

## **Azúcares del pseudotallo de plátano: una opción para la obtención de alcohol de segunda generación**

Guarnizo-Franco Anderson <sup>1</sup>., Martínez-Yepes Pedro Nel <sup>1</sup>., Pinzón-Bedoya Martha Lucía

<sup>1</sup> QIDEA: Grupo Químico de Investigación y Desarrollo Ambiental, Universidad del Quindío, (Colombia)

<sup>2</sup> Grupo de Investigación Recursos Naturales, Universidad de Pamplona (Colombia).

### **Resumen**

La transformación de residuos lignocelulósicos, pone en evidencia las grandes posibilidades que presenta nuestro país, rico en recursos agrícolas que generan grandes cantidades de este tipo de residuos, parador solución a la crisis energética. La transformación de estos en productos químicos trae consigo beneficios económicos y sociales. En esta investigación se analizó el pseudotallo de plátano, como una fuente potencial de biomasa lignocelulósica, utilizable para la obtención de azúcares para la fermentación etanólica. Se encontró que el pseudotallo de plátano posee una cantidad significativa de azúcares, de fácil hidrólisis, que había estado inadvertida. En esta investigación se demostró la presencia de almidón con una cantidad del 3 al 5%, que puede ser concentrado y aislado fácilmente. Este hecho mejorará el atractivo del pseudotallo de plátano como materia prima, desde el punto de vista de producción a gran escala de etanol y otras sustancias químicas de interés industrial.

**Palabras clave:** Lignocelulosa, Almidón, Azúcares Reductores, Alcohol, Hidrólisis Ácida.

### **Sugars from plantain pseudostem: an option for second generation ethanol production**

#### **Abstract**

The transformation of lignocellulosic waste, represents an important option in our country for development of agricultural sector because the large quantities produced of this kind of waste, in order to solve the energetic crisis. Its transformation in chemicals, bringing economic and social benefits. In this investigation the pseudostem of banana was analyzed, like a potential source of lignocellulosic, usable biomass for the sugar obtaining for the ethanol fermentation. During its development one was that the pseudostem of banana has a significant amount of sugars, of hydrolysis easy, that there was been inadvertent. In effect, in this investigation the starch presence was demonstrated with an amount from the 3 to 5%, that it can easily be concentrated and isolated. This fact, can improve the attractiveness of the pseudostem of banana like raw material, from the point of view of other chemical substance and large-scale production of ethanol of industrial interest.

**Key words:** Lignocellulose, Starch, Reducing Sugars, Alcohol, Acid Hydrolysis.

### **Banana pseudocaule Açúcares: uma opção para obtenção de álcool a partir de segunda geração**

#### **Resumo**

A transformação de resíduos lignocelulósicos, demonstra o grande potencial do nosso país possui ricos recursos agrícolas que geram grandes quantidades deste tipo de resíduos, solução parador para a crise energética. A transformação desses produtos químicos traz benefícios econômicos e sociais. En Este estudo analisou a banana pseudotallo de como uma fonte potencial de biomassa lignocelulósica, utilizáveis para a produção de açúcares para a fermentação do álcool. Verificou-se que o pseudocaule de banana possui uma quantidade



40

significativa de açúcares, a hidrólise fácil, que tinha sido notado. Este trabalho demonstrou a presença de amido com uma quantidade de 3 a 5%, o que pode facilmente ser concentrados e isolados. Este pseudocaule de banana hechomejorarel atraente como matéria-prima a partir do ponto de vista da produção em larga escala de etanol e outros produtos químicos industrialmente relevantes

**Palavras-chave:** lignocelulose, amido, açúcares reductores, álcool, HidrólisisAcida

\*Para citar este articulo:Guarnizo-Franco A., Martínez-Yepes PN., Pinzón-Bedoya ML.Azucars del pseudotallo de plátano: una opción para la obtención de alcohol de segunda generación.Bistua:Revista de la facultad de Ciencias Basicas.2012.10(1):39-51

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Pedro Nel Martinez Y.Director Grupo de Investigación QIDEA (Grupo Químico de Investigación y Desarrollo Ambiental).email: [pedronelmartinez@uniquindio.edu.co](mailto:pedronelmartinez@uniquindio.edu.co),

