por incumplimiento de estándares de calidad también llamados “excedentes de exportación”, haciéndose evidente la problemática en el manejo de los residuos de la industria bananera. En esta investigación se planteó diseñar y construir un destilador automatizado para la obtención de alcohol etílico a partir de banano de rechazo. La metodología planteada consistió en inducir hidrólisis endógena en la fruta, posteriormente se realizó la extracción y fermentación del jugo clarificado en condición anaerobia adicionando *Saccharomyces cerevisiae* 1.0×10^9 células/ml por un periodo de 48 horas. El rendimiento del jugo clarificado fue de 500ml/kg de banano y 0.065 litros de etanol por cada litro de jugo clarificado. La mayor concentración del alcohol obtenido fue de 64.4%. En el presente estudio se trabajó bajo un diseño experimental de tipo factorial (3x2), donde se analizaron 27 tratamientos relacionadas con la temperatura para la destilación (65°C, 70°C y 75°C) y el tiempo empleado en el proceso de destilación en el prototipo funcional del destilador automatizado (1.5h, 2h y 3h), estas combinaciones fueron analizadas con alcohómetros de precisión con termómetro para la determinación de la concentración de alcohol (%). Se realizó un ANOVA para determinar el efecto de la temperatura y tiempo, de igual manera la interacción entre estas dos. El mejor tiempo de destilación corresponde al proceso sometido a 3 horas continuas con temperatura de 75°C, el cual corresponde al ensayo 27. En el desarrollo de este proyecto se logró la estandarización del proceso de destilación de alcohol a base de banano con concentración alcohólica de 64.4% bajo las condiciones evaluadas.

Palabras clave: Fermentación alcohólica, bioetanol, *Musa spp.*, banano de rechazo, Urabá

Abstract

Many comparative studies have been carried out in Urabá about the use of surplus banana production since the 80s to the present including the production of ethyl alcohol. Green bananas have high contents of starch and cellulose therefore they are considered a potential material for the bioethanol industry. The process of exporting bananas from the subregion of Urabá, Antioquia - Colombia, to international markets has generated large volumes of rejected fruit due to non-compliance with quality standards "export surpluses", making evident the problems involved in the management of waste from the banana industry. In this research it was proposed to design and build an automatic distiller to obtain ethyl alcohol from rejected bananas. The proposed methodology consisted of inducing an endogenous hydrolysis in the fruit, then the extraction and fermentation of the clarified juice were performed in an anaerobic condition adding *Saccharomyces cerevisiae* 1.0×10^9 cells / ml for a period of 48 hours. The yield of the clarified juice was 500 ml / kg of banana and 0.065 liters of ethanol for each liter of clarified juice. The highest concentration of alcohol was 64.4%. In the present study an experimental design known as a factorial (3x2) was used, 27 treatments related to the temperature for the distillation (65 ° C, 70 ° C and 75 ° C) and the time used in the distillation process were analyzed in the functional prototype of the automated distiller (1.5h, 2h and 3h), these combinations were analyzed with precision alcoholometer with a thermometer to determine the alcohol concentration (%). An ANOVA was performed to determine the effect of temperature and time, in the same way the interaction between these two variables. The best distillation time corresponds to the process over 3 consecutive hours with a temperature of 75 ° C, which corresponds to the test 27. In the development of this project the standardization of the distillation process of the banana-based alcohol was achieved with an alcoholic concentration of 64.4% under the conditions evaluated.

Key words: Alcoholic fermentation, bioethanol, *Musa spp.*, Banana rejection, Urabá.



Introducción

La zona de Urabá es conocida nacional e internacionalmente por su producción y exportación de plátano y banano (*Musa spp.*) en la zona se producen aproximadamente 66.3 millones de cajas/año de banano (Augura, 2017). No obstante, la fruta de exportación pasa por diferentes etapas de selección en campo, barcadilla y en puerto, generando pérdidas o mermas de fruta por baja calidad en cada una de las etapas mencionadas, esta fruta es considerada por los productores como excedentes de exportación “rechazo”. El estimado más reciente de rechazo generado en Urabá es de 250.000 Ton/año (Yoshioka y Mosquera, 2007; Asociación de Bananeros de Colombia - Augura, 2007; Guevara et al., 2012).

En Colombia existen 47.272 Ha. de banano; en Urabá 34.054 Ha. con una productividad promedio de 1.950 cajas/Ha/año (Augura, 2017). La mala disposición del banano de rechazo en el Urabá antioqueño tiende a generar impactos sobre el medio ambiente, su degradación natural genera gases tóxicos y de efecto invernadero que contribuyen al deterioro de la capa de ozono y a la aceleración del calentamiento global, además es causante de la proliferación de insectos que pueden ser vectores de enfermedades o insectos plagas que causan manchas y/o cicatrices que afectan la estética del banano de exportación, a su vez se producen lixiviados que arremeten contra la calidad hídrica superficial y subterránea, y la calidad de los suelos (Afanador, 2005; Nieto, 2009; Méndez, 2010).

En las últimas décadas, la utilización de procesos biotecnológicos para la obtención de bienes y servicios se ha convertido en una gran alternativa que ofrece soluciones a problemas provenientes de la aplicación de tecnologías tradicionales. En Colombia se han obtenido avances tecnológicos y productivos importantes en la aplicación de la biotecnología en cuanto a la producción de biocombustibles se refiere (Zapata & Peláez, 2010). El buen manejo de los recursos naturales es un tema que día a día va tomando auge a nivel mundial. El aprovechamiento de desechos agrícolas para la elaboración de nuevos productos tales como los agrocarburos (alcohol etílico) representa una alternativa viable para alcanzar las metas de sostenibilidad, ya que además de brindar beneficios ambientales y sociales, es económicamente rentable (Méndez, 2010, p.1).

Las energías renovables se definen como formas de energía que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable. Dentro de estos tipos de energía se encuentran: la solar, la eólica (viento), la hidráulica, la biomasa (materia orgánica), la geotérmica (calor de las capas internas de la tierra) y la energía oceánica, principalmente (Linares et al., 2012, p. 102).

Algunos desarrollos tecnológicos actuales indican una clara tendencia a reducir el consumo y evitar la contaminación ambiental; así, el predominio del petróleo está acercándose lenta pero progresivamente a su fin. Probablemente, para mediados de este siglo, el petróleo pasará a un lugar secundario ante un uso siempre más frecuente de fuentes renovables de energía, como la que se produce por la biomasa en la producción de combustibles alternos a partir de productos vegetales, desechos agroindustriales o residuos urbanos (García, 2013).