Recibido: Marzo 20 de 2011 Aceptado: Agosto 28 de 2011

### Introducción

El bioetanol se perfila como un combustible líquido sustituto de la gasolina, el cual puede ser producido a precios competitivos a partir de los azúcares obtenidos de la biomasa lignocelulósica residual (BLR) (1-6). La producción de etanol a partir de BLR se logra a través de la degradación de ésta para obtener ceboligosacáridos y glucosa, seguido de la conversión de la glucosa a etanol mediante procesos de fermentación (7). La mayor dificultad para la obtención de etanol a partir de BLR, radica en que esta materia prima de origen agrícola, por ser cultivos energéticos, no compita por el uso del suelo y del agua con los cultivos cuya biomasa se encuentra encaminados a la producción de alimentos. Por esta razón la presente investigación abre una ventana hacia la identificación de nuevos materiales para la producción de biocombustibles que se deriven de cultivos no alimenticios, tales como los residuos de los cultivos de Musaceas, abundantes en nuestro país. En relación a la BLR, hasta el año 2007, Colombia tenía cultivada aproximadamente 420 mil ha de diferentes Musaceas. Esta actividad genera una considerable cantidad de residuos, pues solo el 12 % del peso de la planta se aprovecha como fruto comestible, el resto comprende el componente fibroso y no fibroso que incluye el raquis (eje del racimo de banano y plátano), el pseudotallo y las hojas(8), (9). Usualmente, este tipo de residuos, están constituidos principalmente por holocelulosa, que corresponde casi siempre a más del 50 % del peso seco de la biomasa. La holocelulosa es un agregado heterogéneo de carbohidratos, compuesto por celulosa y hemicelulosa integrados a la pared celular en conjunto con la lignina. Esta biomasa resulta ser un recurso natural

importante debido a que la holocelulosa que posee puede ser degradada a sus constituyentes monoméricos (azúcares) para su posterior conversión a etanol. A pesar de este atractivo, la transformación de esta biomasa en azúcares fermentables es problemática(10). La mayor dificultad radica en la baja accesibilidad a la pared celular por parte de los agentes químicos y biológicos que realizan su transformación, por lo que se requiere de la aplicación de un pretratamiento que facilite la acción enzimática antes del proceso de fermentación, dificultad que presentan la mayoría de la BLR(11).

Aunque el pseudotallo, en teoría puede usarse como fuente de holocelulosa, su alto contenido de agua, superior al 70%, puede constituirse en un factor limitante si se compara con otras fuentes de BLR como los cultivos de maíz, arroz y trigo. Esta biomasa lignocelulósica residual contiene una cantidad significativa de carbohidratos, lo cual puede hacer de este residuo como una fuente adicional de compuestos fermentables que se habrían pasado inadvertidos hasta la fecha. De esta manera se perfila el pseudotallo de plátano como un residuo con altas calidades para la producción de etanol de segunda generación.

En este trabajo, se presentan las condiciones de operación para las que fue encontrado el carbohidrato del pseudotallo de plátano, previo tratamiento ácido del mismo y se propone un esquema general para el aprovechamiento más eficiente de este subproducto. Los resultados encontrados confirman que esta es una fuente de azúcares fermentables susceptible de ser transformada a etanol.

### Metodología

Los pseudotallos de plátano se fraccionaron, obteniéndose un líquido

(JP, jugo de pseudotallo de plátano) y un sólido (BP, biomasa lignocelulósica residual del plátano). Estas dos fracciones se caracterizaron y se sometieron a acondicionamiento previo mediante hidrólisis ácida e hidrólisis alcalina.

#### **Caracterización y Análisis composicional**

Para la caracterización, se realizaron algunos análisis, de acuerdo con las normas estándar ASTM (*American Society for Testing Materials*). En la preparación de la biomasa para el análisis composicional se tomaron tres muestras de pseudotallos, las cuales se fragmentaron con un cuchillo, se secaron en horno. La operación de secado se realizó mediante el protocolo establecido en la norma ASTM E1757 y la humedad se determinó de acuerdo con lo indicado en la norma ASTM E871. Para la determinación de los extractivos con etanol, el residuo insoluble en ácido, los azúcares totales y el porcentaje de cenizas, se utilizaron los protocolos establecidos en las normas ASTM 1690-08, ASTM 1721, ASTM 1758 y ASTM D1102, respectivamente.

Para la determinación del contenido de celulosa se utilizó el método de Seifert(12,13 para determinar la holocelulosa el método del hipoclorito (12). A su vez, la determinación de los azúcares reductores y disponibles se realizó haciendo uso del método de UV/Vis empleando el ácido 3,5-Dinitrosalicílico (DNS)(14) y (15).

La presencia de almidón en un precipitado aislado del jugo, se identificó cualitativamente mediante la prueba de Lugol y Benedict. Posteriormente, mediante un análisis comparativo del espectro FTIR obtenido tanto a la muestra como al almidón Merck, se

verificó la presencia de este. Además, se obtuvo un perfil cristalino de polvo mediante rayos X. Esta prueba se realizó en un difractómetro de rayos X-D8 advance, con las siguientes especificaciones: tubo con Ánodo de CuK, contador de centelleo NaI, ángulo inicial: 5°, final: 50°, Paso 0.1° y tiempo/paso de 10s.

La identidad de los monosacáridos liberados se determinó mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas (MS-CG) derivatización con hidroxilamina y HMDS (Hexametildisilazano) para formar oximas y trimetilsilanos(7). Para la determinación cuantitativa por MS-CG de los compuestos mayoritarios y minoritarios se prepararon soluciones modelo de (glucosa, fructosa, xilosa, arabinosa con una concentración de 2,5 g/L) y de (5-HMF, ácido succínico, ácido cítrico con una concentración de 25 mg/L), respectivamente. Además 500 µL de hidrolizado, y 500 µL de jugo del pseudotallo se liofilizaron hasta sequedad. Posteriormente los residuos liofilizados fueron tratados con hidroxilamina, HMDS y TFA (ácido trifluoroacético) como lo indica Katona(7). Un µL de cada una de estas muestras fue inyectado al cromatógrafo Konik HPGC 4000B, equipado con un sistema on-column. La inyección fue hecha en modo splitless y para ello se utilizó una columna capilar DB-5 (30 m x 0,25 mm;  $d_f = 0,25 \mu\text{m}$ ), la cual fue mantenida inicialmente a una temperatura de 60°C por 2 min. Posteriormente se fue incrementado 20°C/min hasta alcanzar 150°C, luego a 6°C/min hasta 300°C, y finalmente esta temperatura se mantuvo durante 20 minutos. La temperatura del inyector y del detector se sostuvo a 260°C y 300°C

respectivamente. Los fragmentogramas obtenidos fueron comparados con la biblioteca NIST

*MassSpectralSearchProgram* versión 2.0. Para confirmar la identidad de los picos, se analizaron bajo las mismas condiciones soluciones con cada uno de los componentes individuales.

#### Hidrólisis ácida del jugo de pseudotallo de plátano (JP) y posterior fermentación

El JP se sometió a una hidrólisis con ácido sulfúrico al 1% para aumentar la cantidad de glucosa derivada del almidón. Luego de establecer el tiempo en el cuál se alcanza la mayor concentración de azúcares reductores, AR, se neutralizó con hidróxido de calcio en cantidad equivalente al NaOH 0,10 M gastado de en la vabración. El JP hidrolizado y neutralizado se fermentó con levadura comercial *Saccharomyces cerevisiae* en proporción de 1 g/Ly se siguió el proceso de fermentación por 7 días cuantificando los azúcares reductores, AR. Además, se determinó el contenido de sólidos solubles, SS, como grados Brix.

#### Hidrólisis ácida de la biomasa lignocelulósica residual del plátano (BP) y fermentación

La hidrólisis ácida del BP se hizo con concentraciones de ácido inferiores al 5%. La relación líquido/sólido utilizada fue de 1:8 en base seca, usando 3 g de BP, el cual se colocó en tubos de ensayo con tapa. Las temperaturas de tratamiento utilizadas fueron 120°C, 160°C y 170°C con un tiempo máximo de 180 min. Para la presentación de los resultados se usó el parámetro de severidad combinada (CS') (16), descrito en las ecuaciones 1 a 3.

$$R_0 = \int_a^b \exp\left(\frac{T-100}{14,75}\right) dt = t \exp\left(\frac{T-100}{14,75}\right) \quad (1)$$

$$R'_0 = CS = R_0[H^+] \quad (2)$$

$$\log R'_0 = CS' = \log(R_0[H^+]) = \log R_0 - pH \quad (3)$$

En donde:  $t$  es el tiempo de residencia (min),  $T$  es la temperatura de tratamiento (°C), y 100 es la temperatura de referencia.  $R_0$  es el coeficiente de severidad. El valor de ajuste (14,75 de la ecuación 1) corresponde a una constante arbitraria  $\omega$  (17). Este valor corresponde a la energía de activación suponiendo que la cinética de la reacción corresponde a una cinética de pseudo primer orden. La fermentación se realiza en las mismas condiciones descritas en el literal anterior.

## Resultados y Discusión

### Caracterización y Análisis composicional

La caracterización del pseudotallo se inició con la determinación composicional de JP, a fin de determinar parámetros característicos de la BLR, tales como los porcentajes de humedad, cenizas, almidón y azúcares residuales (AR). También se cuantifico el contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos del BP, antes y después del pretratamiento. Los resultados obtenidos se indican en las Tablas 1 y 2. Llama la atención el contenido de almidón encontrado en el jugo de pseudotallo de plátano, JP, el cual corresponde al 3,1%, ya que constituye la fracción más importante de carbohidratos no estructurales en este tipo de materiales y representa una ventaja en comparación con otros residuos lignocelulósicos que lo poseen en cantidades mínimas. Con relación a estos en la Tabla 3 se muestra un análisis comparativo de la composición de los diferentes tipos de biopolímeros asociados con este tipo de materiales lignocelulósicos de naturaleza

44

fibrosa (18), lo cual le infiere unas características específicas para su posterior uso como nueva fuente almidón, que nos da azúcares fermentables para la producción de alcohol carburante.

De acuerdo con el resultado anteriormente encontrado en esta investigación, la identidad del almidón que precipita luego de dejar en reposo el JP, se ahondó en la identificación del mismo. Inicialmente se realizó una prueba cualitativa confirmatoria mediante la prueba de Lugol y posteriormente se procedió a realizar un análisis comparativo del espectro de infrarrojo mediante un análisis FTIR, tanto de la muestra de almidón del pseudotallo como de almidón grado analítico. Los espectros FT-IR de ambos se muestran en la Figura 1 y 2, respectivamente.