El precio del petróleo ha sido uno de los principales factores que han tenido incidencia sobre la demanda de Biocombustibles. El aumento en los últimos años de la población mundial, sumado al incremento de la demanda energética de países emergentes como lo son Brasil y China, ha redundado en una variación del precio del crudo, lo que ha llevado a los países importadores a buscar otras fuentes alternativas de energía (Torres, 2012). La disponibilidad del petróleo que, de acuerdo a las reservas permite prever que se agotará y la necesidad de contar con combustibles ecológicos, con alto octanaje y grado de oxigenación hacen que sea necesario plantear seriamente estrategias de generación de energéticos que le permitan mantener la autonomía e independencia con grandes implicaciones económicas y sociales. Uno de los caminos es el de evaluar diferentes alternativas para que se tenga una tecnología sustentable, competitiva y rentable (Aguilar, 2007, p. 36).

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es diseñar y elaborar un destilador automatizado para la producción de alcohol etílico a partir de excedentes de la fruta banano como prototipo de laboratorio, generando conocimiento para el fomento del aprovechamiento de la fruta de rechazo en la subregión de Urabá, teniendo en cuenta los altos volúmenes de desperdicio que se genera en algunas temporadas.

Importancia del cultivo de banano

El banano es la fruta fresca más exportada del mundo, en cuanto a volumen y valor. Se cultiva en todas las regiones tropicales y tiene una importancia fundamental para las economías de muchos países en desarrollo. El banano es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz. Es un alimento básico y un producto de exportación. Como alimento básico, los bananos contribuyen a la seguridad alimentaria de millones de personas en gran parte del mundo en desarrollo, y dada su comercialización en mercados locales, proporcionan ingresos y empleo a las poblaciones rurales. Como producto de exportación, el banano contribuye de forma decisiva a las economías de muchos países de bajos ingresos y con déficit de alimentos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO, 2012)

Para el año 2016 la FAO reportó que las exportaciones de banano a nivel mundial alcanzaron un total de 16.5 Millones de toneladas siendo los mayores productores la India y Uganda. En Latinoamérica los principales países exportadores en su orden fueron Ecuador, Costa Rica, Guatemala y Colombia (FAO, 2016)

Las exportaciones de banano en Colombia para el año 2016 sumaron US \$8311 millones, representadas con un total de 93,4 millones de cajas, la productividad promedio fue de 1.976 cajas/Ha, con un área total sembrada de 47.272 Ha. que se encuentra concentrada en dos zonas: Urabá - Antioquia y Magdalena, y se destina principalmente a mercados de exportación. En Urabá para ese mismo periodo las exportaciones fueron de 66.3 millones de cajas por valor de US \$561,6 millones. La productividad promedio fue de 1.950 cajas/Ha. y las hectáreas sembradas en la región fueron 34.054. Generando más de 25.000 empleos directos y más de 70.000 indirectos (Augura, 2017).

La demanda de producto es creciente cada día por esto el sector aumenta constantemente sus áreas de producción, el sector bananero cuenta con prestigio internacional que se ha ganado año tras año, por la calidad de sus productos y el cumplimiento de las normas nacionales e internacionales, por estas razones la demanda de producto es constante lo que le da una mayor estabilidad al sector (Mosquera, 2013).

Banano de rechazo

Para ser exportado el banano es sometido 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. En la etapa de selección y empaque, se presentan rechazos en las operaciones de desgaje y desmane. En la selección se inspeccionan las dimensiones de la fruta, y en el empaque, las condiciones de la cáscara. De este modo, el rechazo de empacadora resulta de la exigencia de calidad estipulada por las comercializadoras de banano. De acuerdo con la causa de rechazo, la fruta se clasifica en rechazo en empacadora, rechazo en puerto y boleja (Afanador, 2005).

La boleja equivale del 10% al 20% de una tonelada de fruta producida. Sin embargo, gran cantidad del banano se pudre, debido a que cuando adquiere su madurez no alcanza a ser consumido, la boleja posee un bajo contenido en fibra y proteína y un alto contenido en taninos. Los taninos son sustancias fenólicas, resultado de la combinación de una molécula de azúcar, generalmente glucosa con un número variable de moléculas de ácidos fenólicos, ácido gálico o su dímero y el ácido elágico (Valderrama, 2005).

El banano de rechazo es un residuo de cosecha que posee un gran valor desde el punto de vista nutricional cuando está maduro, por ser una fuente de alto potencial energético en la alimentación animal. Su disponibilidad en la zona de Urabá es alta, produciéndose anualmente cerca de 250.000 toneladas de banano verde de rechazo (Yoshioka y Mosquera, 2007; Augura, 2007; Guevara et al., 2012).

Composición química del banano de rechazo

Los residuos de banano, tiene una estructura compleja que consta de dos polímeros de carbohidratos, la celulosa (35-50%) y la hemicelulosa (15-25%), y un polímero fenólico; la lignina (20-25%). A partir de la celulosa y la hemicelulosa, se pueden obtener unidades monoméricas de glucosa, lo que le confiere un gran potencial a la biomasa como materia prima para la producción de glucosa que puede ser aprovechada en diversos usos industriales (Cortes et al., 2013). En la tabla 1 se muestra la composición bromatológica del banano verde.

Tabla 1. Composición bromatológica de banano verde

Índice (% en base seca)	Fruto	Cascara
Materia seca	20	18
Extracto libre	8,2	33,5
Proteína (Nx6,25)	5,5	9,5
Extracto etéreo	1,1	8,3
Fibra bruta	1,3	26,7
Cenizas	4,0	22,0
Taninos	7,4	40,5
Almidón	72,3	-

Fuente: Valderrama, 2005

La biomasa es el término genérico que se refiere al conjunto de la materia biológicamente renovable (árboles, desechos de cultivos), de la que se puede obtener biocombustibles como el bioetanol. Actualmente hay un gran interés por la producción de grandes cantidades de este como alternativa a los combustibles fósiles en todo el mundo (Linares et al., 2012). La biomasa lignocelulósica es la más atractiva y prometedora fuente alternativa de energía renovable. Es el componente estructural mayoritario de las plantas maderables y no maderables. La lignocelulosa está constituida por tres polímeros estructurales: lignina, celulosa y hemicelulosa. Las propiedades químicas de sus componentes hacen de ella un sustrato de enorme valor biotecnológico (Howard, et al., 2003).

El alcohol etílico también conocido como etanol es un compuesto químico orgánico y volátil, que se presenta en condiciones normales de presión y temperatura como un líquido incoloro con un punto de ebullición de 78,4 °C. Su fórmula química es $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), este puede ser obtenido a partir de la biomasa por medio de procesos de fermentación a través de la obtención de jugos de frutas, utilizando levaduras que contienen enzimas catalizadoras que transforman los azúcares complejos a sencillos y a continuación en alcohol y dióxido de carbono. Dado que la composición de la celulosa es muy rica en azúcar, resultaría muy útil producir alcoholes a partir de la fermentación de celulosa, principal componente estructural de los materiales vegetales (Núñez y García, 2006; Repetto, 1995).