Una banda ancha y fuerte con número de onda entre  $3300-3400\text{ cm}^{-1}$  corresponden a los estiramientos de los grupos  $-\text{OH}$ . La amplitud de la banda indica la presencia de puentes de hidrógeno intermoleculares. Los picos entre  $2950-2900\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a las vibraciones de extensión  $\text{C}-\text{H}$ . A  $1650\text{ cm}^{-1}$  se encuentra una banda de flexión del  $-\text{OH}$ , que puede asociarse a la presencia de agua, teniendo en cuenta que el almidón es un polímero higroscópico. A  $1460-1350\text{ cm}^{-1}$  están las vibraciones de flexión  $\text{C}-\text{H}$  y a  $1020-1160\text{ cm}^{-1}$  se observa una fuerte banda con tres picos, la cual es característica de los polisacáridos consistente en las deformaciones de tensión del  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  ya la flexión del  $\text{OH}$ , porque la estructura del almidón presenta interacciones  $\text{C}-\text{O}$  con diferente ambiente químico ( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ,  $\text{CH}_2\text{OH}$  y  $\text{COH}$ ). Ambas muestras presentan bandas y picos de transmitancia en los números

de onda mencionados, los cuales están presentes en la estructura de la amilosa y de la amilopectina.

Las bandas a  $1045$ ,  $1022\text{ cm}^{-1}$  y de  $3000-3700\text{ cm}^{-1}$  también son variables según las cantidades de regiones ordenadas (cristalinas) y amorfas, por lo cual se observan algunas diferencias entre ambas muestras. En relación a la cristalinidad y con respecto al perfil de difracción de rayos X, los gránulos nativos de almidón exhiben dos tipos principales de diagrama uno denominado tipo A para almidones de cereales y el tipo B para tubérculos y almidones ricos en amilosa. Otro tipo de diagrama de difracción es el C, el cual se muestra como una mezcla de diagramas A y B, es característico de la mayoría de almidones de legumbres y también de cereales que crecen en condiciones específicas de temperatura e hidratación (19). De acuerdo con estos resultados el perfil cristalino muestra que el almidón de pseudotallo es similar al de tipo B y no hay diferencias aparentes entre el almidón del fruto de plátano y el que procede del pseudotallo de plátano (Figura 3). Existe otra forma cristalina, la forma V, propia de complejos de amilosa con ácidos grasos y monoacilglicéridos, la cual rara vez es detectada en almidones nativos (Figura 3, arriba).

Los análisis cromatográficos suministran información cualitativa acerca de la composición de JB y JP. La oximación de los grupos carbonilos de los azúcares forman isómeros *cis-trans* que se observan como dos picos contiguos en los cromatogramas. En las Figuras 4 y 5 se muestran los perfiles cromatográficos de la solución modelo y del JP, respectivamente. En este último cromatograma se observa que el jugo de pseudotallo, JP, contiene azúcares tales



como: fructosa, glucosa y sacarosa, y está exento de xilosa y arabinosa. De otro lado, se determinó la presencia de ácido succínico y ausencia del ácido cítrico. Aunque en un tiempo de retención de 18:05 min se produjo una señal en la muestra de JP, el espectro de masas no corresponde al del ácido cítrico por lo que se descarta la presencia de éste ácido en cantidades detectables.

#### **Hidrólisis ácida del Jugo de pseudotallo de plátano JP**

En la Figura 6 se observa que la formación de azúcares reductores es máxima cuando se alcanzan 60 min de calentamiento y esta formación se mantiene constante hasta el tiempo final de reacción que es de aproximadamente 120 minutos. Esta situación de máxima hidrólisis es reflejada cuando la presencia de sólidos solubles (SS, 5,5) llega a ser máxima y la prueba negativa de Lugol, tal y como se encuentra reportado en la Tabla 4. Una considerable disminución de los azúcares reductores AR luego de adicionar el ácido, demuestra que es posible que en este tipo de material biológico se encuentren por ejemplo proteínas, las cuales interfieren en el análisis de azúcares del JP fresco.

Los azúcares de los hidrolizados de JP alcanzan una concentración constante luego de 60 horas de fermentación (Ver la figura 7). El experimento se llevó por 7 días, es decir 168 horas, con el fin de determinar el tiempo en que la concentración es constante, (o sea las 60 horas) con lo que se logra un máximo de etanol de 0,84% p/p. Cabe resaltar que la fermentación se hizo sin la adición de complementos nutritivos para la levadura.

#### **Hidrólisis ácida a la biomasa lignocelulósica residual del plátano, BP**

La finalidad de la hidrólisis ácida como pretratamiento de la biomasa lignocelulósica residual del plátano, BP, es remover la hemicelulosa degradándola a sus monosacáridos, aumentando a su vez el área accesible para un ataque enzimático de celulasas(1).