El etanol a partir de recursos renovables ha sido de interés en las últimas décadas como un combustible alternativo a los combustibles fósiles actuales. La biomasa proveniente de las labores agroindustriales son materias primas potenciales para la producción de varios productos de alto valor como combustible

de etanol y biodiesel. (Kaparaju et al., 2009). Estas materias primas renovables parecen prometedoras para la sustitución de hidrocarburos fósiles ambientalmente hostiles y, por tanto, la creación de productos "verdes". En contraste con los combustibles tradicionales, bioetanol no contribuye al efecto invernadero, siendo un recurso neutral (Belal, 2013, p. 1).

El banano verde tiene alto contenido de almidón y celulosa (13.1 y 17.9 % base húmeda respectivamente), que se considera como una materia potencial para la industria de bioetanol; el proceso tradicional de producción de alcohol a partir de almidones y celulosa contemplan procesos químicos o biológicos para su conversión a jarabes azucarados, que una vez acondicionados se someten a la acción de levaduras que efectúan la fermentación alcohólica, esta es la transformación de sustratos azucarados por la acción de microorganismos, que durante su ciclo de vida consume el sustrato y fabrican etanol y otros compuestos bioquímicos, como resultado de su metabolismo (Zapata, 2010, p. 2).

El proceso de maduración del banano se caracteriza por una secuencia de cambios físicos, químicos, bioquímicos y metabolitos que permiten al fruto alcanzar sus atributos sensoriales (forma, color, sabor, textura y aroma) el desarrollo del proceso de maduración depende de un delicado y complejo equilibrio entre hormonas inductoras de la maduración (etileno y ácido abscísico) e inhibidoras (auxinas, citoquininas y giberelinas) que regulan los mecanismos bioquímicos (Moreno, 2005, p. 5).

Una de las opciones para producir etanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera). Por tal razón, es común designar al etanol obtenido por esta vía "bioetanol". Entre estas materias primas se encuentran las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-celulosas o de residuos orgánicos (Vázquez y Dacosta, 2007). La conversión a etanol comprende dos etapas generales: la primera de pretratamiento e hidrólisis; donde se obtienen los azúcares simples fermentables (glucosa y xilosa), y la de fermentación en la cual estos azúcares son convertidos en etanol, por la acción de los microorganismos (Fujita et al., 2004).

La hidrólisis del almidón implica la ruptura de un enlace mediante la adición de agua, es decir, los polisacáridos se hidrolizan para dar lugar a monosacáridos. Hidrólisis enzimática implica la movilización del almidón en los organismos, requiere su conversión en glucosa para ser asimilado de mejor manera. Como el almidón es un polímero de la alfa-D-glucosa, es de esperarse que por hidrólisis completa se obtenga D-glucosa como producto final; esta hidrólisis se puede llevar a cabo en forma enzimática, utilizando α y β -amilasas o por acción de la amilasa presente en la saliva. La hidrólisis del almidón sucede en varias etapas; primero se producen las dextrinas (polisacáridos de menor masa molecular), luego la maltosa y por último la glucosa (Bolaños et al., 2003).

La fermentación alcohólica es una biorreacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Las principales responsables de esta transformación son las levaduras. *Saccharomyces cerevisiae*, es la especie de levadura usada con más frecuencia. Por supuesto que existen estudios para producir alcohol con otros hongos y bacterias, como la *Zymomonas mobilis*, pero la explotación a nivel industrial es mínima. A pesar de parecer, a nivel estequiométrico, una transformación simple, la secuencia de transformaciones para degradar la glucosa hasta dos moléculas de alcohol y dos moléculas de bióxido de carbono es un proceso muy complejo, pues al mismo tiempo la levadura utiliza la glucosa y nutrientes adicionales para reproducirse. (Almeida y Esteves, 2006). La fermentación alcohólica es un proceso biológico anaerobio, originado por la actividad de ciertos microorganismos que procesan los hidratos de carbono (generalmente los azúcares) dando como resultado la formación de un alcohol (etanol), dióxido de carbono en forma de gas y moléculas de ATP consumidas por el propio microorganismo en su metabolismo celular (Austin, 1984).

Desde el punto de vista microbiológico, se entiende por fermentación aquel proceso en el que los microorganismos producen metabolitos o biomasa, a partir de la utilización de sustancias orgánicas, en ausencia o presencia de oxígeno. Como ejemplo tenemos la producción, a partir de glucosa, de etanol y dióxido de carbono (Hernández, 2003; Machado y Silva, 2014).

La levadura *Saccharomyces Cerevisiae*, es un hongo unicelular, del grupo de los ascomicetos que

para llevar a cabo el proceso de fermentación alcohólica, *Saccharomyces cerevisiae*, cataboliza la glucosa mediante la glucólisis o ruta de Embden-Meyerhof, para obtener el piruvato el cual posteriormente por la acción de enzimas específicas, se convierte anaeróbicamente en etanol, generando 2 moles del compuesto portador de energía en los seres vivos, el adenosín trifosfato (ATP), por cada mol de hexosa consumida, además de 2 moles de Etanol. Las levaduras tienen la ventaja adicional de tolerar concentraciones relativamente altas de Etanol (hasta 150g·L⁻¹), no es exigente en cuanto a su cultivo y no presenta alto costo (Castaño et al., 2009; Claassen et al., 1999; Nieto, 2009).

Según Tubón & Janneth (2014), los principales factores que influyen en la fermentación corresponden a:

Temperatura. A mayor temperatura la fermentación transcurre más rápidamente, sin embargo, se produce menos etanol y más cantidad de compuestos secundarios. Las levaduras a 30°C tienen su temperatura óptima de desarrollo. Por encima de 35°C la actividad disminuye rápidamente y mueren a antes de 45°C.

Oxígeno. La fermentación es un proceso anaerobio, la presencia de oxígeno detendría el proceso completamente, el reactor en el que se lleve a cabo el proceso debe estar sellado para evitar la entrada de aire.

pH. Es un factor fundamental en el proceso, las levaduras se encuentran afectadas por el ambiente ya sea alcalino o ácido. Las levaduras funcionan generalmente en un rango de pH que va desde 3,5 a 5,5. Mientras más ácido sea el pH, se evita la proliferación de microorganismos patógenos en los procesos fermentativos.

Concentración de azúcares. La concentración excesiva de hidratos de carbono en forma de monosacáridos y disacáridos puede frenar la actividad de las levaduras, así como una baja concentración causaría el mismo efecto. Las concentraciones límites dependen del tipo de azúcar, así como de la levadura responsable de la fermentación. Generalmente una concentración del sustrato óptimo para la levadura se encuentra entre los 18°Brix.

Nutrientes. A las levaduras les es necesario encontrar ciertos alimentos en el mosto donde se

desarrollan, la adición de nitrógeno amoniacal permite a las levaduras nutrirse para multiplicarse.

En cuanto a la destilación, el producto obtenido por el proceso de líquidos fermentados, elaborados a partir de materias primas vegetales en las que la totalidad, o una parte de sus azúcares fermentables, hayan sufrido fermentación alcohólica, el producto deberá contener las sustancias secundarias formadas durante la fermentación (Vildiviezo & Morales, 2016).

La destilación implica la separación, selección y concentración de los productos alcohólicos de la fermentación de la levadura de la masa de granos de fermentados y que algunas veces se conoce como “mosto fermentado” o “cerveza de destilería”. Además del alcohol y de los productos secundarios deseables, la masa fermentada contiene partículas de granos sólidas, células de levadura, proteínas solubles en agua, algunas sales minerales, ácido láctico, ácidos grasos y residuos de glicerina (Desrosier, 1999).

Metodología

Localización y diseño de estudio

Los ensayos se realizaron en el prototipo funcional del destilador automatizado el cual fue construido en una primera fase de la investigación, el estudio se desarrolló en el laboratorio de Agrobiotecnología y el laboratorio de Electrónica del Complejo Tecnológico Agroindustrial, Pecuario y Turístico - Sena del municipio de Apartadó, Antioquia-subregión de Urabá. El presente estudio es una investigación experimental, donde se midieron y se controlaron la temperatura del proceso de destilación y el tiempo de destilación, determinando variables factoriales para lograr una relación que presente los mejores resultados. Los datos fueron evaluados con Alcohómetros de precisión con termómetro para determinar el grado de alcohol obtenido, y se realizó un ANOVA con el programa IBM SPSS para determinar el nivel de significancia de temperatura y tiempo y de igual manera la interacción entre estas dos.

Procedimiento

La estructura del equipo automatizado para la destilación de alcohol etílico consta de tres niveles: Fermentación, Destilación y Condensación.

1° Nivel (fermentación): Aquí se encuentra el biorreactor para la fermentación anaerobia, que consiste en un cilindro con tapa en polipropileno de 10 L. al cual se le adaptó un motor DC (Faulhaber DC) para el sistema de agitación hidráulica, también se le acopló una válvula para la salida de oxígeno y además se le incorporaron 2 sensores de proximidad capacitivo (CR series) para medir la capacidad real del biorreactor. Para el traslado del mosto hacia la columna de destilación se usó una Electrobomba (Top Mall-W464).

2° Nivel (destilación): El reactor de destilación es un recipiente en aluminio con capacidad de 21 L (Presto Pressure Canner) que está dotado de un sistema de seguridad comprendido por un controlador de temperatura (Sinotimer), además tiene una electroválvula (Modelo MOT 0388) para el paso de los fluidos desde el biorreactor hacia la columna de destilación y otra de la columna de destilación al sistema de condensación. Para incorporar calor en el proceso de destilación se dotó de una Resistencia eléctrica (Saisho HP-1).

En este nivel también se encuentra el microcontrolador (Arduino Uno R3 Board), este es el sistema de control dirigido por programación encargado de activar y suspender los sistemas comprendidos en los niveles de fermentación, destilación y condensación.

3° Nivel (condensación): en este nivel se encuentra el sistema de refrigeración este sistema se desarrolló con el uso de un motor de nevera (Embraco NE6187Z 3T) y un cilindro metálico con una entrada (gases de alcohol) y una salida (alcohol condensado) el cual se regula por medio de una electroválvula (Modelo MOT 0388). El alcohol obtenido se recoge en un frasco de vidrio con tapa perforada, a donde llega la manguera que conduce el alcohol.

Todo este sistema integrado y automatizado fue montado en un estante de ángulo ranurado como se puede observar en la en la figura 1.



Fuente: Los autores

Figura 1. Destilador automatizado construido en laboratorio.

Proceso de obtención de etanol

El proceso de adecuación del material vegetal y fermentación se desarrolló tomando como referencia a Guevara et al., (2012), donde se adaptaron los procedimientos correspondientes a: microorganismo, concentración de levadura, tipo de agitación en la fermentación y pH, como se evidencia en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para la fermentación

Parámetros	Procedimiento Nivel I
Microorganismo	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Concentración de levadura	1.0×10^9 células/ml
Tiempo de fermentación	48 horas
Tipo de agitación en la fermentación	Hidráulica
pH	7.0
Temperatura del proceso	25°C

Fuente: adaptado de Guevara et al., 2012

El primer procedimiento que se llevó a cabo para la producción de etanol es la recolección del material vegetal en estado verde, estos se obtuvieron en fincas bananeras cercanas al Complejo; luego fueron sometidos a hidrólisis endógena por periodo de 96 horas hasta su estado óptimo de maduración, como se observa en la figura 2.



Recolección del material vegetal



Proceso de hidrólisis endógena (maduración natural)

Fuente: Los autores

Figura 2. Recolección y maduración de los bananos.

Posteriormente los bananos maduros en fase de laboratorio se les retira la cascara en el pre acondicionamiento, la pulpa de la fruta es macerada y posteriormente licuada en una licuadora (Black & Decker), luego este material es pesado en una balanza electrónica (Ohaus), la extracción de los jugos se realizó en una etapa por adición de 300 ml de solución acuosa de cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 10% por cada Kg de banano, mezclado y dejado en reposo por 15 minutos y luego centrifugación a 900 rpm en un equipo marca Awel-MF 48-R. El jugo fue neutralizado con ácido sulfúrico (H_2SO_4) comercial, esterilizado y filtrado con papel filtro (Advantec), hasta obtener el jugo clarificado de banano como se evidencia en la Figura 3.



Mosto de banano



Proceso de centrifugado



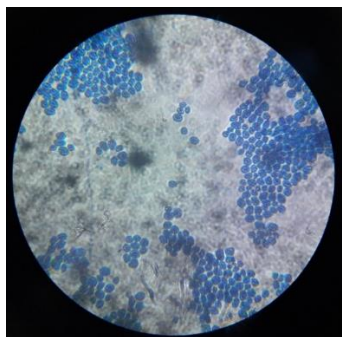
Jugo clarificado de banano

Fuente: Los autores

Figura 3. Acondicionamiento del material.