En la Figura 8 se muestran las etapas que ocurren en el proceso de hidrólisis ácida de la biomasa lignocelulósica residual del plátano, BP, la cual para una mayor comprensión se ha segmentado en tres etapas (A, B y C). En la etapa A-B ocurre la degradación de los carbohidratos fácilmente hidrolizables (almidón principalmente) y la hemicelulosa a azúcares reductores con un máximo alrededor de un CS' de 9,5. De igual forma se observa un decrecimiento en la concentración de AR luego de ese máximo, lo cual obedece a la deshidratación de pentosas y hexosas para formar furfural e hidroximetilfurfural respectivamente promovida por factores tales como la temperatura y el contenido de sulfúrico. En la sección B-C puede observarse que esta degradación es más rápida para las hexosas que para las pentosas. Luego de finalizar la etapa B-C, se observa un incremento en el contenido de AR, lo cual se debe a la producción de glucosa a partir de la celulosa. Estas observaciones son comparables con los resultados reportados por (16). En la Figura 9 se observa la corroboración de la presencia de pentosas y hexosas provenientes de la hemicelulosa, mediante (MS-CG).

Los productos obtenidos de los tratamientos realizados se obtienen un líquido (hidrolizado) y un sólido (constituido principalmente de celulosa y lignina). El hidrolizado con mayor concentración de azúcares reductores, es decir el tratado con ácido sulfúrico al

46

0,5% durante 40 min a 160°C, con un CS' de 9,38, tal y como se observa en la Tabla 5, se sometió al proceso de fermentación. Después de 7 días de tratamiento, se obtuvo un fermentado con 1,40% de etanol. El producto sólido resultante, mostró un contenido de celulosa 66,32%, hemicelulosa 14,36% y lignina del 18,20%, tal y como se indica en la Tabla 2. El aumento significativo en su contenido indica que tanto la celulosa como la lignina presentes en este material no se degradan a estas condiciones de tratamiento, sin embargo la hemicelulosa muestra una disminución discreta, lo cual es un indicativo de una degradación poco significativa de esta.

Lo anteriormente mencionado se tuvo en cuenta al realizar el balance de materia entre el material fresco y el obtenido luego de la hidrólisis, ya que parte del material que se solubiliza (almidón, hemicelulosa, entre otros), provoca un aumento en la proporción de los materiales que no lo hacen (celulosa y lignina). Bajo esta premisa, se determinó que el contenido de hemicelulosa varió del 15,67% al 7,94%.

### Conclusiones

Una vez desarrollado este trabajo y con base a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, y en algunos otros relacionados con esta temática (1) y (16), se llega a la figura 10 donde se esquematiza una propuesta de aprovechamiento del pseudotallo de plátano y banano para la obtención de etanol.

Vale la pena resaltar que una de las ventajas del uso del pseudotallo de plátano sobre otras reservas de biomasa (paja de trigo y arroz, cascarilla de arroz, etc.), consiste en el uso que se le puede

dar a otros productos detectados, tales como el almidón y los compuestos fenólicos que pueden ser aislados fácilmente por decantación, los cuales se detectaron pero deberán ser motivo de investigaciones posteriores.

La Tabla 6 recoge los parámetros mínimos que según (20) debe cumplir un proceso de transformación de BLR en etanol, los cuales han sido analizados para esta investigación.

Además la conversión biológica de la biomasa celulósica puede aprovecharse el poder de la biotecnología para hacer progresos para que los costos de los biocombustibles sean competitivos. La producción de etanol es particularmente idónea para unir esta combinación de la necesidad, el recurso, y la tecnología. Se han logrado avances significativos que han hecho que etanol derivado de productos celulósicos sea competitivo con etanol de maíz. Sin embargo, aunque la biotecnología constituye una importante oportunidad de conseguir costes muy bajos, el pretratamiento de materiales celulosos resistentes va en la dirección contraria. Esta simple operación es el paso de procesamiento más costoso, representando aproximadamente 20% del costo total. De acuerdo con lo anterior, lograr la mejor combinación de operaciones para el pretratamiento del material celulósico elegido, puesto que los esfuerzos deben estar enfocados hacia el pretratamiento para hacer de esta etapa considerablemente competitiva reduciendo gastos que permitan acelerar sus aplicaciones a nivel comercial para beneficio de la sociedad y de la industria química en general.

### Recomendaciones

Para dar un concepto más profundo y consistente que permita establecer de





manera definitiva la viabilidad del uso del pseudotallo de plátano como materia prima en la producción de alcohol carburante se deben tener en cuenta aspectos que incluye el establecimiento de la economía del proceso basada en el diagrama de la figura 10. Siendo estas las circunstancias, nuevas investigaciones son necesarias, que sean encaminadas a la evaluación de la digestibilidad enzimática del producto del pretratamiento ácido de la BP, uso de otras especies de levaduras, ensayo de otros tipos de pretratamiento, entre otros.

De igual forma, se deben explorar otras formas de pretratamiento de tal manera que se puedan utilizar las dos fuentes de azúcares fermentables encontradas: almidón y hemicelulosa.

Para JP se hace necesaria la eliminación del agua por decantación y está sujeto a investigaciones futuras. En cuanto al BP, la hidrólisis enzimática incrementaría considerablemente la concentración de azúcares una vez se realice mediante nuevos estudios que logre transformar la celulosa remanente en el material pretratado.

La celulosa derivada del pretratamiento debe ser altamente digerible con rendimientos superiores al 90% en menos de 5 días y preferiblemente en menos de tres días con cargas de celulosa de menos de 10 FPU/g Celulosa por lo que aún falta por establecer la digestibilidad de la BP luego de la hidrólisis ácida y aún considerar otros tipos de pretratamiento.

### Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Quindío, a la Dirección de

la Maestría en Química de la Universidad del Quindío y al Grupo de Investigación en Recursos Naturales de la Universidad de Pamplona por los aportes para realizar esta investigación.

### Referencias Bibliograficas

- 1.-Hendrics ATWM y Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2009.100(1):10-18.
- 2.- Guarnizo Franco A, Martínez Yepes P. N. y ValenciaSanchez HA. Pretratamientos de la celulosa y biomasa para la sacarificación. *Scientia et Technica*, 2009, XV(42):284-289.
- 3.- Mosier N., Wyman Ch., Dale B., Elander R., Lee Y.Y., Holtzapple M. and Ladisch M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2005. 96(6): 673-686.
- 4.-McMillan JD. Pretreatment of lignocellulosic biomass, in *Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production*, ed. A.C. Society, Washington DC 524;1994
- 5.- Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J. and Stroeve P. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, 49 (8), 3713–3729.
- 6.- Katona Zs. F., Sass P. y Molnár-Perla I. Simultaneous determination of sugars, sugar alcohols, acids and amino acids in agri-cots by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 1999, A. 847(1-2): 91-102.
- 7.- Zuluaga, R., et al. Cellulose microfibrils from banana farming residues: isolation and characterization. *Cellulose*, 2007, 14(6): 585-592.

- 8.-Elanthikkal S., Gopalakrishnanapanicker U., Varghese S., Guthrie J.T. Cellulose microfibrils produced from banana plant wastes: Isolation and characterization. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3-5): 852–859.
- 9.-SanchezRiano, A.M.;Gutierrez Morales, A.I.; MuñozHernandez, J.A. y Rivera Barrero, C.A.Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos.Tumbaga. 2010,1 (5): 61-91
- 10.-MateusFontecha L. Evaluación de los pretratamientos con ácido sulfúrico diluido y AFEX en la biomasa lignocelulósica del tipo pasto gigante "*PennisetumSp*". Tesis de Maestría en Ingeniería Química, 81 p.; Universidad Nacional de Colombia; Bogotá, Colombia, 2011.
- 11.- Butt DAE. Formation of phenols from the low-temperature fast pyrolysis of Radiata pine (*Pinusradiata*) Part I. Influence of molecular oxygen. Journal Analytical and Applied Pyrolysis, 2006, 76 (1-2): 38-47.
- 12.-Seifert K.Zurfellulose-Schnellbestimmung nach der acetylation-methode. Das papier, 1960, 14(3): 104.
- 13.- Zhao X., Zhang I. and Liu D. Comparative study on chemical pretreatment methods for improving enzymatic digestibility of crofton weed stem. Bioresource Technology. 2008. 99(9): 3729-3736
- 14.-James C.S. Analytical Chemistry Of Foods. AN Aspen Publisher, New York, Inc. Great Britain, 178; 1998.
- 15.-Larsson S., Palmqvist E., Hahn-Hagerdal B., Tengborg Ch., Stenberg K. Zacchi G. and Nilvebrant NO. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 24(3-4): 151-159.
- 16.-Pedersen M. y Meyer AS. Lignocellulose pretreatment severity - relating pH to biomatrix opening. New Biotechnology, 2010, 27(6): 739-750.
- 17.- Gómez Tovar F. Métodos Secuenciales de Tratamiento Químico y Enzimático de Residuos Agrícolas para la Producción de Metanol. Tesis de Maestría en Ciencias Aplicadas – Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, A.C.; San Luis de Potosí, México, noviembre del 2008.
- 18.-Parker R y Ring SG. Aspects of the Physical Chemistry of Starch. Journal of Cereal Science, 2001, 34(1): 1-17.
- 19.-Yang B. and Wyman C.E. Pretreatment: the key to unlocking low cost cellulosic ethanol. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2008(2): 26-40.
- 20.- Guarnizo Franco A. Pretratamiento de la Biomasa Lignocelulósica para la Obtención de Etanol. Tesis de Maestría en Química, Universidad del Quindío. Armenia. Quindío. Colombia. 2010.

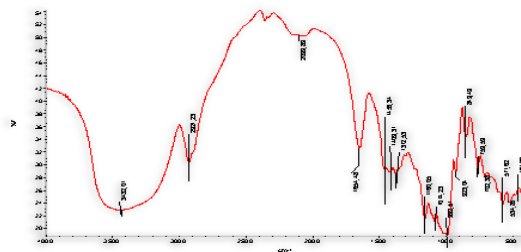


Figura1. Espectro FTIR de almidón del jugo de pseudotallo, JP.