Después de obtener el jugo clarificado se le adiciona el microorganismo fermentador y se lleva a cabo la fermentación anaerobia en el prototipo automatizado. El microorganismo empleado para la fermentación fue la levadura *Saccharomyces*

cerevisiae (Figura 4), activada en agua a 37°C durante 30 minutos en una placa de calentamiento con agitación magnética (Benchmark). En este último los azúcares contenidos en la fruta son desdoblados y se convierten en alcohol gracias a la acción de la levadura y posteriormente se procede con la destilación. Las concentraciones de alcohol obtenidas en cada ensayo fueron determinadas por Alcohómetro con termómetro (AlcoFermBrew). Para la determinación de alcohol se utilizó el método que consiste en verter 50 ml del destilado obtenido en una probeta de 100 ml, luego se introduce el alcohómetro en la probeta de forma que no toque las paredes y esté totalmente firme, y se procede a verificar la lectura que se encuentra en la escala.



Fuente: Los autores

Figura 4. Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*)

Las fermentaciones se realizaron por un periodo de 48 horas (Guevara et al., 2011; Macías, 2010; Austin, 1984). Los fermentos fueron destilados a presión atmosférica. Los tiempos y las temperaturas en las que fueron realizadas las destilaciones se evaluaron bajo un diseño experimental en bloques completamente al azar de tipo factorial 3x2, cada tratamiento con tres repeticiones para un total de 27 ensayos. Como se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Diseño Factorial 3x2.

Temperatura de destilación	Tiempo de destilación
65°C	1.5 horas
70°C	2 horas
75°C	3 horas

Resultados y discusión

En esta primera fase del proyecto se logró la estandarización del proceso de destilación de etanol a base de banano (ensayo 27). En el presente trabajo se obtuvo alcohol al 64.4%. Guevara et al., (2012)

desarrollaron un proceso fermentativo a partir de banano verde a escala de 1 litro, obteniendo como resultado alcohol al 73% el cual es mayor al logrado en esta investigación, los rendimientos de etanol en promedio fueron 0.065 litros por kilogramo de banano verde. La mayor concentración del alcohol reportada por los autores, se debe a que el tipo de destilación fue fraccionada lo que permite un mayor aprovechamiento. En esta investigación los rendimientos de extracción de jugo clarificado de banano fueron de 500ml/kg de banano y 65 ml de alcohol por cada litro de jugo clarificado. Este rendimiento coincide con los rendimientos reportados por Guevara et al., (2012). El tiempo de destilación que mayor resultado arrojó en esta investigación fue el proceso sometido a 3 horas continuas relacionado con la temperatura de 75°C, el cual corresponde al ensayo 27; la temperatura de destilación jugó un papel fundamental ya que por debajo de 63°C puede generarse metanol que incide fuertemente en la calidad del etanol de acuerdo a lo que reporta Gutiérrez (2011). Valdiviezo & Morales (2016) obtuvieron un destilado alcohólico a base de granos de maíz, en este la temperatura de la destilación se mantuvo a 80°C por un periodo de 4 horas, los grados de alcohol resultante de la destilación fueron de 30% Alc. Vol. Lo que representa un porcentaje bajo atribuido directamente a la temperatura suministrada en el proceso de destilado ya que los procesos de destilados generalmente se desarrollan a 75± 3 debido a que a mayores temperaturas se evapora el agua y el rendimiento alcohólico se desaprovecha tal y como lo afirman Tubón & Janneth (2014). Un factor muy importante es el tiempo de fermentación debido a que de este depende la producción eficiente de alcohol de acuerdo a lo que reporta Macías (2010). Esto debido a que si no se da un adecuado proceso de fermentación los niveles de alcohol pueden ser bajos como también lo indica Afanador (2005), por otra parte, Fujita, et al., (2004) y Jaime et al., (2009) afirman que los contenidos de azúcares convertibles en el banano permiten tener un mejor aprovechamiento en comparación con la principal fuente de producción de alcohol en Brasil y Colombia como lo es la caña de azúcar.

La eficiencia en la fermentación y los azúcares en el medio fermentado destilado, no fueron evaluados debido a que se trabajó siguiendo un protocolo previamente desarrollado por otros investigadores, donde se hizo un estudio riguroso de esas condiciones en este sentido solo se evaluó la

efectividad del prototipo en el proceso de destilación específicamente, para futuras investigaciones se recomienda medir otras variables de interés.

A continuación, se describe el análisis estadístico realizado en el proceso de investigación, en la tabla 4 se muestra las pruebas de efectos inter-sujetos

Tabla 4. Pruebas de los efectos inter-sujetos

Origen	Variable dependiente: % alcohol						
	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Suma de cuadrados parcial	Parámetro de no centralidad observado
Modelo corregido	4032,805 ^a	8	504,101	3463,287	0,000	0,999	27706,295
Intersección	49596,735	1	49596,735	340740,926	0,000	1,000	340740,926
Tiempo	832,236	2	416,118	2858,827	0,000	0,997	5717,654
Temperatura	3160,972	2	1580,486	10858,300	0,000	0,999	21716,601
Tiempo * Temperatura	39,597	4	9,899	68,010	0,000	0,938	272,041
Error	2,620	18	0,146				
Total	53632,160	27					
Total corregida	4035,425	26					

a. R cuadrado = ,999 (R cuadrado corregida = ,999)

b. Calculado con alfa = ,05

El P-valor está por debajo del $\alpha=0,05$, indicando que H_0 se rechaza lo que implica que uno de los tratamientos presenta un mejor comportamiento por lo tanto se procede a realizar la prueba Tukey, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Análisis de la variable tiempo

DHS de Tukey ^{a,b}	% Alcohol			
	Tiempo (Hr)	N	Subconjunto	
	1,50	9	1	2
	2,00	9	1	2
	3,00	9	1	2
	Sig.		1,000	1,000

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,146.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9,000

b. Alfa = ,05.

Se observa que los datos obtenidos son agrupados en tres subconjuntos con valores promedios de % de alcohol de 35,9. 43,1 y 49,5 respectivamente mostrando que, el tiempo más prolongado permite obtener una mayor eficiencia en la extracción de alcohol con el prototipo automatizado, esto se debe a que en el proceso de destilación de alcohol el

volumen incide directamente en los tiempos para la evaporación de los gases etanólicos tal y como lo menciona Gutiérrez (2011). En la tabla 6 se muestra la variable temperatura

Tabla 6. Análisis de la variable temperatura

DHS de Tukey ^{a,b}	% Alcohol			
	Temperatura (°C)	N	Subconjunto	
	65,00	9	1	2
	70,00	9	1	2
	75,00	9	1	2
	Sig.		1,000	1,000

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = ,146.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 9,000

b. Alfa = ,05.