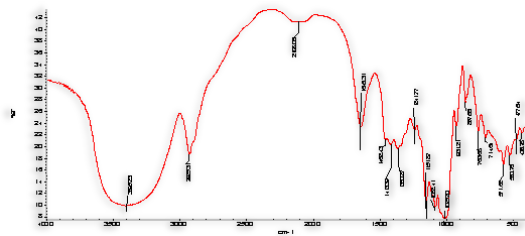


Fig. 2. Espectro FTIR de almidón soluble marca Merck

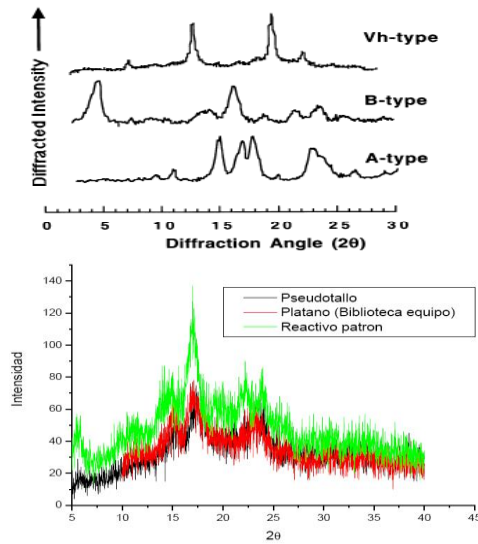


Fig. 3. Polimorfos del almidón (arriba). Difractograma del pseudotallo y comparación con otros almidones (abajo). (18)

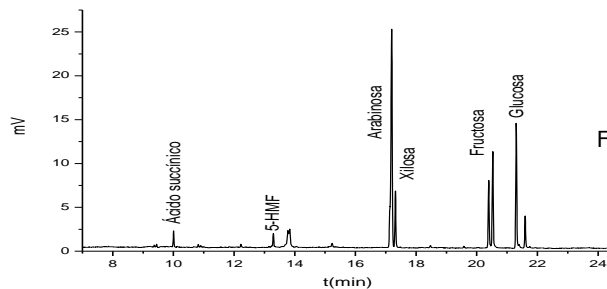


Fig. 4. Cromatograma de la solución modelo.

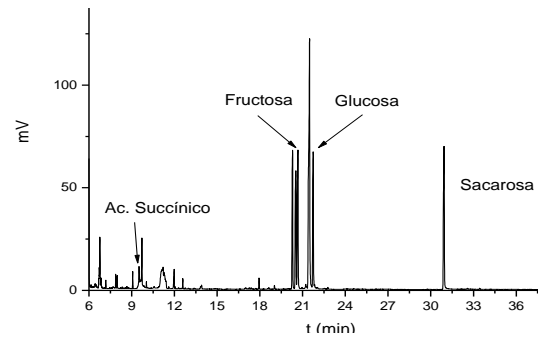


Fig. 5. Cromatograma del jugo de pseudotallo, JP

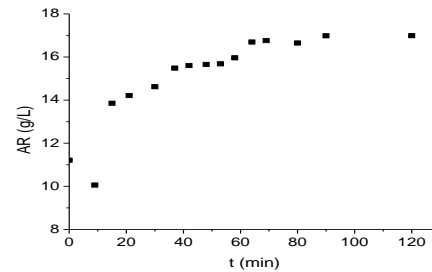


Fig 6. Hidrólisis con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1% del JP

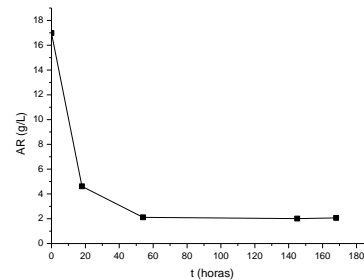


Figura 7. Fermentación del JP hidrolizado

50

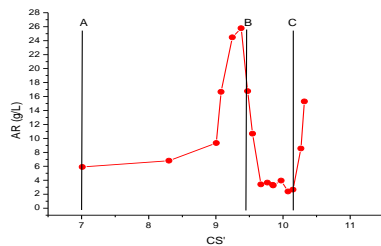


Figura 9. Cromatograma de hidrolizado BP

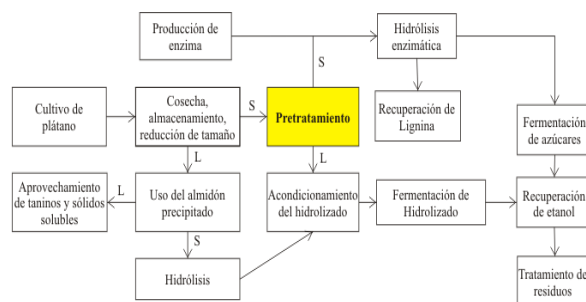


Fig. 10. Propuesta de aprovechamiento del pseudotallo de plátano y banano en la producción de etanol. S: Sólido, L: Líquido.