En cuanto a la temperatura, se puede observar que presenta un comportamiento directamente proporcional con el porcentaje de alcohol, mostrando al subconjunto 3 con un promedio de 56,8%

Esta dinámica se ajusta al grado de evaporación del alcohol correspondiendo mantener una temperatura óptima para la producción eficiente de alcohol como lo reportan Méndez (2010) y Cortes et al., (2013).

También se realizó un análisis relacionando la variable tiempo y temperatura, lo cual demostró que a mayor tiempo (3h) y a mayor temperatura (75°C), los aprovechamientos etanólicos presentan un mejor rendimiento con relación a los grados alcohólicos obtenidos. Esto presenta un comportamiento muy relacionado con lo mencionado por Méndez (2010); Cortes et al., (2013) y Gutiérrez (2011).

En el análisis de las combinaciones de la variable temperatura y la variable tiempo, detallando que cada uno de los tratamientos presenta una media alejada del otro, lo cual lo clasifica en un subconjunto diferente, siendo la combinación temperatura 75°C y el tiempo 3 horas los mejores resultados. Lo que presenta un aprovechamiento en concentración alcohólica mucho más considerable que el obtenido por Valdiviezo y Morales (2016), teniendo en cuenta a lo indicado por Tubón y Janneth (2014) a mayores temperaturas se evapora el agua presente en el fermento y el rendimiento alcohólico se altera y a bajas temperaturas se obtendría ácidos orgánicos como el ácido acético. Finalmente, en la tabla 7 se muestra los resultados de concentración de alcohol (%) teniendo en cuenta las diferentes combinaciones

Tabla 7. Concentración de alcohol (%) para los ensayos realizados.

Ítem	Temperatura para destilación (°C)	Tiempo para destilación (h)	Repetición	Resultado (%)
1	65°C	1.5	1	20.8%
2	65°C	1.5	2	22.4%
3	65°C	1.5	3	21.6%
4	65°C	2	1	32.55%
5	65°C	2	2	32.6%
6	65°C	2	3	32.2%
7	65°C	3	1	37.2%
8	65°C	3	2	37.7%
9	65°C	3	3	37.4%
10	70°C	1.5	1	36.5%
11	70°C	1.5	2	35.9%
12	70°C	1.5	3	36.3%
13	70°C	2	1	41.1%
14	70°C	2	2	40.6%
15	70°C	2	3	40.2%
16	70°C	3	1	47.2%
17	70°C	3	2	46.8%
18	70°C	3	3	46.6%
19	75°C	1.5	1	49.8%
20	75°C	1.5	2	49.7%
21	75°C	1.5	3	50.2%
22	75°C	2	1	56.2%
23	75°C	2	2	56.7%
24	75°C	2	3	56.4%
25	75°C	3	1	64.2%
26	75°C	3	2	64%
27	75°C	3	3	64.4%

En la figura 5 se observa el alcohol obtenido con el prototipo automatizado, es un alcohol en una concentración del 64.4% que puede tener posibilidades de uso en laboratorios o en otros procesos industriales.



Fuente: Los autores

Figura 5. Alcohol obtenido en condiciones de laboratorio bajo los parámetros evaluados

Actualmente hay una creciente necesidad mundial por el uso de combustibles y procesos industriales más limpios que minimicen el consumo de energía, la producción de desechos tóxicos o el uso de

materiales corrosivos, explosivos, volátiles y no biodegradables, en este sentido la búsqueda de fuentes de energía renovables, de alta eficiencia y bajo o nulo impacto ambiental es uno de los principales retos científicos de la actualidad. Dentro de las posibilidades, se encuentra el uso de la biomasa para la obtención de etanol, ya que representa una fuente de energía renovable. Dentro de la biomasa, se puede considerar a los residuos lignocelulósicos como una gran oportunidad, especialmente cuando estos provienen de residuos no aprovechados en la agroindustria, especialmente en cultivo de banano (Loayza & Silva, 2013).

Los biocombustibles líquidos denominados también biocarburantes, son productos que se están empleando como sustitutos de la gasolina y del aceite combustible para motor en vehículos, estos son obtenidos a partir de materias primas de origen agrícola, a diferencia de otros recursos naturales como el petróleo, carbón y los combustibles nucleares. Aunque se puede hablar de muchos tipos de biocombustible, por su importancia, aplicación y volumen de producción, básicamente hay dos: el bioetanol y el biodiésel, que se cree pueden sustituir a los combustibles fósiles más tradicionales, en virtud de su bajo o nulo deterioro ambiental y sus características de renovación. Actualmente, muchos países promueven la idea de "sembrar sus propios combustibles", para no depender de importaciones o de reservas agotables y, colateralmente generar empleos estables y de calidad. Indudablemente, la energía constituye un elemento fundamental para los procesos de desarrollo económico de un país, pero dada su caracterizada diversidad, en materia de disponibilidad de fuentes energéticas, se requieren alternativas tecnológicas y soluciones integrales para resolver sus demandas (Cortes, et al., 2011, p. 2).

La necesidad de buscar nuevas alternativas para una demanda futura de energía es considerablemente alta hoy en día. Además, la denominada segunda generación biocombustibles, en particular el bioetanol producido a partir de subproductos de cosecha, sería la opción más aceptable (Naik et al., 2010). El alcohol carburante producido en Colombia proviene exclusivamente del procesamiento de la caña de azúcar del Valle geográfico del río Cauca. Del etanol total producido, el 61% se obtiene de las destilerías ubicadas en el departamento del Valle, 29% en el Cauca, y 10% en Risaralda. El abastecimiento de etanol se da en

dirección sur – norte, puesto que los ingenios azucareros se ubican en la región sur occidente y la mitad del consumo nacional de gasolinas se da en la zona centro del país (Jaime et al., 2009, p. 1).

Conclusiones y recomendaciones

- Este tipo de investigación incrementa el conocimiento técnico - profesional para la producción de etanol a partir de residuos orgánicos en la subregión de Urabá, ya que esta sería una alternativa para el sector agrícola mediante la transformación de los desechos de cultivos a partir de técnicas biotecnológicas obteniendo subproductos como alcoholes, biocombustibles y otro tipo de agentes bioquímicos que cada día toman auge en el mundo generando un gran impacto positivo a nivel social, ambiental y agrícola.
- Esta investigación permitió obtener alcohol al 64.4% de concentración a partir de los excedentes de banano de exportación usando un prototipo funcional de destilador automatizado resultado de la primera fase de este estudio.
- El estudio permitió determinar que los mejores resultados se presentan a mayor temperatura (75°C) y mayor tiempo de destilación (3horas), dando entonces como resultado que la variable factorial que mejor se comporta es el ensayo 27.
- En futuras investigaciones se recomienda incorporar mayor tiempo en la destilación de los fermentos debido a que se podría presentar un mayor aprovechamiento en comparación con los presentados en este estudio.
- Cabe destacar que en este estudio se trabajó bajo un tipo de destilación simple, por lo tanto, se plantea para futuras investigaciones implementar destilación fraccionada con el propósito de aumentar el grado de alcohol aprovechable por destilación, debido a que esta permite hacer una mejor separación de los alcoholes y moléculas no deseadas presentes en la muestra a destilar.
- Urabá cuenta con potencial en el uso y aprovechamiento de los excedentes de fruta de banano de rechazo, es indispensable continuar con investigaciones para buscar nuevas y

mejores alternativas de aprovechamiento de los residuos.

Agradecimientos

En primera instancia a Dios por la vida y la salud que nos ha concedido y por permitirnos alcanzar nuestros logros. A nuestros padres por el apoyo que nos han brindado a lo largo de nuestras vidas. Al Complejo Tecnológico Agroindustrial Pecuario y Turístico-SENA-Apartadó, que mediante el programa SENNOVA ha impulsado y fortalecido los procesos de investigación y desarrollo tecnológico a través del financiamiento de las investigaciones y la asesoría técnica brindada por los profesionales ingeniera Mónica Obregón Barrios e ingenieros Hernán de Jesús Pulgarín Arcila y Slim Camilo Álvarez Alarcón

Referencias bibliográficas

- Afanador, A. (2005). El banano verde de rechazo en la producción de alcohol carburante. *Revista EIA. Número 3* pp.51-68. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín. Colombia. ISSN 1794-1237 Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/1492/149217448004.pdf> [Agosto 26, 2016]
- Aguilar, R. (2007). *Bioetanol de la caña de azúcar*. México. *Revista Avance en Investigación Agropecuaria*. ISSN 0188789-0. México. pp.25-39. Recuperado de: <http://www.uco.mx/revaia/portal/pdf/2007/sept/2.pdf> [Junio 14, 2015]
- Almeida, C. & Esteves, B. (2006). *Nouveaux Defis pour les biocarburants bresiliens*. *Revista Biofutur*, No. 269. pp.32-36. Recuperado de: <http://www.iea.org/publications/> [Marzo 10, 2016]
- Asociación de Bananeros de Colombia-Augura. (2016). *Coyuntura bananera. Estadísticas del sector 2016*. Medellín. 33p. Recuperado de: <http://www.augura.com.co/wp-content/uploads/2015/08/CONYUNTUR-A-BANANERA-2015.pdf> [Julio 28, 2016]
- Austin, G. (1984). *Shreve's chemical process*

- industries. Fermentation industries.* McGraw-Hill, 5th edition. 591p. Recuperado de: http://www.gcet.ac.in/departments/ch/course/coursedetail_spu_new/ch487.pdf [Noviembre 12, 2016]
- Belal, E. (2013). *Bioethanol production from rice straw residues*. Brazilian Journal of Microbiology. Vol. 44 (1). pp.225-234. Recuperado de: <http://www.scielo.br/pdf/bjm/v44n1/v44n1a33.pdf> [Abril 20, 2016]
- Bolaños, N., Lutz, G. y Herrera, H. (2003). *Química de Alimentos: Manual de laboratorio*. Editorial Universidad de Costa Rica. 19p. Recuperado de: https://books.google.es/books?id=8VpJ8foyDiIC&sitesec=buy&hl=es&source=gbs_vpt_read [Octubre 4, 2015]
- Castaño, S. y Hernández, C. (2009). *Estudio comparativo para la producción de etanol entre Saccharomyces cerevisiae silvestre, Saccharomyces cerevisiae ATCC 9763 Y Candida utilis ATCC 9950*. Facultad de química industrial. Universidad Tecnología de Pereira. 120p. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1689/1/66182G245.pdf> [Febrero 22, 2016]
- Cortes, E. Velásquez, H. y Cárdenas, E. (2011). *Biocombustibles búsqueda de alternativas*. Rev CES Med Vet Zootec. Vol 6 (2). pp.118-123. Medellín. Recuperado de: <http://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/2063/1954> [Noviembre 14, 2016]
- Cortes, W., Ibla, J., Calderon, L. y Herrera, A. (2013). *Cuantificación de azúcares reductores en las cáscaras de naranja y banano*. Revista de Tecnología. Journal Technology. Vol. 12. (2). pp.72-76. Bogotá. Recuperado de: http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/publicaciones/revistas/revista_tecnologia/volumen12_numero2/7Articulo_Rev-Tec-Num-2.pdf [Julio 16, 2016]
- Desrosier, N. (1999). *Elementos de tecnología de alimentos*. Ed. CECSA Grupo editorial Patria. ISBN. 13: 9789682603853. San Francisco. USA. [Noviembre 19, 2016]
- Fujita, Y., Ito, J., Ueda, M., Fukuda, H. y Kondo, A. (2004). *Synergistic saccharification, and direct fermentation to ethanol, of amorphous cellulose by use of an engineered yeast strain codisplaying three types of cellulolytic enzyme*. Applied and Environl Microbiol. Vol. 70 (2). pp. 1207-1212. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC348929/> [Septiembre 12, 2016]
- García, J. (2006). *Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol*. Madrid. Vigilancia tecnológica. 125p. Recuperado de: https://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt4_Biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf [Junio 9, 2016]
- García, R. (2013). *La viabilidad del uso de los biocombustibles en Pemex*. Tesis de pregrado. Instituto politécnico Nacional. Repositorio Dspace. México. 129p. Recuperado de: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/22992/La%20viabilidad%20del%20uso%20de%20los%20biocombustibles%20en%20PEMEX.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guevara, A., Arenas, H., Mejía, A. y Peláez, C. (2012). *Obtención de etanol y biogás a partir de banano de rechazo*, información tecnológica. Vol. 23 (2), Medellín. pp.19-30. Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200004 [Febrero 29, 2016]
- Gómez, A. (2012) *Transformación del banano en Urabá: experiencias pasadas, iniciativas presentes y nuevas oportunidades de industrialización*. Universidad EAFIT. Medellín. 69p. Recuperado de: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/216/AnaMaria_GomezBerrio_2011.pdf;jsessionid=02AD66FB3709998C0419ABC674379418?sequence=1 [Mayo 18, 2016]