Componente	JP
Humedad	96,71%
Cenizas	0,37%
Almidón	3,31%
Azúcares reductores (AR)	11,2 g/L

Tabla 1. Composición del JP

Componente	Fresco	Después de pretratamiento
Celulosa	28,34	66,32
Hemicelulosa	15,67	14,36
Lignina	12,18	18,20
Extractivos	6,15	0,95

Tabla 2. Composición de la BP antes y después del pretratamiento con ácido sulfúrico, en base seca.

Tabla 3. Contenido en Celulosa, Hemicelulosa y Lignina en base seca de algunos residuos lignocelulósicos (\*18)

Material Lignocelulósico	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
Trigo*	46,9	24,5	5,9
Maíz*	25,7	48,24	3,2
Avena*	38,0	21,5	4,6
Cebada*	37,9	31,9	6,4
BP (después del pretratamiento)	66,32	14,36	18,20

Tabla 4. Hidrólisis ácida del JP.

T	SS (°Brix)	AR (g/L)	Lugol
0	2,0	11,21	+
9	5,0	10,05	+
15	5,8	13,85	+
21	5,8	14,21	+
30	5,9	14,62	+
37	5,9	15,48	+
42	6,0	15,61	+
48	6,0	15,65	+
53	6,0	15,68	+
58	6,0	15,96	-
64	6,0	16,70	-
69	6,0	16,76	-
80	6,0	16,65	-
90	6,0	16,98	-
120	6,0	16,91	-

Tabla 5. Azúcares reductores según CS'.

t (min)	T°C	% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CS'	AR(g/L)
90	90	5	7,07	6,00
15	120	0,1	8,25	7,02
17	160	0,5	9,01	9,33
20	160	0,5	9,08	16,67
15	170	0,5	9,25	24,46
40	160	0,5	9,38	25,78
25	160	1	9,47	16,77
30	160	1	9,55	10,67
10	170	2	9,67	3,41
25	170	1	9,77	3,66
10	170	3	9,85	3,34
60	160	1	9,85	3,25
20	170	2	9,97	3,95
50	160	2	10,08	2,40
30	170	2	10,15	2,67
20	180	2	10,27	8,56
15	180	3	10,32	15,29

Tabla 6. Criterios de producción de etanol a partir del pseudotallo.

Criterio	Comentario
Costos mínimos en las sustancias químicas utilizadas para las etapas previas a la fermentación, tales como pretratamiento, neutralización y acondicionamiento.	Los reactivos químicos empleados en esta investigación: ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, son reactivos económicos que cumplen una función característica y necesaria en el proceso.
Gasto de energía mínimo en el acondicionamiento de la biomasa (reducción de tamaños).	El costo de adicional energía para las operaciones del acondicionamiento del JP y del BP (prensado, trituración y molienda) debe de establecerse para determinar el cumplimiento de esta condición.
Los azúcares provenientes de hemicelulosa y los derivados del pretratamiento deben estar lo más cercano al 100 % de fermentabilidad.	En investigaciones previas, la fermentabilidad de los hidrolizados de BP y JP, fueron establecidas en alrededor del 80% sin enriquecimiento del sustrato (21).
Debe haber una conversión de hemicelulosa a azúcares por encima del 80%.	La conversión de la hemicelulosa a azúcares fue del 55%. Para lograr una mayor conversión de azúcares se necesitan severidades más grandes lo que puede resultar contraproducente por la degradación de los azúcares ya formados a partir del almidón aún presente en la BP.
La concentración de azúcares producto de las operaciones de pretratamiento e hidrólisis enzimática debe estar por encima del 10% para asegurar que la recuperación de etanol sea manejable económicamente.	La concentración de azúcares en los hidrolizados de JP y BP, tienen una concentración por debajo del 10%.
Los reactores para el pretratamiento deben ser de bajo costo, de volumen limitado, de materiales económicos y resistentes a la corrosión, y deben manejar presiones de operación moderadas.	Aunque la hidrólisis ácida se llevó a cabo a concentraciones bajas de ácido (1%), este ambiente puede contribuir a la rápida corrosión de los reactores.
La lignina y otros constituyentes deben ser recuperables para su conversión en energía o productos valiosos para simplificar el procesamiento.	Las hidrólisis ácidas y posterior hidrólisis enzimática dejan como subproducto la lignina que puede emplearse como materia combustible para el suministro de energía del proceso. Es de suma importancia resaltar el hecho de que además de este material, el pseudotallo provee almidón y taninos de fácil remoción que pueden ser aprovechables como productos de valor agregado.
La distribución de azúcares recuperados en el pretratamiento y subsecuente hidrólisis enzimática debe ser compatible con el microorganismo seleccionado para fermentar los cinco azúcares de la hemicelulosa (xilosa, manosa, arabinosa, glucosa y galactosa).	La levadura empleada en esta investigación es de uso comercial en la fermentación de hexosas.
La demanda de calor y energía para el pretratamiento debe ser baja y/o ser compatible con el resto de etapas de proceso.	La determinación real de los requerimientos energéticos para este procesamiento se podrá estimar cuando este se realice a escala de planta piloto.