- Hernández, A. (2003). *Microbiología industrial*. Euned. No. 660.62. 291p. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=earth.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=023038> [Noviembre 2, 2016]
- Herrera, B., Leiva, S., Ortiz, V., Cárdenas, J. y Garzón, E. (2009). *Biocombustibles en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 22p. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Biocombustibles_Colombia.pdf [Julio 25, 2016]
- Howard, L., Abotsi, E., Van Rensburg, J. y Howard, S. (2003). *Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production*. African Journal of Biotechnology Vol. 2 (12), pp.602-619. Recuperado de: <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/1923/1/jb03112.pdf?pagewanted=all> [Diciembre 19, 2016]
- Kaparaju, P., Serrano, M., Thomsen, A., Kongjan, P. y Angelidaki, I. (2009). *Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept*. Bioresource Technology. Vol. 100 (9). pp.2562-2568. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085240800967X> [Octubre 30, 2016]
- Linares, L; Montoya, J. y Corona, J. (2012). *Producción de biocombustibles a partir de microalgas*. México. ISSN: 1665-0441. 115p. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/461/46125177011.pdf> [mayo 20, 2016]
- Loayza, J. y Silva, V. (2013). *Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales*. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial. Vol. 16(1). pp.108-117. Recuperado de: <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6425> [Abril 4, 2016]
- Machado, A. y Silva L. (2014). *Obtención de una bebida de bajo contenido alcohólico mediante hidrólisis y fermentación semi-sólida del chontaduro*. Tesis de Grado para la obtención del Título de Ingeniera Química. Carrera de Ingeniería Química. Quito: UCE. 114 p. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2778> [Marzo 13, 2017]
- Macías, A. (2010). *Implementación de una microplanta productora de alcohol etílico a partir de tres tipos de Musáceas*. Tesis de Pregrado Ingeniera de Alimentos. Guayaquil- Ecuador. 92p. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11263/1/TESIS-ANGELICAMACIAS.doc> [Julio 25, 2016]
- Méndez, E. (2010). *Evaluación de la extracción de almidón de banano verde (Musa sapientum Variedad Gran Enano) producto de desecho de las industrias bananeras y evaluación de su función como excipiente en la formulación de comprimidos*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 84p. Recuperado de: <http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%202009.59.pdf> [Mayo 18, 2016]
- Moreno, A. (2005). *Diseño de un proceso para la maduración acelerada del banano*. Escuela Superior Politécnica del Litoral Guayaquil – Ecuador. 110p. Recuperado de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2341/1/4580.pdf> [Noviembre 12, 2016]
- Mosquera, C. (2013). *Acompañamiento y monitoreo de los procesos involucrados en la producción y aprovechamiento de banano tipo exportación en el grupo Santamaría*. Urabá. 34p. Recuperado de: <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/1401/1/11813602.pdf> [Julio 28, 2016]
- Naik, N., Goud, V., Rout, K. y Dalai, K. (2010). *Production of first and second generation biofuels: a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 14 (2). pp.578-597. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364026709001735>

- cle/pii/S1364032109002342 [Julio 17, 2016]
- Nieto, H. (2009). *Evaluación de las condiciones de la fermentación alcohólica utilizando Saccharomyces cerevisiae y jugo de caña de azúcar como sustrato para obtener etanol*. Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de ciencias de la vida ingeniería en biotecnología. Sangolquí. 142p. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/990/1/T-ESPE-026782.pdf> [Noviembre 19, 2016]
- Núñez, M. y García, P. (2006). *Biocombustibles: Bioetanol y Biodiesel*. Dpto de Ingeniería Química, ETSE. Universidad de Santiago de Compostela 16p. Recuperado de: http://enciga.org/files/boletins/61/biocombustibles_bioetanol_y_biodiesel.pdf [Diciembre 10, 2016]
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO. (2012). *La economía mundial de banano. Dirección de productos básicos y comercio*. Roma. 104p. Recuperado de: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5102s/y5102s00.pdf> [Marzo 22, 2016]
- Repetto, M. (1995). *Toxicología del alcohol etílico*. Toxicología avanzada. 1ª ed. Madrid, 425p. Recuperado de: <http://www.scielo.br/pdf/bjmbr/v35n5/4375.pdf> [Abril 9, 2016]
- Soto, M., (2008). *Banano Técnicas de Producción, Manejo, Poscosecha y Comercialización*. Actualidad del sector. 3ra Ed. Litografía e Imprenta LIL. 67p. Recuperado de: http://www.biodiversityinternational.org/uploads/tx_news/Producci%C3%B3n_y_comercializaci%C3%B3n_de_banano_org%C3%A1nico_en_la_Regi%C3%B3n_del_Alto_Beni_Manual_pr%C3%A1ctico_para_productores_1098.pdf [Diciembre 4, 2016]
- Ganoza, R., y Torres, S. (2012). *Guía práctica para el manejo de banano orgánico en el valle del Chira*. Extensionista en Banano Orgánico. 1ra Ed. Hidalgo Impresores E.I.R.L. 72p. Recuperado de: http://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Peru/Documents/Publications/manual_banano.pdf [Septiembre 29, 2016]
- Torres, A. (2014). *Incidencias Del Uso De Etanol Como Biocombustible En Colombia Sobre El Mercado De Los Derivados De La Caña De Azúcar: Una Aproximación Con Dinámica De Sistemas*. Tesis de posgrado. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 79p. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/36673/1/43630781.2014.pdf>
- Valderrama, A. (2005). *Extracción de taninos presentes en el banano verde*. Revista Lasallista de Investigación. Vol. 1. (2). pp. 17-22. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69510203> [Mayo 19, 2016]
- Vázquez, J. y Dacosta, O. (2007). *Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas*. Revista Ingeniería, investigación y tecnología. Vol. 8(4). Pp. 249-259. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v8n4/v8n4a4.pdf> [Abril 7, 2016]
- Velázquez, H., Ruiz, A. y Oliveira, S. (2009). *Análisis energético y exergético del proceso de obtención de etanol a partir de la fruta de banano*. Grupo de Investigación en Bioprocesos. Universidad de São Paulo-Universidad Nacional. Medellín. 94p. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302010000100010&script=sci_arttext [Diciembre 12, 2016]
- Valdiviezo, R. y Morales, M. (2016). *Elaboración de un destilado alcohólico a base de granos de maíz*. Tesis de pregrado. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Facultad de ciencias de la nutrición. México. 50p. Recuperado de: <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/20500.12114/287/1/AL1%20641.25%20V35%202016.pdf> [Octubre 22, 2016]



Yoshioka, I. C. y Mosquera, Y. (2007). *Proceso de compostaje de los residuos orgánicos*. Augura- Sena. Banatura. Medellín. 30p. [Octubre 15, 2016]

Zapata, A. y Peláez, C. (2010). *Producción en continuo de etanol a partir de banano rechazado (cáscara y pulpa) empleando*

células inmovilizadas. Revista Tumbaga, ISSN 49-60 Numero 5. Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares GIEM. Instituto de Química-Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia 60p. Recuperado de: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3628208> [Mayo 30, 2016]